

# **Geschossdecken aus Bambus**

Untersuchung und Weiterentwicklung vorgefertigter Geschossdecken aus Bambus unter besonderer Betrachtung naturbedingter Abweichungen der Halmgeometrie und deren Auswirkungen auf Tragverhalten sowie mögliche Fertigungsprozesse.

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft der  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Renko STEFFEN

2017

Referent: Prof. Dipl.-Ing. Alexander Furche

Korreferentin: Prof. M.Sc. Karen Eisenloffel

Tag der Promotion: 6. November 2017



## Kurzfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit den Möglichkeiten, vorgefertigte Geschossdecken aus Bambus zu konstruieren, welche einen ressourcenschonenden Beitrag zur Lösung drängender Bauaufgaben in Entwicklungsländern darstellen können.

Die starken Urbanisierungstendenzen in weiten Teilen der Welt machen den millionenfachen Bau neuer, mehrgeschossiger Wohnhäuser erforderlich, für die entsprechend große Mengen an Baumaterial benötigt werden. Der Einsatz von Stahlbeton ist für starke CO<sub>2</sub>-Emissionen und einen hohen Energie- und Ressourcenverbrauch verantwortlich. Bambus hingegen speichert CO<sub>2</sub> beim Wachstum ein und besitzt im Vergleich zum Eigengewicht eine hohe mechanische Festigkeit. Trotz seiner günstigen Eigenschaften wird Bambus oft nur für den Bau eingeschossiger Hütten verwendet. Das stoffliche Potenzial wird auf diese Weise nicht genutzt. Als Hauptgrund erscheinen konstruktiv unangemessene und stark limitierende Fügeprinzipien, sodass die Nutzung in Geschossdecken selten stattfindet.

Die vorliegende Arbeit befasst sich zunächst mit den morphologischen und mechanischen Eigenschaften des natürlich runden Halmes, aus welchen in einem weiteren Schritt die Eignung möglicher Fügeprinzipien abgeleitet wird. Aus der Betrachtung vorhandener Konstruktionsansätze für Bambus-Geschossdecken folgt eine Bewertung möglicher Tragwerks-Systeme, um das Bambusmaterial in geeigneter Weise einzusetzen. Über eine Reihe experimenteller Untersuchungen an Prüfkörpern findet eine Annäherung an einen Konstruktionsvorschlag statt, welcher in Bezug auf Material und Aufgabenstellung optimiert ist.

Das Prinzip einer unterspannten Trägerschar mit kontinuierlicher Stützung des Obergurts erweist sich dabei am leistungsfähigsten. Die auftretenden Kräfte werden parallel zur Faser geführt und ungünstige Schubspannungen vermieden. Die Zusammenfassung natürlich variabler Bambus-Einzelteile zu geometrisch exakten Modulen gelingt durch die Verwendung orthogonaler Auflagerhölzer, welche sich im Schnittpunkt von Unterspannung und Obergurt befinden.

Eine abschließende Bewertung zeigt, dass die Vorfertigung von extrem leichten Bambus-Halbfertigteilen in Kombination mit lokal vorhandenem Bodenaushub, der konventionellen Stahlbetonbauweise in mehrfacher Hinsicht vorzuziehen ist. Die neuartige Konstruktion weist eine deutlich bessere Ökobilanz auf, ist ökonomisch günstiger herzustellen und kann einen Beitrag zur wirtschaftlichen Verbesserung ruraler Gemeinden darstellen.

Schlagworte:

Bambus, Deckenkonstruktion, Vorfertigung

## **Abstract**

This work concerns itself with the possibilities of prefabricating bamboo-platform-slabs, which could help to save resources, while contributing to the mitigation of urgent housing needs in developing countries.

Strong tendencies towards urbanization in vast parts of the world require the construction of millions of multi-story residential buildings, thus creating an enormous demand for building materials. The use of reinforced concrete results in relatively large CO<sub>2</sub> emissions while consuming huge quantities of energy and resources. Bamboo, on the other hand, absorbs CO<sub>2</sub> while growing and has extraordinary mechanical strength in comparison to its weight. Despite its beneficial properties the constructional application of bamboo is restricted mostly to plain single-story huts. The full potential of this material is thereby not being realised. The main reasons for this are inappropriate methods of connection with limited carrying capacity, which result in preventing a comparably more demanding usage in platform slabs

The first part of the work is devoted to the morphological and mechanical characteristics of naturally round culms, which determine the suitability of any connection derives. Assessment of existing construction principles for bamboo-platform-slabs is followed by the evaluation of possible structural systems for an appropriate application of bamboo. A number of experimental investigations on platform samples lead to an optimized construction proposal.

The principle of a suspended truss with a continuously supported upper chord appears to be the most effective method.

Recurring forces are lead parallel to the bamboo fibre, thereby avoiding unfavourable shear stress. Integration of naturally variable bamboo components in geometrically precise construction modules is achieved by the use of orthogonal lumber blocks connecting upper chord and suspension at the bearing.

A final concluding evaluation demonstrates the multiple advantages of light and semi-prefabricated bamboo modules combined with locally excavated earth. In comparison to reinforced concrete, the life cycle assessment of the proposed bamboo construction shows a more favourable ecobalance, construction is more rapid and materials are more affordable while at the same time prefabrication can contribute to wealth in rural communities.

Keywords:

*Bamboo, floor structure, prefabrication*



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die hier vorliegende Dissertation selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Weiterhin erkläre ich, dass die Arbeit weder als Dissertation oder Prüfungsarbeit vorgelegt wurde, noch Teile davon vorher veröffentlicht wurden.

---

Dipl.-Ing. Renko Steffen

Hannover, 19.06.2017

## **Persönliche Anmerkung des Verfassers**

Mein Dank gilt:

Prof. Alexander Furche für die aufmerksame Betreuung der Arbeit, die langjährige gute Zusammenarbeit am IEK und das in mich gesetzte Vertrauen.

Prof. Manfred Lux, der das Thema der nachwachsenden Rohstoffe seinerzeit am IEK platzierte.

Prof. Dirk Donath, Jakob, Bethy und Hennok für die Unterstützung am EiABC in Addis Abeba.

Rene Wallschläger, ohne den viele der experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen wären. Sein unermüdlicher Erfindergeist und Engagement kamen zur richtigen Zeit und haben großen Anteil am Gelingen der Versuche und der konstruktiven Verbesserungen.

Jörg Stamm für wertvolle Erfahrungsberichte, Literatur, die Vermittlung wichtiger Kontakte in Äthiopien und die Beispiele seiner großartigen Bauten aus Bambus.

Ziegert-Roswag-Seiler-Architekten für vorbildhafte und motivierende Architektur, insbesondere Uwe Seiler für die förderlichen Gespräche und die Übermittlung der statischen Berechnungen zum Projekt Tipu Sultan Merkez in Pakistan.

Christoph Borchers der mit seinem Entwurf den Impuls zu dieser Arbeit gegeben hat.

Rilana Kubassa für die Durchsicht des Textes.

Vor allen anderen aber danke ich Célia für Liebe, Kraft und Geduld während all der Zeit. Ohne dies gedeiht nichts.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Persönliche Motivation .....	1
1.2	Handlungsbedarf .....	3
1.3	Warum Bambus? .....	5
1.4	Zielsetzung .....	7
1.5	Methodik .....	9
<b>2</b>	<b>Bambus-Charakteristika .....</b>	<b>11</b>
2.1	Verständnis des Habitus .....	11
2.1.1	Besondere Herausforderungen natürlicher Baustoffe .....	11
2.1.2	Gestalt als Antwort auf innere und äußere Faktoren .....	13
2.1.3	Flexibilität und Schlankheit als Überlebensstrategie bestimmter Klimazonen .....	15
2.2	Makrostruktur: Aufbau des Bambushalms .....	17
2.2.1	Rhizom .....	17
2.2.2	Nodium .....	18
2.2.3	Internodium .....	18
2.3	Mikrostruktur: Aufbau der Halmwand .....	19
2.3.1	Epidermis .....	19
2.3.2	Fasern .....	19
2.3.3	Leitbündel .....	19
2.3.4	Parenchym .....	19
2.3.5	Faserdichte .....	19
2.3.6	Richtungsabweichungen der Fasern am Nodium .....	21
2.4	Mechanische Eigenschaften von Bambus .....	23
2.4.1	Zugfestigkeit parallel zur Faser .....	24
2.4.2	Zugfestigkeit quer zur Faser .....	25
2.4.3	Druckfestigkeit parallel zur Faser .....	26
2.4.4	Druckfestigkeit quer zur Faser .....	27
2.4.5	Biegefestigkeit .....	27
2.4.6	Scherfestigkeit .....	27
2.4.7	Quellen und Schwinden .....	28
2.4.8	Elastizitätsmodul .....	33
2.5	Variierende geometrische Parameter von Bambushalmen .....	33
2.5.1	Rotationssymmetrie .....	34
2.5.2	Internodienlänge .....	36
2.5.3	Krümmung .....	36
2.5.4	Außendurchmesser .....	37
2.5.5	Wanddicke .....	38
2.5.6	Flächenträgheitsmoment .....	38
2.5.7	Gegenüberstellung der geometrischen Kenngrößen .....	40
<b>3</b>	<b>Prinzipielle Arten der Krafteinleitung .....</b>	<b>43</b>
3.1	Stirnkontakt .....	44
3.2	Kammerfüllung .....	44
3.3	Schelle .....	45
3.4	Stabförmige Verbindungsmittel .....	45

3.5	Stapelung.....	46
3.6	Geleimte Halmspalten.....	46
<b>4</b>	<b>Unvorteilhafte Bambus-Fügeprinzipien .....</b>	<b>47</b>
4.1	Stapelung von Halmen .....	47
4.1.1	Lokale Überlastung der Halmwand durch Querpressung .....	48
4.1.2	Zerstörung des Halmes durch Querpressung.....	49
4.2	Stabförmige Verbindungsmittel.....	50
4.2.1	Lochleibungsspannungen.....	50
4.2.2	Scherspannungen.....	51
4.2.3	Querzugspannungen .....	52
4.2.4	Dübel fördern die Tendenz des Halmsplitters.....	52
4.2.5	Bohren schädigt den Halm .....	53
4.2.6	Dübelspitzen schädigen die Halmwand bei Kontakt .....	55
4.2.7	Dübellöcher als Ausgangspunkte für Schäden .....	55
4.2.8	Beteiligung mehrerer Dübel am Kraftübertrag .....	55
4.2.9	Kammerbeton .....	56
4.3	Einschnittige Verbindungen .....	59
4.4	Zweischchnittige Verbindungen.....	60
<b>5</b>	<b>Vorteilhafte Bambus-Fügeprinzipien .....</b>	<b>61</b>
5.1	Übertragung von Normalkräften.....	61
5.1.1	Einleitung von Druckkräften über Stirnkontakt .....	61
5.1.2	Einleitung von Zugkräften .....	61
5.2	Übertragung von Querkraften.....	63
5.2.1	Rohre vollflächig lagern.....	63
<b>6</b>	<b>Eignung von Bambus für Deckenkonstruktionen.....</b>	<b>64</b>
6.1	Bambushalme als Biegeträger.....	64
6.1.1	Biegebeanspruchung von Bambus .....	64
6.1.2	Querkräfte.....	65
6.1.3	Schubspannungen .....	66
6.1.4	Statische Unwägbarkeiten durch Geometrieabweichungen .....	67
6.2	Referenz-Deckentragwerke.....	67
6.2.1	Bambus-Beton-Verbund.....	68
6.2.2	Nachgiebig verbundene Bambus-Querschnitte .....	71
6.2.3	Laminated Bamboo Lumber (LBL) .....	76
6.3	Bewertung der Referenz-Deckentragwerke.....	80
<b>7</b>	<b>Grundfragen der Vorfertigung von Bambus-Elementen .....</b>	<b>81</b>
7.1	Analogie zum Holzbau.....	82
7.1.1	Pflanzliches Material .....	82
7.1.2	Verarbeitung zum Baumaterial .....	83
7.1.3	Modularer Holztafelbau für Wohnbauten .....	84
7.2	Serialität .....	85
7.2.1	Exakte Reproduzierbarkeit .....	85
7.2.2	Der Modulabschluss.....	87
7.3	Orthogonalität.....	89

7.3.1	Stabachse .....	89
7.3.2	Ideelle Stabachse.....	90
7.3.3	Vom runden Halm zum orthogonalen Tafелеlement .....	91
7.4	Entwicklung eines bambusgerechten Tragwerkmodells.....	93
7.4.1	Fachwerkträger .....	93
7.4.2	Bogen .....	94
7.4.3	Linsenträger .....	95
7.4.4	Seil.....	95
7.4.5	Unterspannter Träger.....	96
<b>8</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>98</b>
8.1	Deckenprüfkörper PK230-4x1 .....	99
8.1.1	Zielsetzung .....	99
8.1.2	Beschreibung.....	99
8.1.3	Belastungstest .....	99
8.2	Deckenprüfkörper PK230-D.....	103
8.2.1	Zielsetzung .....	103
8.2.2	Beschreibung.....	103
8.2.3	Belastungstest .....	105
8.3	Leimverbindung mit Keilzinken .....	109
8.3.1	Zielsetzung .....	109
8.3.2	Beschreibung.....	109
8.3.3	Belastungstest .....	111
8.4	Deckenprüfkörper PK230-U .....	115
8.4.1	Zielsetzung .....	115
8.4.2	Beschreibung.....	115
8.4.3	Belastungstest .....	120
8.5	Leimverbindung zweiseitig PK-GL2 .....	125
8.5.1	Zielsetzung .....	125
8.5.2	Beschreibung.....	125
8.5.3	Belastungstest .....	127
8.6	Leimverbindung einseitig PK-GL1.....	128
8.6.1	Zielsetzung .....	128
8.6.2	Beschreibung.....	128
8.6.3	Belastungstest .....	129
8.7	Deckenprüfkörper PK375-U .....	131
8.7.1	Zielsetzung .....	131
8.7.2	Beschreibung.....	131
8.7.3	Belastungstest .....	133
8.8	Deckenprüfkörper PK400-U .....	136
8.8.1	Zielsetzung .....	136
8.8.2	Beschreibung.....	136
8.8.3	Belastungstest .....	141
<b>9</b>	<b>Vergleich der betrachteten Deckentragwerke.....</b>	<b>154</b>
9.1	Flächenträgheitsmoment .....	154
9.1.1	Effektives Flächenträgheitsmoment .....	154
9.1.2	Eingesetztes Flächenträgheitsmoment der verwendeten Bambusstäbe.....	155
9.1.3	Koeffizient des Flächenträgheitsmoments.....	155

9.1.4	Gegenüberstellung .....	156
9.1.5	Auswertung der Gegenüberstellung .....	159
<b>10</b>	<b>Lasttragende Wandelemente aus Bambus .....</b>	<b>161</b>
10.1	Wand-Typ 1 .....	162
10.2	Wand-Typ 2 .....	162
10.3	Fazit .....	165
<b>11</b>	<b>Konzept einer mehrgeschossigen Bauweise aus Bambus .....</b>	<b>166</b>
11.1	Materialbedarf .....	167
11.1.1	Mindestquerschnitte .....	167
11.1.2	Leichtlehm-Füllkörper .....	169
11.1.3	Benötigte Menge an Bambushalmen .....	170
11.1.4	Verringerung des Holzanteils .....	170
11.2	Fertigung .....	171
11.3	Arbeitsaufwand .....	172
11.3.1	Fertigung der Leichtlehmsteine .....	172
11.3.2	Fertigung der Seilschar und Bambusdruckstäbe .....	173
11.3.3	Montage der Halbfertigteile .....	173
11.3.4	Gesamt-Arbeitsaufwand .....	174
11.4	Transport .....	174
11.4.1	Abmessungen .....	174
11.4.2	Gewicht .....	174
<b>12</b>	<b>Aspekte der Nachhaltigkeit .....</b>	<b>176</b>
12.1	Ökologische Aspekte .....	176
12.1.1	Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	176
12.1.2	Auswirkungen auf Boden und Wasserhaushalt .....	181
12.2	Ökonomische Aspekte .....	182
12.2.1	Materialeffizienz .....	182
12.2.2	Transporteffizienz .....	183
12.2.3	Beanspruchung der Infrastruktur durch Transport schwerer Baumaterialien .....	185
12.2.4	Gewichtseffizienz .....	186
12.2.5	Zeiteffizienz .....	186
12.2.6	Kosteneffizienz .....	186
12.2.7	Flächenertrag und Flächenbedarf für den Bambusanbau .....	188
12.2.8	Gegenüberstellung ökologischer und ökonomischer Aspekte .....	188
12.3	Soziale Aspekte .....	189
12.3.1	Primärenergiebedarf und humanitäre Auswirkungen .....	189
12.3.2	Günstiger Wohnraum .....	189
12.3.3	Einkommen im ländlichen Raum .....	189
12.4	Anwendungsszenario und Ressourcenbedarf .....	191
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>192</b>
13.1	Fazit .....	192
13.2	Ausblick .....	193
<b>14</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>194</b>

14.1	Index der verwendeten Symbole .....	194
14.2	Tabellenverzeichnis .....	195
14.3	Abbildungsverzeichnis .....	196
14.4	Literaturverzeichnis .....	199
14.5	Internetquellen .....	203
14.6	Normen .....	203



# 1 Einleitung

## 1.1 Persönliche Motivation

Nachwachsende Rohstoffe zum Bauen zu verwenden, hat mich seit dem Beginn meiner Tätigkeit am IEK (Institut für Entwerfen und Konstruieren) an der Leibniz Universität Hannover beschäftigt. Das Potenzial dieser altbewährten und umweltfreundlichen Baustoffe hatte mir in meinem Studium niemand nahegebracht, daher versuchte ich mit einem Kollegen so viel Wissen wie möglich in diesem Bereich zusammenzutragen. Verschiedene Seminare wurden von uns in den folgenden Semestern zu diesem Thema angeboten und von den Studierenden mit Begeisterung aufgenommen. Pflanzliche Baustoffe verbinden traditionelle Bauweisen mit innovativen Techniken und bauphysikalische Vorteile mit ressourcenschonendem Umweltschutz.

Im Jahr 2011 brachte ein Student einen freien Entwurf ins Institut, den er als Praktikant im Architekturbüro *Ziegert Roswag Seiler* bearbeitete, und bat mich um Betreuung. Die Aufgabe bezog sich auf den zu realisierenden Entwurf einer Mädchenschule in Pakistan, welche mit geringem technischem Aufwand von ungelernten Helfern aus lokalen Rohstoffen erstellt werden sollte. Infrage kamen die Materialien Bambus und Lehm. Der Entwurf sah die Errichtung von acht Klassenräumen auf zwei Etagen vor. Dafür bedurfte es eines Konstruktionsprinzips für eine Geschossdecke. Ich riet dem Studenten, zunächst zu recherchieren und sich an bekannten Prinzipien zu orientieren: „Versuche nicht das Rad neu zu erfinden, schau erst einmal, was es schon gibt.“ Der gelungene Schulbau von *Anna Heringer* in Bangladesch (zusammen mit *Ziegert Roswag Seiler*) diente ihm als Referenz und so beschäftigte auch ich mich zum ersten Mal mit den Möglichkeiten, eine Geschossdecke aus Bambus zu konstruieren. Das Prinzip der schubsteif verdübelten Trägerebenen schien erprobt, und durch die einfache Fügetechnik der Aufgabenstellung hinreichend zu entsprechen. Wenige Monate später konnte ich erste Fotos von der Baustelle in Pakistan sehen. Das, was mich an der Wiederentdeckung der nachwachsenden Baustoffe in Europa interessierte, sprach mich mit Begeisterung auch bei diesen Bildern aus Asien an (Abb. 1). Damit war das Interesse an Bambus geweckt.

Vom Herbst 2013 an versuchte ich mich selbstständig mit dem Material und seinen Eigentümlichkeiten vertraut zu machen. Ich fragte mich, wie man es ermöglichen könnte, Bambus für die Vorfertigung von Deckenelementen zu verwenden. Bei den Betrachtungen ging ich zunächst von den bekannten Fügeprinzipien der gesehenen Bambuskonstruktion aus, stellte aber nach und nach prinzipielle Mängel in Bezug auf die Vorfertigungsfähigkeit fest. Zahlreiche Prototypen von Decken- und Wandkonstruktionen entstanden daraufhin in der Institutswerkstatt. Ein Teil dieser Entwicklungen wird in dieser Arbeit dargestellt. Daneben hatte ich aber auch hilfreiche Gespräche mit dem in Kolumbien lebenden Zimmermann und Bambus-Baumeister *Jörg Stamm*, der aus einer jahrzehntelangen Erfahrung mit Bambus als Baustoff schöpfen kann und aus traditionellen Konstruktionsweisen eine eigene Regelbauweise für dieses Material entwickelt hat.



Abb. 1: Arbeiten am Schulbau *Tipu Sultan Merkez* in Pakistan 2012 (Ziegert-Roswag-Seiler Architekten, Berlin).

2014 folgte schließlich ein Forschungsaufenthalt in Äthiopien, bei dem ich neben traditionellen Bambusbauten und Fügetechniken auch Projekte von Jörg Stamm besichtigen konnte. Der erste Prototyp eines Deckenelementes nach den in dieser Arbeit formulierten Fügeprinzipien konnte im Maßstab 1:1 in Addis Abeba mit äthiopischen Architekturstudenten gebaut werden. Weitere Versuchselemente, die im Prüfstand des Instituts für Massivbau genauer untersucht werden konnten, entstanden in Hannover.

Welche Dimensionen lassen sich kontrollieren? Wie lassen sich Verbindungen vereinfachen? Wie können welche Kräfte optimal eingeleitet werden? Da sich das technische Zeitalter als notwendiger Bezugsrahmen darstellt, lassen sich die Forderungen der Massenfertigung nicht ausblenden, insofern sind nicht nur einzelne Verbindungen, sondern ganze Elementgruppen von Interesse. Bei den Konstruktionsansätzen hatte ich stets das Ziel vor Augen, den natürlich runden Halm als serienmäßiges Element für ein orthogonales Konstruktionsraster zu verwenden. Viele der Überlegungen dieser Arbeit beschäftigen sich folglich mit geometrischen Belangen. Die Frage: „*Wie kommt das Runde ins Eckige?*“ gewann in diesem Zusammenhang an neuer Bedeutung.

Abgesehen vom Blick auf Konstruktionsdetails und Fügeprinzipien taten sich mir auch grundsätzliche Fragen und Zweifel am aktuellen Berufsbild des Architekten auf. Angesichts der verzweifelten Suche großer Teile der Weltbevölkerung nach einem besseren Leben und hundertmillionenfacher Obdachlosigkeit sollte es nicht die Aufgabe des Baumeisters sein, neue und bestehende Häuser in immer dickere Schichten von Polystyrol-Schaum zu verpacken. In einer Welt, in der ungeahnte Migrationsbewegungen stattfinden, müssen die Begriffe einer „Nachhaltigkeit“ im Sinne der Energie-Einspar-Verordnung wie blanker Hohn erscheinen. Solche Antworten scheitern an der millionenfachen Frage nach Obdach und einem besseren Leben. Zusätzliche Effizienzbestrebungen in den hochindustriellen Staaten lösen dieses Problem nicht, sondern verschärfen das Wohlstandsgefälle und damit Migrationstendenzen noch zusätzlich. Es ergibt sich also ein konkreter Handlungsbedarf, welcher im Folgenden beschrieben wird.



## 1.2 Handlungsbedarf

Bambus als nachwachsender Rohstoff findet in den Regionen seines natürlichen Vorkommens von jeher Anwendung als Baumaterial (Abb. 2). Für die einfachen Bauten der ländlichen Bevölkerung dient Bambus auch heute noch in mannigfacher Weise als günstiger Baustoff. Schätzungen gehen davon aus, dass weltweit mehr als eine Milliarde Menschen in einfachen Häusern aus Bambus leben (1). Abgesehen von Lateinamerika war in den meisten tropischen Ländern bisher der Anteil der ländlichen Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung dominierend (Abb. 3).

Aktuell jedoch durchleben viele Staaten dieses tropisch-subtropischen Gürtels ein dramatisches Bevölkerungswachstum mit einhergehender starker Urbanisierung. Die altbewährten Bambusbauweisen bieten auf diese veränderte Bedarfssituation keine adäquate Antwort mehr. Die traditionell eingeschossige Bambushütte stellt zum mehrgeschossig städtischen Bauen nicht nur typologisch, sondern auch konstruktiv einen Widerspruch dar.

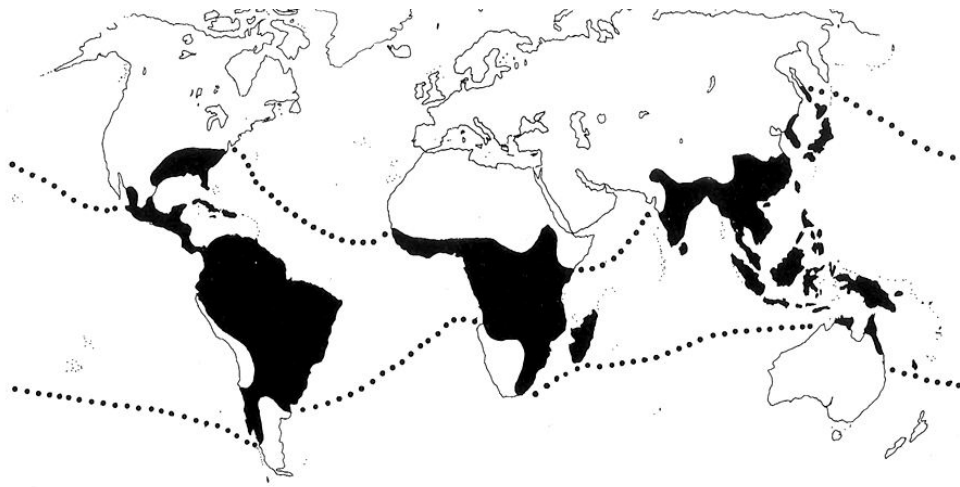


Abb. 2: Weltweite Verbreitungsgebiete von Bambus (Recht; Wetterwald, 1992).

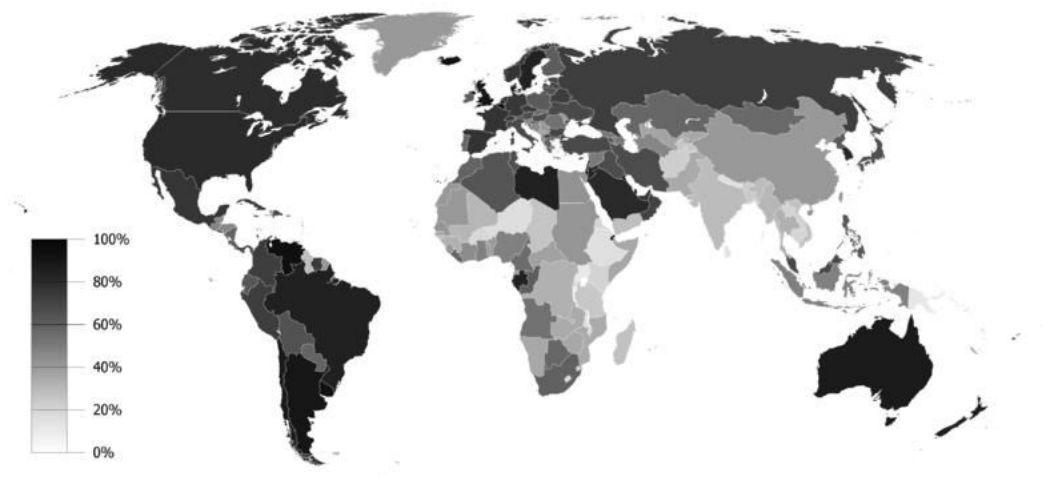


Abb. 3: Anteil der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung, Stand 2015 ([www.landkartenindex.de](http://www.landkartenindex.de)).

Aus diesem Grund wird derzeit in den rasant wachsenden Städten Asiens und Afrikas die Lösung für drängende Hochbauaufgaben fast ausschließlich im Stahlbeton-Skelettbau gesucht. Bei der Errichtung eines mehrgeschossigen Stahlbeton-Skelettbaus werden mehr als

80 % des strukturell notwendigen Betonvolumens zur Erstellung der Deckenplatten verwendet<sup>1</sup>. Dabei ist die Herstellung von Stahlbeton mit enormem Energieaufwand und Klimabelastungen verbunden – die weltweite Zementherstellung (4,3 Mrd. t im Jahr 2014) ist für 6 % des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich. Davon lassen sich knapp zwei Drittel auf die Zementproduktion in China zurückführen (2). China hat in den Jahren 2011 bis 2013 mehr Zement produziert und verbaut, als die USA im gesamten 20. Jahrhundert<sup>2</sup>.

In Indien, wo das Bevölkerungswachstum in der Vergangenheit vor allem im ländlichen Bereich stattgefunden hat, steht die enorme Verstädterung in den kommenden Jahrzehnten noch bevor. Derzeit leben 32,7 % der indischen Gesamtbevölkerung von 1,2 Mrd. in Städten<sup>3</sup>. Dies entspricht knapp 400 Mio. Menschen. Darunter sind 78 Mio. Menschen, denen schon heute adäquater Wohnraum fehlt, sie gelten de facto als obdachlos. Nach Prognosen der UNO<sup>4</sup> wird sich die indische Stadtbevölkerung von 2015 bis 2050 mehr als verdoppeln und um etwa 500 Mio. Menschen anwachsen. Es wird erwartet, dass die starke Verstädterung mit einem leichten Rückgang der Landbevölkerung (Abwanderung) einhergeht. Die enorme Bautätigkeit in China hat die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf zwischen 2002 und 2012 von 24 m<sup>2</sup> auf 32 m<sup>2</sup> gesteigert<sup>5</sup>. Setzt man in Anbetracht dieser Zahlen für die Entwicklung indischer Städte einen durchschnittlichen Wohnflächenbedarf von lediglich 24m<sup>2</sup> pro Person an, so werden in den nächsten 33 Jahren 12 Mrd. m<sup>2</sup> neuer Wohnfläche erforderlich (unter der Voraussetzung, dass keine bestehenden Gebäude in den Städten abgebrochen und neu gebaut werden müssen). Diese Zahl umfasst noch nicht einmal den Flächenbedarf für Infrastruktur, Arbeitsplätze, Schulen, Krankenhäuser etc. Indien allein hat somit einen aktuellen Bedarf an neuer Wohnfläche von 1.000.000 m<sup>2</sup> pro Tag!

Indien mag als ein besonders drastisches Beispiel dienen, doch gibt es vergleichbare Tendenzen in vielen weiteren Ländern in Äquatorial-Afrika und Süd-Ostasien – z.B. in Äthiopien, Kenia, Pakistan, Vietnam, Myanmar, Bangladesch oder auf den Philippinen. Wie werden die Häuser gebaut sein, in denen diese Menschen wohnen werden? Werden sie als eingeschossige Flachbauten die Städte noch weiter in das Umland wachsen lassen, fruchtbares Ackerland vernichten und damit die Infrastrukturkosten und Verkehrsaufkommen weiter steigern? Oder werden sie als Hochhäuser aus den energieintensiven Baustoffen Stahl und Beton errichtet werden?

Hier öffnet sich ein Spannungsfeld zwischen dem dringenden Bedarf, auf der einen Seite eine zunehmende Zahl von Menschen mit städtischem Wohnraum zu versorgen und auf der anderen Seite CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren sowie Ressourcen zu schonen. Dieser Konflikt ist von globalem Ausmaß und kann in seiner Bedeutung sowohl für die Menschen in den betreffenden Regionen als auch für die Menschheit als Ganzes nur erahnt werden. Bambus als schnell nachwachsenden und CO<sub>2</sub>-bindenden Rohstoff für diese drängenden Hochbauaufgaben zu verwenden, könnte eine Möglichkeit darstellen, einen Ausweg aus dem Konflikt zu finden.

---

<sup>1</sup> Beispielrechnung: Gebäude 15 x 30 m, Stützweiten 5 m x 5 m (28 Stützen 0,3 m x 0,3 m x 2,8 m) Decke h = 0,2 m. Je Etage: Deckenvolumen = 90 m<sup>3</sup>; Stützensvolumen = 7 m<sup>3</sup>; Fundamentvolumen ca. 7 m<sup>3</sup>. Deckenanteil = 87 %.

<sup>2</sup> USGS (United States Geological Survey) Cement Statistics 1901 – 2012; USGS Mineral Industry of China 1990 – 2013.

<sup>3</sup> The World Factbook, Central Intelligence Agency, 2015

<sup>4</sup> UNFPA, 2007 (52)

<sup>5</sup> Zum Vergleich: In Deutschland betrug 2013 die durchschnittliche Wohnfläche 46 m<sup>2</sup> pro Person. (www.statista.com)

### 1.3 Warum Bambus?

Je weiter die Industrialisierung der so genannten „Entwicklungsländer“ fortschreitet, desto stärker wird der kulturelle Druck auf das traditionell bewährte Material Bambus. Industriell gefertigte Baustoffe wie Zement oder Stahl drängen die Bedeutung von Bambus stetig zurück. Die neuen Materialien gelten als modern, fortschrittlich und prestigeträchtig. Höhere Kosten einer Stahlbetonkonstruktion werden nicht zuletzt als Investition in sozialen Status angesehen, da das günstige und vermeintlich minderwertige Naturmaterial Bambus als „Armeute-Baustoff“ gilt. Damit heftet sich das Stigma eines rückständigen und minderwertigen Materials an diesen so vielseitigen Baustoff<sup>6</sup>. Bambus verwendet man – so die verbreitete Meinung – nur noch, weil man sich moderne Baustoffe nicht leisten kann (Abb. 4).



Abb. 4: Fortschritt und Urbanisierung – eine Frage des Baustoffs?

Neue Hochhäuser aus Stahlbeton in Kalkutta (Indien 2016) und Addis Abeba (Äthiopien 2014) (oben).

Ärmliche Hütten aus Bambus an einer Landstraße in West-Bengalen und im Hochland von Abessinien (unten).

In seiner Bedeutung für die Entwicklung regionaler Baukulturen des tropisch-subtropischen Gürtels ist Bambus mit der Bedeutung von Holz für die gemäßigten und kühleren Zonen vergleichbar. Hier liegt es nahe, eine Parallele zwischen beiden Baustoffen zu ziehen und die Unterschiede im Stand der Forschung und Technik zu bewerten.

Wo liegen die Gründe für den Erfolg des industriellen Holzbaus und wo liegen die unentwickelten Potenziale von Bambus? Blickt man auf die Entwicklung des Holzbaus der vergangenen Jahrzehnte zurück, so werden die Standardisierung des Baustoffs Holz und die

<sup>6</sup> Bezeichnenderweise wird ein Großteil der Bambusernte in China zur Herstellung von Bambus-Werkstoffplatten verwendet, welche vor allem als Schalung für Stahlbeton-Konstruktionen zum Einsatz kommen (54).

Rationalisierung der Bauprozesse als Wegbereiter für den heutigen Stand der Holzbautechnik erkennbar. Ein hoher Vorfertigungsgrad, schnelle Bauabläufe und eine vorzügliche Ökobilanz zeichnen Holz gegenüber anderen Baustoffen aus. Vor diesem Hintergrund ist auch die jüngste Entwicklung zu sehen, Bauten mit mehr als zehn Geschossen in tragender Holzkonstruktion zu errichten. Das Entstehen eines gesellschaftlichen Bewusstseins für ökologisch nachhaltige Prozesse und die daraus resultierende Nachfrage nach eben solchen Produkten befördern den wirtschaftlichen Erfolg des Baustoffs Holz. Ein wachsendes Angebot technischer Lösungen im rationellen Holzbau auf der einen Seite und eine wachsende Nachfrage und Wertschätzung ökologischer Materialien auf der anderen Seite sind also die treibenden Kräfte für den Fortschritt des modernen Holzbaus.

Auf die Bambusbauweise übertragen fehlen zurzeit beide der hier genannten Entwicklungen: Weder wird in den aktuellen Konstruktionsprinzipien die Leistungsfähigkeit von Bambus ausgeschöpft, noch existiert eine nennenswerte Nachfrage nach Bambusbauten, welche in ihrer Qualität über traditionelle Hütten hinausgehen.

Es stellt sich nun die Grundfrage aller Marktdynamik: erzeugt das Angebot die Nachfrage oder muss erst eine Nachfrage vorhanden sein, um ein entsprechendes Angebot zu erzeugen? Beide Kausalitäten können hier zutreffen. Man darf davon ausgehen, dass in Zukunft die Nachfrage nach ökologischen Bauprodukten auch in den einstigen Entwicklungsländern steigen wird, da durch zunehmende mediale Vernetzung das Bewusstsein für derartige Themen geschärft wird. Die Auswirkungen von Ressourcenraubbau und Klimawandel werden, aller Voraussicht nach, in den subtropischen Zonen noch gravierend zunehmen. Dies wird die Forderung nach einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung zusätzlich erhöhen. Ein energieintensives und nichtregeneratives Wachstumsmodell nach altem Muster wird sich in Zukunft schwer wiederholen lassen. Auf der anderen Seite ist darauf hinzuwirken, dass sich die technischen Möglichkeiten der Bambuskonstruktion durch Forschung erweitern und somit ein breiteres Angebot bilden werden. Leistungsfähigere Bambuskonstruktionen werden zu hochwertigeren Bauten führen, was wiederum durch Vorbildfunktion die Wertschätzung des Materials (und damit auch die Nachfrage) steigern wird.

Vom Standpunkt des Ingenieurs aus ergeben sich folgende Möglichkeiten, die Entwicklung von beiden Seiten aus zu beeinflussen:

- Auf der Seite des Angebots kann der Einfluss unmittelbar durch die Entwicklung und Erweiterung technischer Möglichkeiten wirken.
- Auf der Seite der Nachfrage kann mittelbar durch überzeugende und vorbildliche Bambuskonstruktionen gewirkt werden.

Aus dem Vermögen, die Entwicklung zu beeinflussen, erwächst dem Ingenieur eine spezielle Verantwortung: Es gilt, die Möglichkeiten der Bambuskonstruktion zu erweitern, Potenziale zu erkennen und diese zu erschließen. Die aktuelle Nachhaltigkeitsdiskussion macht uns zu Zeugen einer Entwicklung, die dem Stahlbeton den Nimbus der Fortschrittlichkeit nimmt. Stahl- und Zementproduktion verkörpern technisch das Zeitalter fossiler Brennstoffverschwendung. Diese epochale Chance, einen stark klimabelastenden und energieintensiven Baustoff, durch einen regenerativen Baustoff mit positiver CO<sub>2</sub>-Bilanz partiell zu ersetzen, sollte nicht versäumt werden.

Kommt das Gespräch mit Architekten, Ingenieuren oder Laien auf das Thema Bambuskonstruktion, so sind den Gesprächspartnern mit hoher Wahrscheinlichkeit die „unglaublichen“ Bambusgerüste von Hochhausbaustellen Süd-Ostasiens bekannt. Daran schließt sich aber oft die skeptische Frage an, ob denn mit Bambus auch „richtige“ Häuser gebaut werden können. Die enorme Leistungsfähigkeit von Bambus als Material ist für den Betrachter deutlich sichtbar und doch ist es erstaunlich, dass die mehrgeschossige Bauweise mit Bambus sich bisher kaum oder gar nicht durchgesetzt hat. Der Grund hierfür muss in fehlender Standardisierung von Bambus als Bauprodukt und im Mangel bisheriger Bambusdeckenkonstruktionen zu suchen sein, denn für die Verwendung in lasttragenden Wänden oder Stützen ist Bambus aufgrund seiner röhrenförmigen Geometrie und enormen Druckfestigkeit durchaus geeignet.

## **1.4 Zielsetzung**

Das Anliegen dieser Arbeit ist es, Bambus hinsichtlich seiner natürlichen Streuung zu betrachten und daraus Folgerungen für die bambusgerechten Prinzipien einer vorzufertigenden Deckenkonstruktion zu ziehen.

In vielen bisherigen Forschungsarbeiten und Konstruktionsvorschlägen finden sich Annahmen, die der Natur von Bambus nicht entsprechen: Oft wird die Pflanze als ein kreisrundes Rohr dargestellt, das einen definierten Durchmesser und eine bestimmte Wanddicke besitzt. Fertignoten mit passendem Innengewinde werden dafür entwickelt, die jedoch auf abweichende Geometrie als einzige Antwort die entsprechende Vorauswahl der Halme kennen. Kraft- und formschlüssige Fittings werden erdacht, die auf einen exakten Innendurchmesser ausgelegt sind, den es in der Natur kaum zweimal am gleichen Halm gibt. Theoretische Scherfestigkeiten werden angesetzt, ohne zu berücksichtigen, dass Längs- und Trocknungsrisse jederzeit zum plötzlichen Versagen des Faserverbunds führen können.

Die grundsätzlichen Eigenschaften vieler Bambusarten sind bereits weitestgehend festgestellt worden. Hierüber ist in den letzten 70 Jahren umfänglich geforscht worden. In konstruktiver Hinsicht sind jedoch bislang nicht die richtigen Schlussfolgerungen daraus gezogen worden. Es erscheint vor diesem Hintergrund angezeigt, zu Beginn einige dieser Erkenntnisse als Voraussetzung noch einmal kurz anzuführen, um hieraus die weiteren Schritte zu entwickeln.

Im Rahmen dieser Arbeit soll der Versuch unternommen werden, den Zusammenhang von mikro- und makrostrukturellen Gegebenheiten der Bambuspflanze aufzuzeigen, um daraus entsprechende Folgerungen für die Konstruktion von vorzufertigenden Deckenelementen abzuleiten. Um ein überschaubares und anwendungsnahes Entwicklungsgebiet abzugrenzen, sollen folgende Parameter der zu entwickelnden Geschossdecke als Zielgrößen festgelegt werden:

### **Bauteil**

Die Entwicklung soll sich auf Geschossdecken beschränken, deren einachsiger Lastabtrag dem statischen System eines Einfeldträgers entspricht.

### **Materialien**

Einsatz von Bambus oder anderer nachwachsender und ressourcenschonender Materialien. Energie- und CO<sub>2</sub>-intensive Materialien wie Zement oder Stahl sollen vermieden werden.

## Eigengewicht

Zur Reduzierung der Schwingungsanfälligkeit soll das Eigengewicht der Konstruktion eine Mindestgröße haben von  $g > 2 \text{ kN/m}^2$ . Schallschutzbelange sind von der Deckenkonstruktion nicht loszulösen.

## Nutzlast

Aus Gründen der Vereinfachung und breiteren Anwendbarkeit wird eine Nutzlast von  $p = 5 \text{ kN/m}^2$  angesetzt. Diese beinhaltet bereits Zuschläge für etwaige leichte Trennwände.

## Spannweite

Für Wohn- und Büro Zwecke wird von einer Spannweite von  $l = 4 \text{ m}$  ausgegangen. Innerhalb dieser Spannweiten lassen sich die meisten Funktionen ohne Probleme organisieren. Räume mit größeren Abmessungen können sich quer zur Spannrichtung ausdehnen. Bei maximalen Seitenverhältnissen des Raumes von 2 : 1 werden Raumgrößen von bis zu  $32 \text{ m}^2$  erreicht.

## Maximale Verformung

Unter der Voraussetzung, dass Verformungen aus Eigenlasten durch Überhöhung der Konstruktion ausgeglichen werden können, ist zunächst die Verformung unter Nutzlast von Interesse. Je 1 m Deckenstreifenbreite wirken in Feldmitte als maximales Moment aus Nutzlast:  $M_{\max} = 10 \text{ kNm}$ . Zur Begrenzung der Verformung ( $f < l/300$ ) ist folglich<sup>7</sup> ein wirksames Flächenträgheitsmoment erforderlich von:  $I_{\text{erf}} = 8.320 \text{ cm}^4$ .

## Fertigungsweise

Es sollen Deckenelemente mit exakten Abmessungen als Fertig- oder Halbfertigteile vorgefertigt werden, welche in einer Tafelbauweise Einsatz finden können.

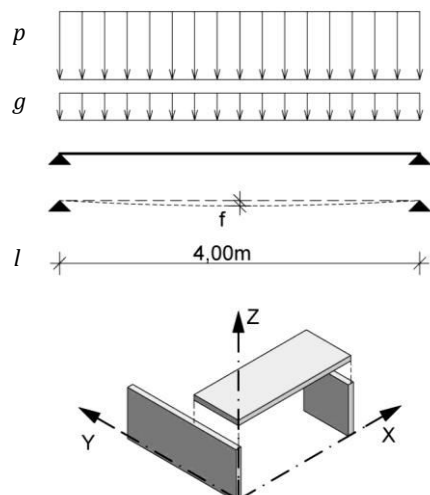
Bauteil:	Geschossdecke	
Statisches System:	Einfeldträger	
Spannweite:	$l = 4 \text{ m}$	
Nutzlast:	$p = 5 \text{ kN/m}^2$	
Eigengewicht:	$g > 2 \text{ kN/m}^2$	
Maximale Verformung:	$f < l/300$ aus Nutzlast	
Baustoffe:	Bambus ggf. andere nachwachsende Rohstoffe	
Konstruktionsweise:	Tafelbauweise, vorgefertigt orthogonales Konstruktionsraster	

Abb. 5: Übersicht der Zielgrößen.

<sup>7</sup> Erforderliches Flächenträgheitsmoment:  $I_{\text{erf}} = M \cdot l \cdot a = 10 \text{ [kNm]} \cdot 4 \text{ [m]} \cdot 208 = 8.320 \text{ cm}^4$ .  
Für Holz  $a = 313$  (E-Modul 10 GPa); für Bambus  $a = 208$  (E-Modul 15 GPa) vgl. Tab. 21.

## 1.5 Methodik

Um zu einer bambusgerechten Konstruktionsweise für vorgefertigte Geschossdecken zu gelangen, soll in einem mehrstufigen Erkenntnisprozess vorgegangen werden. Der Betrachtung von Material und Anwendungsfeld soll sich eine Bewertung der Befunde anschließen, aus welcher eine Hypothese für entsprechend optimierte Füge- und Fertigungstechniken entwickelt wird. Grund hierfür ist die Annahme, dass sich aus der Betrachtung der materialinhärenten Qualitäten die geeigneten Fügeprinzipien und Fertigungsschritte konsequent ableiten lassen. Begleitende experimentelle Untersuchungen überprüfen diese Hypothese. Die Formulierung eines Konzepts für entsprechend optimierte Deckenkonstruktionen stellt die Zielsetzung dieser Arbeit dar. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Methodik (Abb. 6):

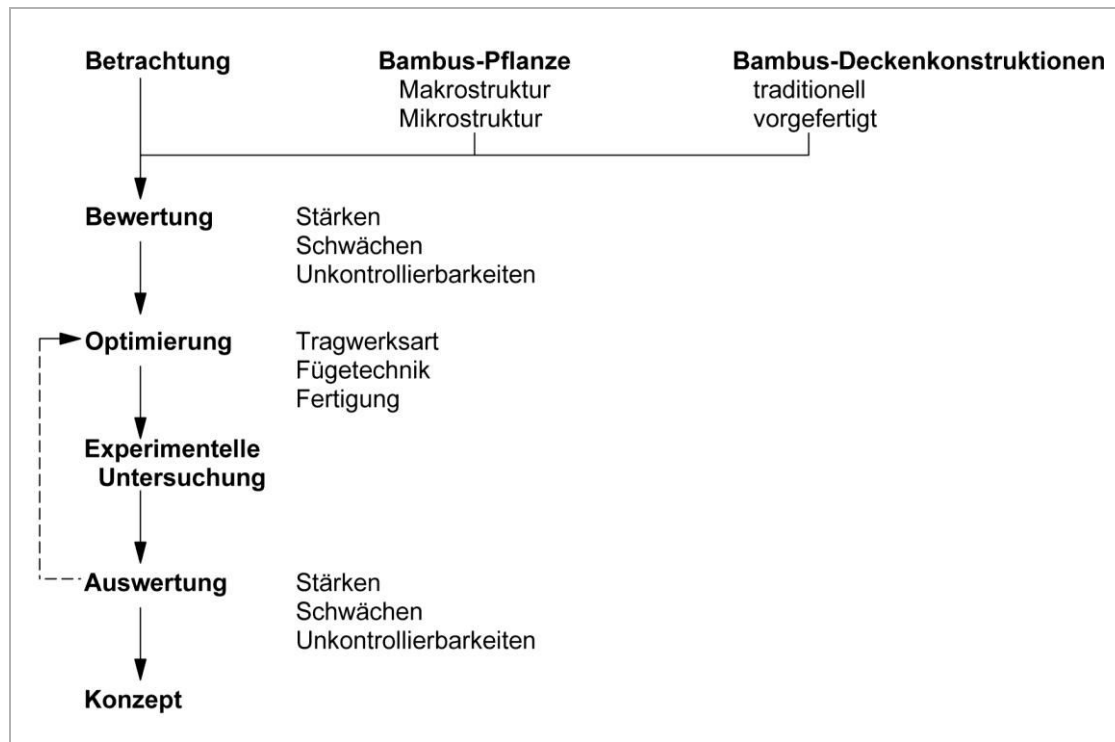


Abb. 6: Methodik für die Annäherung an ein Konstruktions-Konzept für eine vorgefertigte Geschossdecke aus Bambus.

### Betrachtung

Es sollen folgende zwei Haupt-Themenfelder betrachtet werden:

1. **Das Material**  
Die Bambus-Pflanze mit ihren makro- und mikrostrukturellen Eigenschaften.
2. **Die Anwendung**  
Bestehende Ansätze für die Konstruktion von Bambus-Geschossdecken in traditioneller und in vorgefertigter Art.

### Bewertung

Die betrachteten Themenfelder werden hinsichtlich ihrer strukturellen Stärken und Schwächen bewertet. Darüber hinaus werden vorhandene Unkontrollierbarkeiten des Bambusmaterials, welche Auswirkungen auf den Prozess der angestrebten Vorfertigung haben könnten, benannt.

### **Optimierung**

Aus der Bewertung folgt die Formulierung eines Vorschlags (einer Hypothese) zur Optimierung von Tragwerkssystematik, Lasteinleitung und Fügechnik vorzufertigender Geschossdecken aus Bambus.

### **Experimentelle Untersuchung**

Die Optimierungsansätze sollen in begleitenden Versuchen teilweise oder vollständig abgebildet und überprüft werden, um das tatsächliche Potenzial des Optimierungsvorschlags zu verdeutlichen. Die Größe der Modelluntersuchung richtet sich dabei nach dem Betrachtungsmaßstab und kann vom reinen Fügeprinzip bis hin zum vollständigen Deckenmodell reichen.

### **Auswertung**

Die Auswertung der Versuche soll die vorangegangene Hypothese entweder bestätigen oder bestehende Mängel aufzeigen. Nötigenfalls ist mit weiterer Optimierung zu reagieren, bis schließlich eine zufriedenstellende Lösung als Konzept vorgetragen werden kann.

### **Konzept**

Das angestrebte Konzept soll eine vorfertigbare Deckenkonstruktion aus Bambus darstellen, welche optimiert ist in Bezug auf:

1. **Das Material** und dessen angemessene Verwendung. Fügeprinzipien, und Tragwerkssystematiken sollen den makro- und mikrostrukturellen Eigenschaften der Bambuspflanze Rechnung tragen.
2. **Die Anwendung** als vorfertigbare Deckenkonstruktion mit ihren relevanten Funktionsparametern: Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Materialeinsatz, und Fertigungsaufwand.

Am Ende eines Themenabschnitts folgt jeweils ein Fazit:

⇒ *Schlussfolgerungen, welche für die Entwicklung der Arbeit relevant sind, werden in Leitsätzen zusammengefasst.*



## 2 Bambus-Charakteristika

Die Kenntnis über Entstehung und Eigenart eines Baustoffs bildet die Grundlage für dessen adäquate Verwendung. Da Bambus nicht speziell für eine Bauanwendung hergestellt wird, sondern natürlich wächst, stellt das Verständnis der pflanzlichen Morphologie die Voraussetzung für jegliche strukturelle Anwendung dar.

### 2.1 Verständnis des Habitus

Unterfamilie	Name des Tribus	Anzahl der Gattungen	Anzahl der Arten
Bambusoideae	Arundinariae verholzende Gräser der gemäßigten Zonen	27	533
	Bambuseae verholzende Gräser der tropischen Zonen	65	784
	Olyrae nicht verholzende Gräser (krautartig)	21	122
	Summe	113	1.439

Abb. 7: Taxonomische Einordnung von Bambus.

Weltweit sind bisher über 1400 Bambusarten<sup>8</sup> bestimmt worden (Abb. 7), von denen zu Bauzwecken die jeweils lokal verfügbaren und geeigneten Bambusarten verwendet werden. Die Unterfamilie *Bambusoideae* gehört der Familie der Süßgräser an und gliedert sich in der biologischen Systematik in drei Stämme. Von diesen ist der Tribus der *Olyrae* nicht zum Bauen geeignet, da diese Arten nicht verholzen und somit keine genügende Druckfestigkeit besitzen. Auch von den anderen beiden Stämmen *Bambuseae* und *Arundinariae* sind nicht alle Arten zu Bauzwecken verwendbar, da viele nur sehr klein und schlank, andere wiederum eigenwillig krumm wachsen.

Da sie sich in der Morphologie zum Teil stark voneinander unterscheiden, können an dieser Stelle keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Die folgenden Ausführungen gelten aber prinzipiell für die Mehrzahl der wichtigsten zum Bauen verwendeten Vertreter.

#### 2.1.1 Besondere Herausforderungen natürlicher Baustoffe

Jedes Material, das die Menschheit nutzt, stammt in irgendeiner Form aus der Natur. Die große Mehrheit der am Bau verwendeten Materialien ist zwar natürlichen Ursprungs, wurde jedoch nach der Gewinnung des Grundstoffs auf mehr oder weniger starke Weise aufbereitet.

Die Zwecke der Aufbereitung sind so mannigfaltig, wie die Bauprodukte selbst, doch stehen die Verlässlichkeit der gewünschten Baustoffparameter, Regelmäßigkeit und Normkonformität über allen anderen.

<sup>8</sup> Quelle: USDA (United States Department of Agriculture) GRIN (Germplasm Resources Information Network) <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/family.pl?1465>; Online-Information aufgerufen am 30.08.2015

Der Kulturanalytiker Friedrich Georg Jünger<sup>9</sup> benannte den Charakter des technischen Produkts folgendermaßen:

*„Das Kennzeichen des technischen Markenartikels ist nicht seine Güte, sondern seine mechanische Gleichförmigkeit.“ (3)*

Dies lässt sich besonders an der Herstellung standardisierter Fertigwaren beobachten, welche zum Großteil auf dem Grundsatz von Zerkleinerung und anschließender homogenisierter Addition beruht. Durch das Zerteilen werden etwaige Unterschiede gleichmäßig gestreut und heben sich in der Summe annähernd auf. Anschließend werden die Bruchstücke unter kontrollierten Bedingungen wieder planmäßig zusammengesetzt. In dieser Art der Homogenisierung können selbst größte Unterschiede in Form und Grundsubstanz eingeebnet werden<sup>10</sup>. Eigenschaften können durch entsprechende Rezepturen exakt eingestellt, Reststoffe oder Recyclingmaterial können oft mit eingearbeitet werden. In einem Umfeld, in dem die technische Ebenmäßigkeit eine große Rolle spielt, sind diese Fertigungsprinzipien daher dominierend, auch wenn sie stets mit einem Mehraufwand an Prozessenergie und Bindemitteln einhergehen.

Je weniger jedoch ein von der Natur gegebener Stoff aufgearbeitet wird, desto stärker treten die mannigfaltigen Eigenarten der Naturform in den Vordergrund und desto größer ist auch die Streuung in den vorliegenden Materialeigenschaften. Normung und Standardisierung sind dem Wesen der Natur fremd. Kein Baum wächst wie der andere, selbst wenn es genetische Zwillinge sind. Kein Stein gleicht dem andern, auch wenn sie aus demselben Fels geschürft werden. Eine gewisse Vergleichbarkeit der gewonnenen Naturmaterialien kann mithin nur durch anschließende Sortierung erreicht werden. Das Scheitern mechanisierter Arbeitsmethoden im Umgang mit organischen Formen der Natur, hat der Architekturhistoriker *Sigfried Giedion*<sup>11</sup> am düsteren Beispiel der Fleischverarbeitung in Chicagos Schlachthöfen beschrieben. Ungeachtet aller technischen Anstrengungen bleibt auf diesem Gebiet bis heute die Handarbeit des Menschen erforderlich:

*„Wie wir dies bei der Entstehung der Bandproduktion andeuteten, ist eine komplizierte, organische Substanz mit ihren Zufälligkeiten, ihren wechselnden, leicht verletzbaren Strukturen, doch etwas anderes als ein Stück amorphes Eisen. (...) Vom historischen Gesichtspunkt aus ist dieser erste Zusammenstoß zwischen Mechanisierung und hochentwickelter organischer Substanz weit interessanter, als vom technologischen. Wie bewältigt man die unberechenbaren Zufälligkeiten, die die Natur hervorbringt, mit mechanischen Vorrichtungen? Dies etwa ist das Problem. Es sei gleich vorweggenommen: Der Ingenieur ist in diesem Falle nicht Sieger geblieben.“ (4)*

Ob der verarbeitete Organismus pflanzlichen oder tierischen Ursprungs ist, ist an dieser Stelle zweitrangig – für die technische Erfassung und anschließende maschinelle Verwertung stellen

---

<sup>9</sup> Friedrich Georg Jünger (1898 – 1977), geboren in Hannover, formulierte in seinem 1946 erschienenen Buch *„Die Perfektion der Technik“* eine fundamentale Kritik am Wesen der Technik, welche maßgeblichen Einfluss auf die spätere Diskussion um ökologische Nachhaltigkeit hatte.

<sup>10</sup> Dieses Prinzip gilt nicht nur für die meisten Bauprodukte wie Glas, Stahl, Ziegel, Kunststoffe, Holzwerkstoffe, Beton oder andere Konglomerate, sondern auch für Konsumgüter wie Papier, Brot, oder Fischstäbchen.

<sup>11</sup> *Sigfried Giedion* (1888 – 1968), Maschinenbauer, Kunsthistoriker und Mitbegründer des *Congrès Internationaux d'Architecture Moderne* (CIAM).

die fein differenzierten Gewebeanlagen der belebten Natur mit ihren unzähligen Varianten ein besonderes Hindernis dar. Diese Tatsache deutet auf einen fundamentalen Mangel zweckgerichteter Methoden im Umgang mit komplexen Sachverhalten hin.

Der Blick auf die maschinelle Gewinnung von Bauholz macht die beschriebene Schwäche deutlich: Runde Baumstämme werden in längliche Streifen mit orthogonalem Querschnitt zersägt, bei dieser linearen Operation wird der natürlich variierende Faserverlauf der Pflanze unvermeidlich verletzt. Schon eine geringe Differenz zwischen Schnitt- und Faserrichtung führt daher zu einer reduzierten Festigkeit des gewonnenen Balkens. Besonders deutlich wird dies im Bereich von Astlöchern. Für die Struktur des Stammes stellen abgehende Äste zweifellos eine Störung des lamellaren Faserverlaufes dar. Die „fließende“ Art, in der der Baum die Fasern um das Astloch herumführt, vermeidet jedoch Spannungsspitzen, wie der Bioniker Claus Mattheck<sup>12</sup> nachgewiesen hat (5). Zu einem gravierenden Schwachpunkt im Holz wird das Astloch erst, wenn dieser harmonische Faserfluss durch den linearen Schnitt zerstört wird. Die höchste Zugfestigkeit weist folglich unverletztes Rundholz auf. Auch neue, digitale Technologien können bisher nur in der Sortierung unterstützen. Das anschließende Einteilen von Schnittholz in Sortierklassen stellt unter diesem Blickwinkel eine Bewertung der maschinell zugefügten Holzschädigung dar. Einen „schlecht gewachsenen“ Baum gibt es nicht. Habitus und Festigkeit der Pflanze sind (abgesehen von Erkrankungen) natürlich optimiert. Eine minderwertige Sortierklasse verweist daher nicht primär auf einen vorhandenen Mangel beim Baum, sondern bei der Verarbeitungsmethode.

Was für die Gewinnung und Verwendung des Baustoffs Holz gilt, gilt ebenso für Bambus. Der Versuch, Eigentümlichkeiten der Substanz zu negieren, um das Material einem bestimmten Verfahren zu unterwerfen, muss im Ergebnis zu qualitativen Nachteilen führen. Nur wenn sich die Arbeitsweise an die zu bearbeitende Substanz anpasst, können die immanenten Qualitäten zur Geltung gelangen. Der Habitus, als Abbild der inneren und äußeren formgebenden Faktoren weist uns auf diese Qualitäten hin, denn er ist gleichsam der Spiegel der Wesensmerkmale der Pflanze und ihrer Umgebung.

⇒ *Das Konstruieren mit technisch wenig aufbereiteten Bambushalmen setzt ein elementares Verständnis der natürlichen Form der Pflanze voraus.*

### **2.1.2 Gestalt als Antwort auf innere und äußere Faktoren**

Wie alle Objekte, die dem Wind ausgesetzt sind, erfahren Pflanzen in der Natur Windlasten. Um diesen zu widerstehen, müssen Kräfte in den Boden abgeleitet werden. Ein Bambushalm kann, ebenso wie ein Baum, statisch als „eingespannter Stab“ angesehen werden. An seinem oberen Bereich (Krone oder Blattwerk) können neben vertikalen Eigenlasten auch horizontale Windlasten angreifen. Dies führt dazu, dass zur Basis hin der Betrag der Querkraft und des Biegemoments anwächst und am Wurzelhals sein Maximum erreicht (Abb. 8). Claus Mattheck hat zum natürlichen Wachstum von Bäumen umfangreich geforscht und festgestellt, dass Bäume auf mechanische Spannungen mit Materialanlagerung reagieren, wodurch gefährliche Spannungsspitzen vermieden werden. Dies lässt sich z.B. an den Jahresringen von Bäumen ablesen, die der Hauptwindrichtung entsprechend stets dicker ausgebildet werden.

---

<sup>12</sup> Claus Mattheck, Vordenker der Bionik, Professor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

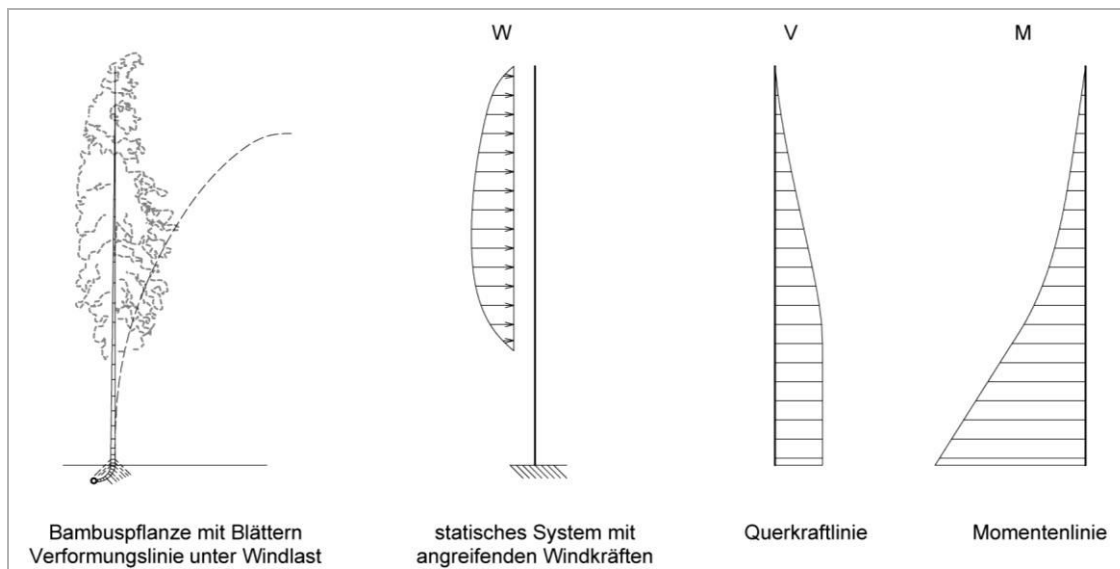


Abb. 8: Statisches System und Schnittgrößen des lebenden Bambushalmes.

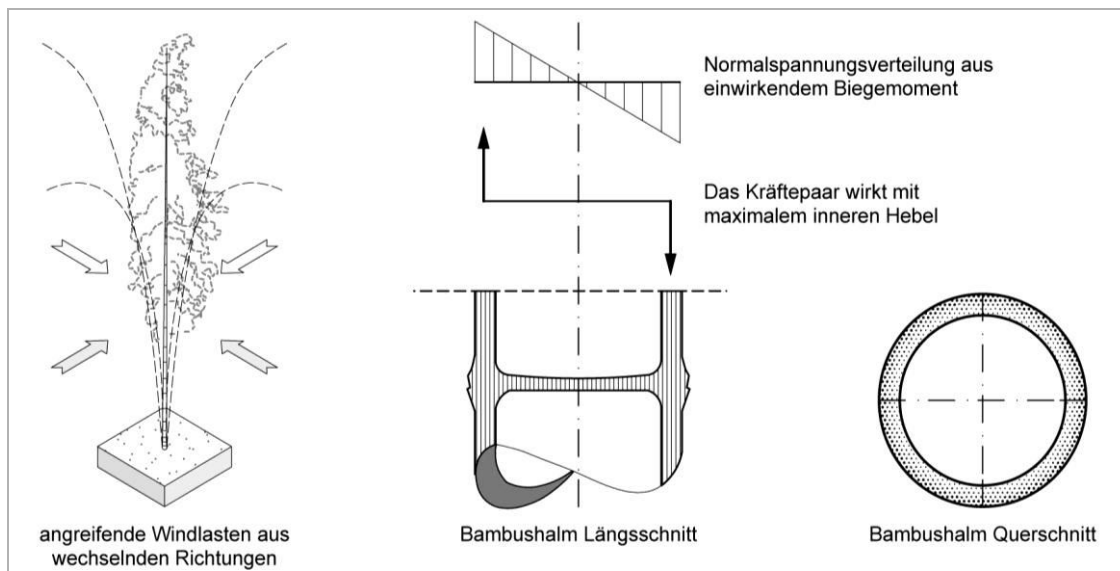


Abb. 9: Der ringförmige Querschnitt eines Bambushalmes ist für seine natürliche Belastungssituation optimiert.

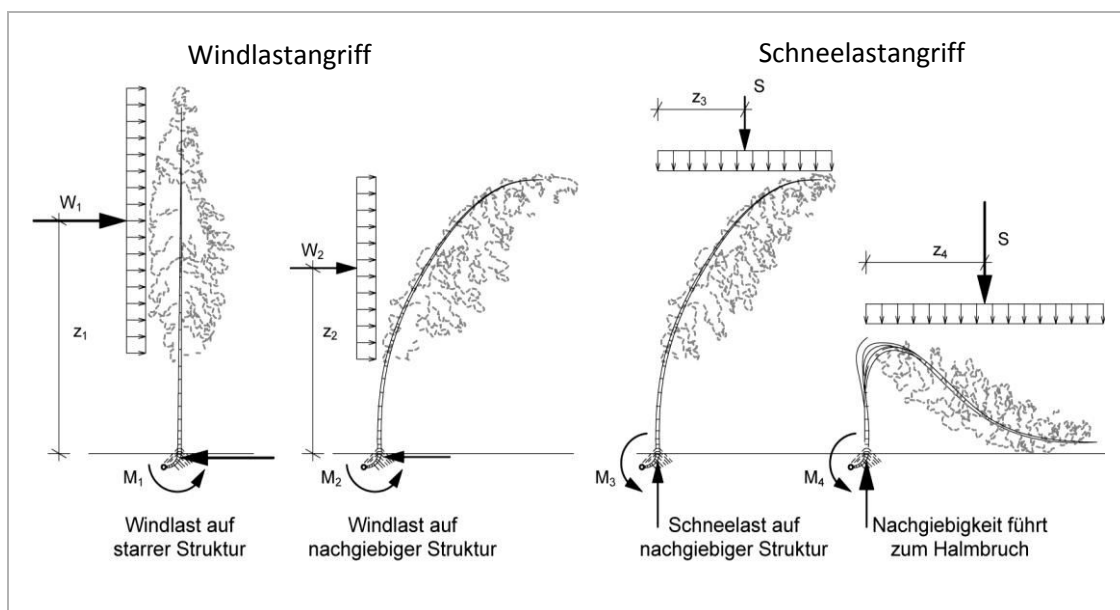


Abb. 10: Das flexible Ausweichen der Bambuspflanze kann Belastungen verringern aber auch verstärken.

Bei kontinuierlicher Festigkeit des Materials, reagiert der Baum auf höhere Belastungen mit einer Vergrößerung der Querschnittsfläche. Material wird also speziell dort angelagert, wo es benötigt wird. Das hieraus abgeleitete Grundprinzip natürlichen Leichtbaus von Bäumen ist das Axiom der konstanten Spannung (5).

Im Gegensatz zu den von Mattheck untersuchten Bäumen besitzt Bambus als Gras kein sekundäres Breitenwachstum. Dennoch kann die Pflanze im Laufe der Zeit durch Stärkung der Leitbündel und unterschiedliche Einlagerung von Lignin und Silikaten ebenfalls bestimmte Bereiche stärken. Es wird aber nicht an den belasteten Stellen die Querschnittsfläche vergrößert, sondern die Festigkeit pro Flächeneinheit. Das Axiom der konstanten Spannung gilt also *nicht* für Bambus. Dies führt dazu, dass Bambus – im Gegensatz zu Holz – sehr unterschiedliche Materialfestigkeiten aufweist. Anders als bei Holz, wo für bestimmte Holzarten charakteristische Festigkeiten angegeben werden können, variieren bei Bambus die Festigkeiten des Materials schon innerhalb eines einzelnen Halmes zwischen Spitze und Ansatz, Außen- und Innenseite enorm.

⇒ *Aus den Schnittgrößen des eingespannten Stabes resultieren Festigkeit und Querschnittsfläche im Halm, welche sich über die Länge des Halmes charakteristisch verändern.*

Diese Tatsache bildet die wichtigste Grundlage für die weitere Betrachtung zur Eignung von Bambus als Baustoff und es wird im Laufe dieser Arbeit an verschiedenen Stellen auf sie zurückverwiesen werden.

### **2.1.3 Flexibilität und Schlankheit als Überlebensstrategie bestimmter Klimazonen**

Im Kampf um Licht und Lebensraum liegt es im Wesen der meisten Pflanzen, sowohl die sonnenbestrahlte Blattoberfläche als auch die absolute Höhe zu maximieren. Bei Sturm droht jedoch aufgrund des stark anwachsenden Biegemoments die Zerstörung der Pflanze. Entweder durch Entwurzelung oder durch Bruch des Stammes. Welche Strategien des Überlebens ergeben sich für eine Pflanze aus diesem natürlichen Spannungsfeld?

1. Maximale Steifigkeit
2. Maximale Flexibilität

Dem Wind zu trotzen bedeutet, große Steifigkeit zu entwickeln. Ein mächtiger Stammumfang und mächtiges Wurzelwerk sind dafür vonnöten. Dies führen große Laubbäume anschaulich vor Augen. Was aber der Baum ins Breitenwachstum investiert, kann er nicht für das Längenwachstum verwenden. Ein entsprechend langsames Wachstum ist der hohe Preis für diese Strategie der maximalen Steifigkeit im Streben zum Licht. Bambus hingegen wächst enorm schnell in die Höhe, obwohl – oder gerade weil – Gras kein sekundäres Breitenwachstum besitzt. Der Halm ist hohl, Material wird nur am Rand eingesetzt, wo es effizient seine Wirkung entfalten kann (Abb. 9). In wenigen Monaten wachsen die Halme so auf 10 bis 20 oder gar 30 Meter Höhe heran. Aufgrund der Flexibilität im oberen Halmbereich widersteht die Pflanze dennoch stärksten Winden. Abb. 10 zeigt einen Bambushalm mit Wind- bzw. Schneelastangriff. Unter diesen Belastungen erfährt der Halm jeweils ein Biegemoment und verformt sich infolgedessen elastisch.

- **Windlast:** Die Größe des Biegemoments ( $M_1$ ) ist dabei das Produkt aus der Hebellänge ( $z_1$ ) und der Windlast ( $W_1$ ), welche sich aus der angeströmten Fläche ergibt. Durch das Ausweichen verringert sich zum einen die Windangriffsfläche und damit die Windlast ( $W_2$ ), zum anderen aber auch der Hebel ( $z_2$ ) der horizontal angreifenden Windlasten. Dies trägt zur Begrenzung des maximalen Biegemoments ( $M_2$ ) am Halmansatz bei. Je stärker der Wind weht, desto stärker weicht die Bambuspflanze aus. Dieser Vorgang hilft, das Biegemoment zu begrenzen. Die große Elastizität ist für den Bambus, im Fall von horizontalen Lasten, von Vorteil und erscheint als eines der natürlichen Prinzipien pflanzlichen Leichtbaus<sup>13</sup>.
- **Schneelast:** Das Nachgeben, welches dem horizontal auskragenden Tannenzweig bei Schneelasten hilft, schadet dem vertikal eingespannten Bambushalm. Unter der Last des Schnees ( $S$ ) wird das Nachgeben für den Bambus fatal. Je weiter der Halm sich neigt, desto größer wird die Exzentrizität ( $z_3$ ) und desto mehr Schnee fängt der Halm auf, was wiederum die Schneelast steigert. Anstatt das Biegemoment ( $M_3$ ) zu begrenzen, verstärkt die Flexibilität in dieser Lastsituation das Biegemoment ( $M_4$ ). Ein Vorgang, der schließlich zur Zerstörung des Halmes führen muss. Solche Zerstörung erklärt auch die Grenzen der natürlichen Verbreitung einer Pflanze, die in den Tropen und Subtropen beheimatet ist und nicht über die gemäßigten Klimazonen hinaus vordringt.

Schlankheit und Flexibilität, als Resultat natürlich optimierter Gestalt, sind also nur unter bestimmten naturräumlichen Voraussetzungen von Vorteil.

Zusammengefasst lassen sich am Habitus der Pflanze folgende Punkte feststellen:

- ⇒ *Materialeffizienz ist die Voraussetzung, um das schnelle Halmwachstum im Streben um Licht und Raum zu ermöglichen, daher sind die statisch unbedeutenden Bereiche im Zentrum materialfrei, die hochbelasteten Randbereiche hingegen extrem fest.*
- ⇒ *Die Röhrenform ist für einen eingespannten Stab die optimierte Geometrie, um Windlasten aus unterschiedlichen Angriffsrichtungen zu widerstehen (Abb. 9).*
- ⇒ *Flexibilität ist für das Überleben des schlanken Halmes bei Wind essentiell. Sie ist Teil des natürlich optimierten Designs der Pflanze.*
- ⇒ *Bei Bambus herrscht nicht das Axiom konstanter Spannung.*
- ⇒ *Unterschiedliche Festigkeiten und Querschnittsflächen resultieren aus den einwirkenden Kräften, wie Wind- und Eigenlast.*

---

<sup>13</sup> Mattheck nennt dieses elastische Ausweichen gegenüber angreifenden Lasten „Siegen durch Nachgeben“ und bezieht sich dabei auf das Herabhängen schneebedeener Tannenzweige (48).

## 2.2 Makrostruktur: Aufbau des Bambushalms

Im Folgenden soll eine kurze Einführung in die Morphologie des Halmes gegeben werden. Es sollen die wesentlichen Merkmale an einem Bambushalm benannt werden, da sie in der weiteren geometrischen und strukturellen Betrachtung Bedeutung gewinnen.

### 2.2.1 Rhizom

Bambus verbreitet sich durch ein unterirdisches System von Sprossachsen, dem Rhizom, welches auch Wurzelstock genannt wird. Es ist keine eigentliche Wurzel, denn es besitzt Blattnarben (6). An jedem Nodium des Rhizoms befinden sich jeweils eine Knospe und Wurzelanlagen. Über das Rhizom-System sind alle aufgehenden Halme eines Horstes miteinander verbunden. Junge Sprösslinge können somit auf die Nährstoffreserven ausgewachsener Pflanzenteile zurückgreifen, was die enorme Wachstumsgeschwindigkeit der Halme erklärt. Mittels Rhizomteilung kann Bambus vegetativ vermehrt werden. Dazu werden Rhizom-Abschnitte an anderer Stelle eingepflanzt. Die ersten Triebe eines jungen Rhizomgeflechts sind sehr klein, in den folgenden Jahren bilden sich jeweils neue Generationen von Halmen aus, die die vorhergehenden Halme im Durchmesser übertreffen. Ab dem fünften Jahr etwa wachsen die neuen Halme mit dem maximal erreichbaren Durchmesser zu voller Höhe heran (7). Die jährlich neu wachsenden Halme erhalten und erweitern den Bambusbestand. Eine Neupflanzung oder Wiederaufforstung ist nicht notwendig, was die nachhaltige Bewirtschaftung im Gegensatz zu Nutzholzbeständen vereinfacht. Der Übergang vom horizontalen Rhizom zum senkrechten Halm wird als Rhizomhals bezeichnet. Diese gebogenen Bereiche haben stark verkürzte Internodien mit besonders dicken Halmwandungen. Es finden sich auch vollwandige Querschnitte im Rhizomhals. Die Krümmung des Rhizomhalses teilt sich der darüber anschließenden Halmbasis mit. So ist der Beginn jedes Bambushalmes gekrümmt, es folgt z.T. eine Gegenkrümmung. Alle Bambusarten können grundsätzlich zwei verschiedenen charakteristischen Rhizom-Verzweigungstypen zugeordnet werden:

- **Sympodial**

Die Rhizomhalse sind kurz und kräftig, stark gekrümmt und oftmals deutlich dicker als der spätere Halm. Seitliche Knospen können nur weitere Rhizome ausbilden. Halme entstehen nur aus den Rhizomenden. Aufgrund der kurzen Rhizomhalse ist das oberirdische Erscheinungsbild der Halme sehr dichtstehend und horstbildend.

- **Monopodial**

Das Rhizom gliedert sich in längliche, schlanke Internodien und ähnelt in der Struktur stark dem oberirdischen Teil der Bambuspflanze. Die seitlich an der Hauptsprossachse des Rhizoms anliegenden Knospen können sich in weitere Rhizome verzweigen oder zu einem neuen Halm aufschließen. Aufgrund der lang gestreckten Rhizome bildet die überirdische Halmstellung größere Abstände und damit eine offenere Wuchsform.

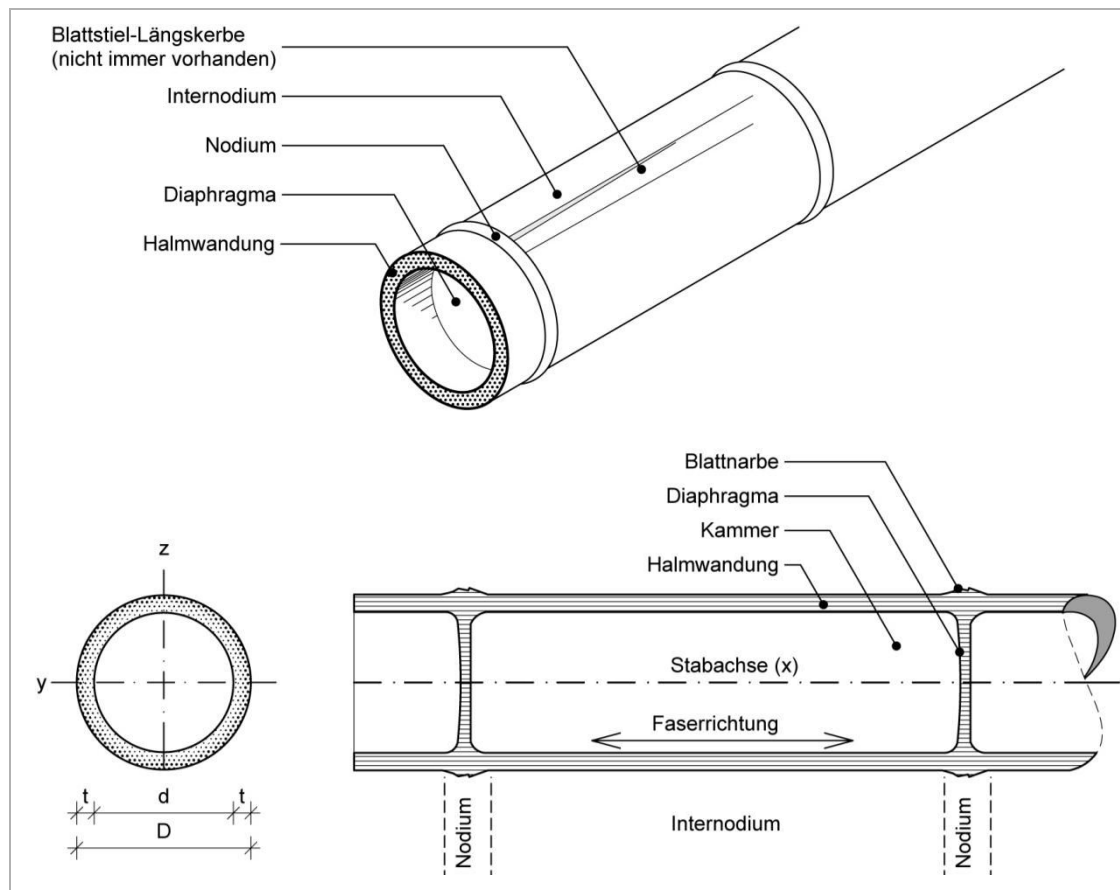


Abb. 11: Bezeichnung der grundlegenden Merkmale eines Bambusrohres, Begriffsdefinition am Quer- und Längsschnitt eines Bambushalmes.

### 2.2.2 Nodium

Als Nodium (lat. Knoten) wird der Ansatz der Blattnarbe bezeichnet, der den Halm in gewisse Abschnitte gliedert. Entlang der Sprossachse gehen in wechselständiger Folge die Ansätze der Blattstiele seitlich vom Halm ab. Am Nodium besitzt der Halm einen etwas größeren Umfang als im Bereich der angrenzenden Internodien. Der sonst hohle Querschnitt des Halmes ist am Nodium durch das Diaphragma verschlossen. Der scheibenartige Verschluss stabilisiert den röhrenförmigen Halm gegen Verformungen, Abflachen und seitliches Zerdrücken, stellt aber auch eine Verteilerstelle in der Versorgung von Halm und Blättern dar.

### 2.2.3 Internodium

Der Bereich zwischen zwei Nodien wird als Internodium bezeichnet. Bei den meisten Bambusarten sind diese Segmente hohl, einige Arten besitzen jedoch einen Vollquerschnitt. Der von Halmwand und Diaphragma gebildete Hohlraum wird als Kammer bezeichnet. Die Internodien besitzen eine sehr klar gerichtete Faserstruktur. Während der Wachstumsphase strecken sich die Zellen im Internodienbereich.



## **2.3 Mikrostruktur: Aufbau der Halmwand**

Auffällig bei der Betrachtung der Halmwand ist, dass sie von außen nach innen hin nicht einheitliche Eigenschaften aufweist (Abb. 12). Die verschiedenen Gewebearten folgen unterschiedlichen physiologischen Anforderungen. Wie bei Wirbeltieren Knochen, Muskeln, Blutgefäße und Fettgewebe bestimmte Funktionen übernehmen, so differenzieren sich auch bei der Bambuspflanze die Gewebearten:

### **2.3.1 Epidermis**

Die Halmaußenhaut wird von der festen Epidermis gebildet, die durch eingelagerte Kieselsäuren eine enorme Druck- und Schlagfestigkeit besitzt und mit zunehmendem Alter noch an Härte gewinnt. Die sehr glatte und wasserabweisende Schicht schützt die Pflanze vor Verletzungen und Austrocknung.

### **2.3.2 Fasern**

Dicht unter der Epidermis liegt die Zone mit dem höchsten Faseranteil. Die Druck- und Zugfestigkeit in Halmrichtung ist hier enorm hoch (vgl. 2.3.5). Nach innen hin nimmt der Faseranteil ab und das Parenchym (Bindegewebe) überwiegt. Diese unterschiedliche Faserverteilung resultiert aus den unterschiedlichen Beanspruchungen im Halmquerschnitt und hat Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften sowie das Quell- und Schwindverhalten.

### **2.3.3 Leitbündel**

Die Versorgung mit notwendigen Stoffwechselprodukten erfolgt über das Gewebe der Leitbündel. Die Zellen sind röhrenförmig und es fehlen in Längsrichtung die Zelltrennwände. Bei Bambus sind wie bei allen einkeimblättrigen Pflanzen (Monokotylen) die Leitbündel über den gesamten Halmquerschnitt verteilt. Monokotylen können aufgrund ihrer Leitbündelstellung kein sekundäres Breitenwachstum entwickeln, im Gegensatz zu Bäumen, bei denen die äußere Bastschicht das Leitgewebe darstellt und jährlich neue Schichten in der Breite anlegt.

### **2.3.4 Parenchym**

Zur Halminnenseite hin nimmt das Bindegewebe anteilig zu. Das Bindegewebe hat eine schwammartige Struktur und speichert Nährstoffe, vor allem Stärke, weshalb es von Schadorganismen (Insekten, Pilze) verstärkt befallen wird. Die Halmwand wird gegenüber der inneren Höhlung durch ein feines Häutchen abgegrenzt. Auch hier spielt der Feuchtehaushalt der Pflanze eine Rolle.

### **2.3.5 Faserdichte**

Die Verteilung der Faserbündel ist über den Halmquerschnitt nicht gleichmäßig. Als natürlich optimiertes System setzt die Pflanze die hochfesten Fasern in den Zonen der höchsten Spannungen ein; entsprechend finden sich hier die höchste Faserdichte und Zugfestigkeit. Gleichzeitig bergen die Randschichten erhebliche Silikatanteile, die eine hohe Druckfestigkeit ergeben. Dieser Zusammenhang von Außenrandabstand und Festigkeit der jeweiligen Zone ist in Abb. 12 deutlich erkennbar. Die Randzonen weisen Zugfestigkeiten von über 300 MPa auf, während die näher an der Innenseite der Halmwand befindlichen Zonen eine Zugfestigkeit von nur etwa 50 MPa besitzen (8). Zur Spitze des Halmes hin ist eine auffällige Abnahme des Leitgewebeanteils im Halmmantel festzustellen, die sich aus der Tatsache erklären lässt, dass es nach oben hin immer weniger zu versorgende Pflanzenteile gibt.

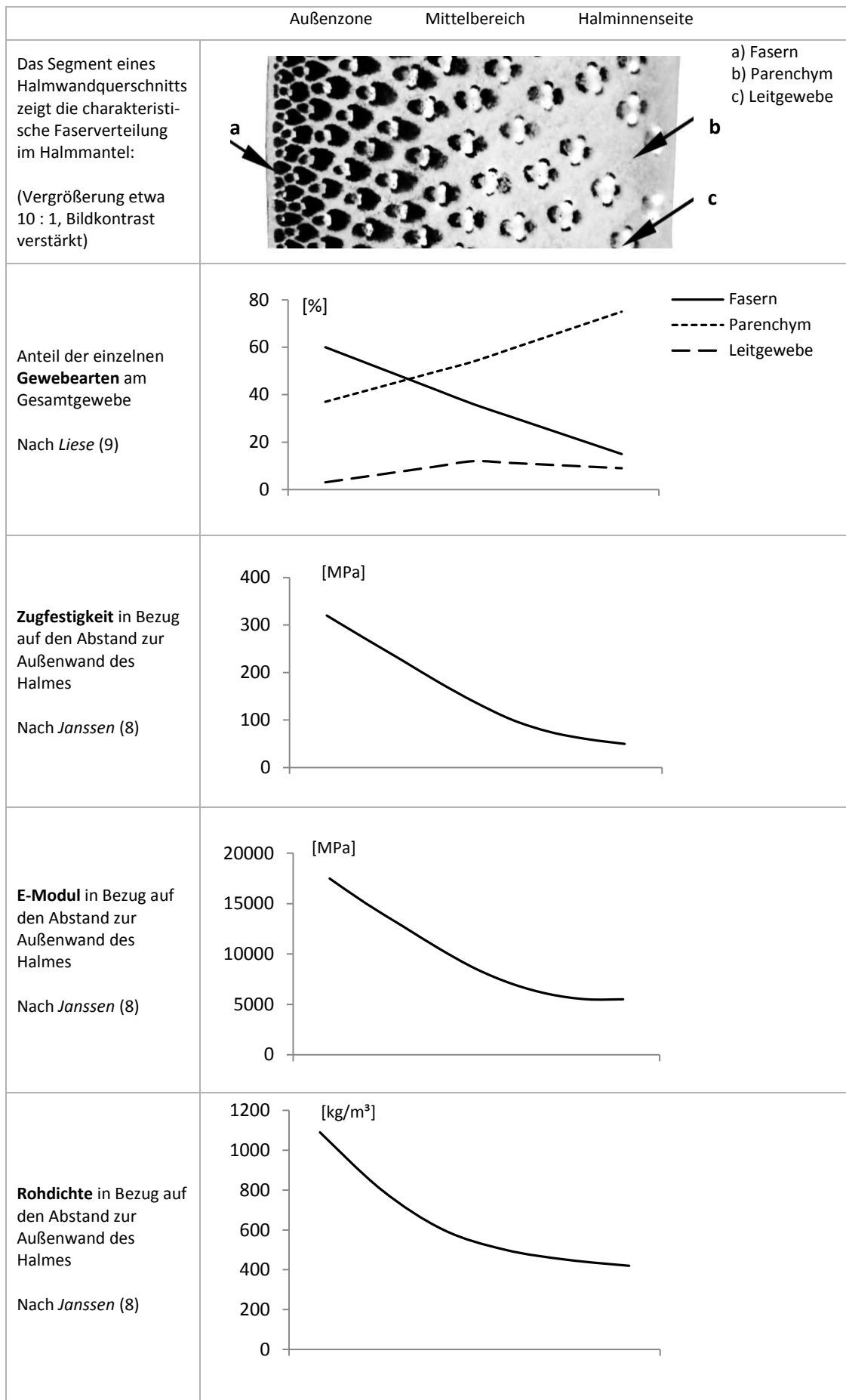


Abb. 12: Festigkeiten im Halmmantel lassen sich auf das Vorhandensein der Fasern zurückführen.

### 2.3.6 Richtungsabweichungen der Fasern am Nodium

Im Bereich der Nodien weichen die Längsfasern von ihrem laminaren Verlauf ab und werden vom sich verzweigenden Leitgewebe durchflochten (Abb. 13). Durch die sich mehrlagig kreuzenden Fasern erzeugt diese Verflechtung die typische Verdickung der Halmwand, welche für das Nodium kennzeichnend ist (vgl. 2.5.5). Die Nodien lassen sich unter struktureller Betrachtung als Bügelbewehrung des Halmes deuten (Abb. 14). Das Diaphragma stellt dabei mit seinem umlaufenden Kranzgewebe eine gewisse Ringarmierung dar. Vom Diaphragma wiederum geht radiales Leitgewebe ab, welches den Zusammenhalt der Faserbündel sicherstellt und bis zu einem bestimmten Grad das Ausknicken der Fasern unter Druck verhindert. Darüber hinaus wirken die Nodien als Schubverdübelung und mobilisieren den Widerstand des Halmes gegen Querkraft, Torsion und Biegung. Dies erklärt auch die korrelierende Zunahme von Nodiendichte und Flächenträgheitsmoment zur Halmbasis (vgl. Abb. 37). Für den abgehenden Blattstiel stellt das Nodium den Festpunkt dar. Kragmomente vom Wind bewegter Blätter sowie Druck- und Zugkräfte können gleichmäßig in den gesamten Halmmantel eingeleitet und an die gegenüberliegende Halmwand abgegeben werden. Man könnte das Diaphragma mit einem Steifenblech vergleichen, wie es im Stahlbau in Hohlprofile eingeschweißt wird, um einer punktuellen Last zu begegnen.

In Abb. 15 sind vier Querschnitte im Abstand von 5 mm durch ein Nodium abgebildet. Die Schichtenfolge verläuft von oben nach unten. Der Blick geht in Richtung Halmbasis:

- Schnitt A stellt noch einen Teil des Internodiums dar.
- Schnitt B zeigt den sich verdickenden Halmmantel unmittelbar oberhalb des Nodiums. Ein Teil des Diaphragmas ist angeschnitten.
- Schnitt C zeigt direkt am Nodium radiales Leitgewebe, welches die Blattnarbe ans Diaphragma anschließt und gleichzeitig den Faserverbund stärkt. Die verflochtene Gewebestruktur des (hier nach oben gewölbten) Diaphragmas ist im Anschnitt gut zu erkennen.
- Schnitt D zeigt, wie unterhalb des Nodiums aufgeweitete Leitbündel (helle Punkte) gleichmäßig über den Halmquerschnitt gestreut anliegen. Diese können als Übergang von vertikaler zu horizontaler (radialer) Versorgung gedeutet werden.

Das Nodium ist aber mehr als nur reines Tragwerksdetail, es stellt für die Pflanze als Organismus die Verteilungsstelle der Blattversorgung dar. Ein Kranz legt sich auf der Halminnen-seite um das Diaphragma und schließt, gleich einer Ringleitung, die Blattstiele an alle vertikalen Leiterbahnen an. So werden die Blätter mit Nährstoffen und Wasser versorgt, Produkte der Photosynthese werden wiederum in den Halm eingespeist. Die Durchdringung in radialer Richtung stärkt zwar die Integrität der Makrostruktur, stört aber gleichzeitig den gradlinigen Kraftfluss der Längsfasern. Folglich reduziert sich die Festigkeit und am Nodium sind nur etwa 30 % der Zugfestigkeit des Internodiums feststellbar (10). Diese Schwächung wird aber durch den größeren Halmquerschnitt am Nodium zum Teil kompensiert.

⇒ *Die Faserabweichung am Nodium führt lokal zu einer geringeren Festigkeit.*

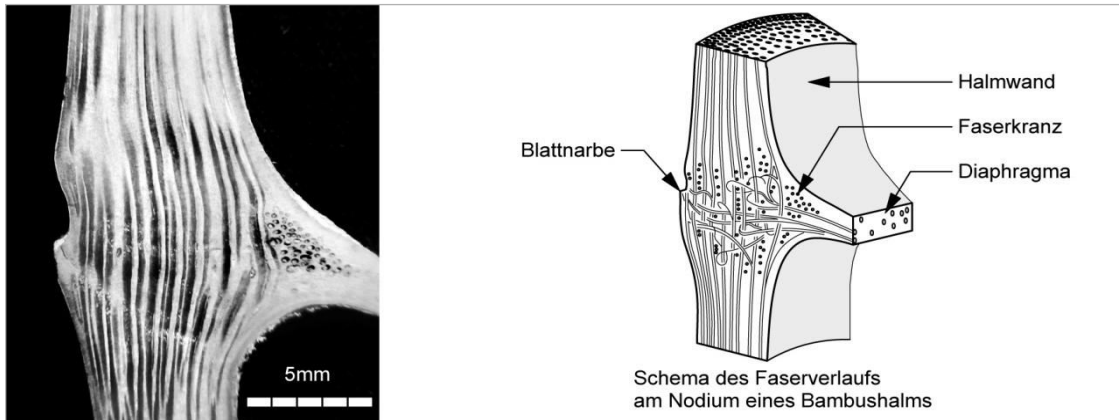


Abb. 13: Stark kontrastierter Längsschnitt am Nodium zeigt deutlich die Abweichung des Faserverlaufs (links). Modellvorstellung des Faserverlaufs mit innenliegendem Kranzgewebe (rechts).

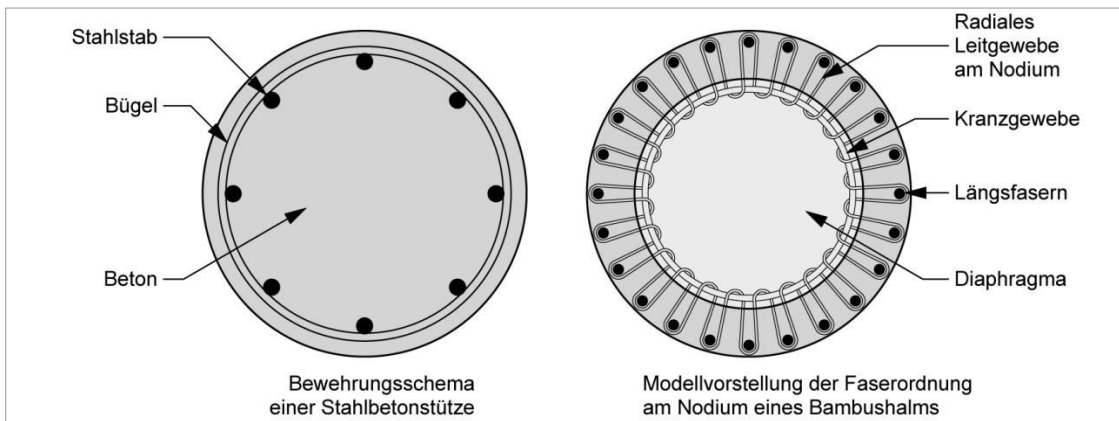


Abb. 14: Schematischer Vergleich einer bewehrten Betonstütze mit dem Faserverlauf am Nodium.

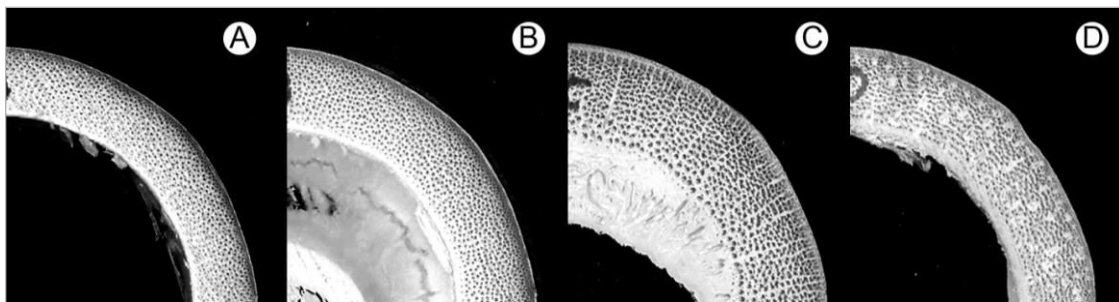


Abb. 15: Horizontalschnitte von 5 mm Dicke durch ein Nodium. Radiales Leitgewebe ist in Schnitt C sichtbar.

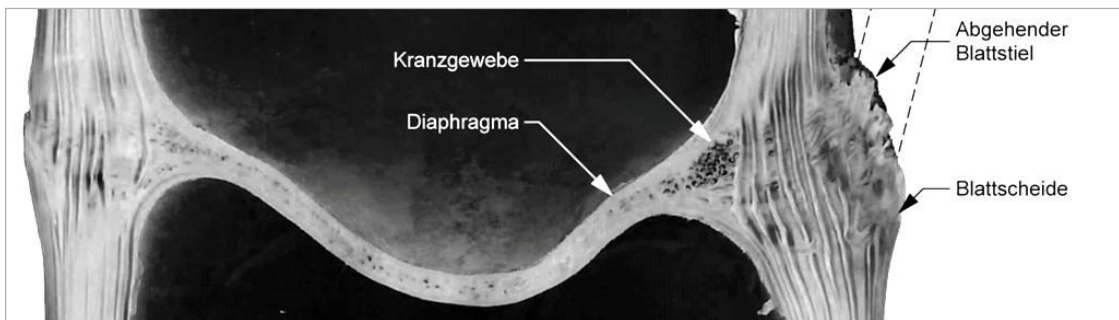


Abb. 16: Längsschnitt durch einen Bambushalm am Nodium. Deutlich erkennbar ist das Durchflechten der Längsfasern mit dem sich verzweigenden Leitgewebe. Der Blattstiel verankert seine Leitbündel im Diaphragma.

## 2.4 Mechanische Eigenschaften von Bambus

Bambus ist ein anisotropes Pflanzenmaterial. Mehr noch als bei Holz unterscheiden sich die Festigkeiten in den räumlichen Richtungen stark voneinander. Ursache hierfür ist die klar gerichtete Faserstruktur der Pflanze, die eine ebenso gerichtete Festigkeit zur Folge hat. Diese mikrostrukturelle Eigenschaft wird aber von einer großen Varianz makrostruktureller Faktoren überlagert, die sich aus der Morphologie der Bambuspflanze ergeben. Klare Aussagen über Materialfestigkeiten sind aufgrund der vielen morphologisch bedingten Einflüsse bei Bambus nicht ohne weiteres möglich. Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb nicht der Versuch unternommen werden, einzelne Bambusarten näher in ihren Eigenschaften zu bestimmen. Zahlreiche Einzelforschungen beschäftigen sich mit diesem Thema.<sup>14</sup>

Auch wenn mechanische Werte nicht mit Sicherheit angegeben werden können, lassen sich dennoch aus den bisher veröffentlichten Forschungen grundsätzliche Tendenzen zum mechanischen Verhalten von Bambus erkennen (Tab. 1).

Bruchspannung	Faserrichtung	von [MPa]	bis [MPa]	Ø [MPa]	Werte nach Trujillo	
Druck		31	85	40	$f_{c,0,k}$	28
	⊥			16	$f_{c,90,k}$	-
Zug		83	335	150	$f_{t,0,k}$	>35
	⊥			1,8	$f_{t,90,k}$	0,2
Biegung Rohr		30	130	60	$f_{m,k}$	46
Biegung Spalte		110	139	120	$f_{m,k}$	-
Scherspannung		6	25	16	$f_{v,0,k}$	4
E-Modul		7.473	66.000	14.000		13.800

Tab. 1: Übersicht ausgewählter mechanischer Kennwerte nach Janssen (8), Widjowijatnoko (11), Trujillo (12).

Abgesehen von der Vielzahl der Bambusarten spielen bei der Feststellung spezifischer Festigkeiten auch andere Faktoren eine Rolle. Diese Faktoren werden am Beispiel der axialen Druckfestigkeit in Tab. 2 qualitativ benannt.

Eigenschaft	Auswirkung auf axiale Druckfestigkeit des Bambusmaterials			
Bambusquerschnitt	große Wanddicke	-	geringe Wanddicke	+
Alter des Halmes	jung, grün, < 3 Jahre	-	lignifiziert, 3 – 5 Jahre	+
Position entlang des Halmes	Basis	-	Spitze	+
Abstand zur Halmaußenseite	innen	-	außen	+
Abstand zum Nodium	Nähe Nodium	-	Mitte Internodium	+
Materialfeuchte	Schnittfrisch	-	abgelagert, trocken	+
Rohdichte des Materials	Geringe Faserdichte	-	hohe Faserdichte	+
Wuchsort des Halms <sup>15</sup>	Tal	-	Hang/Hügel	+
Erntezeitpunkt des Halmes	Regenzeit	-	Trockenzeit	+
Halmgesundheit	Schädlinge, Pilze etc.	-	frei von Befall	+
Geradheit des Halmes	krumm, Stabimperfektion	-	geradwüchsig	+

Tab. 2: Bambuseigenschaften und deren Auswirkungen auf die Druckfestigkeit des Materials. Eigenschaft senkt (-) bzw. steigert (+) die messbare Druckfestigkeit.

Dieselben Einflüsse können aber für andere mechanische Festigkeiten, wie z.B. die Querdrukfestigkeit vollkommen andere Auswirkungen haben. So führt sinkende Materialfeuchte zwar zu einer höheren axialen Druckfestigkeit, doch zerbricht bei geringer Materialfeuchte ein Halm leichter unter Querpressung. Auch sagt die mechanische Festigkeit des Materials wenig über die Festigkeit des Halmes aus. Der dünnwandige Bereich an der Halmspitze hat zwar – auf die Fläche bezogen – eine höhere mechanische Festigkeit als die dickwandige

<sup>14</sup> Verwiesen sei dabei vor allem auf die gut recherchierten Arbeiten von Janssen (8) und Widjowijatnoko (11).

<sup>15</sup> Nach Acre-Villalobos, 1993 (17)

Halmbasis. Doch absolut betrachtet wäre ein Abschnitt des Halms am dickeren Ende stärker belastbar als ein gleichlanger Abschnitt der dünnwandigen Spitze. Ebenso herrscht am Nodium zwar eine geringere Zugfestigkeit pro Flächeneinheit als am Internodium, doch steht durch die Verdickung mehr Querschnitt zur Verfügung. Die natürlich optimierte Pflanze besitzt am Nodium keine unterdimensionierte Schwachstelle, denn damit wäre das Internodium ja überdimensioniert, was dem Prinzip pflanzlichen Leichtbaus widersprechen würde.

Ohne die Makrostruktur des Halmes als Ganzes zu betrachten, haben die mikrostrukturellen und mechanischen Eigenschaften des Materials somit nur eine begrenzte Aussagefähigkeit. Als Grundregel lässt sich einzig festhalten:

⇒ *Alle Festigkeiten im Bambusmaterial lassen sich auf den Faserverlauf zurückführen.*

#### 2.4.1 Zugfestigkeit parallel zur Faser

Die hohe Zugfestigkeit von Bambus in Halmrichtung beruht in erster Linie auf der gerichteten Struktur der Fasern. Diese bilden zwar nur einen Anteil von etwa 40 % am Gesamtgewebe (9), tragen aber den Großteil der mechanischen Spannungen ab. Die Verteilung der Fasern im Halmquerschnitt ist nicht konstant. Der höchste Faseranteil findet sich in den äußersten Schichten, während zur Halminnenseite das weiche Leitgewebe und Parenchym überwiegen (vgl. 2.3.5). Zur Halmspitze nimmt der Bindegewebsanteil (Parenchym) ab und der Faseranteil wird dominierend. In diesen dünneren Halmwänden sind folglich die höchsten Zugfestigkeiten zu finden. Im Bereich des Halmansatzes finden sich stärkere Wanddicken. Diese besitzen einen prozentual geringeren Faseranteil und können daher nur vergleichsweise geringen Zugspannungen widerstehen. Die absolut aufnehmbaren Zugkräfte sind jedoch durch die vergrößerte Querschnittsfläche am Halmansatz größer.

Abb. 17 zeigt die Halmwand in mehreren Maßstabsstufen. Im Gefüge (a) sind Fasern stets zu Bündeln zusammengefasst (b), welche in verschiedenen Größenordnungen auftreten. Innerhalb eines solchen Bündels (c) zeigt sich, dass der Aufbau jeder einzelnen Faser polylamellar ist, wobei die einzelnen Schichten sich in gegenläufigen Neigungswinkeln spiralförmig umschließen (d). Bei Streckung der Fasern schnüren sich die gegenläufigen Schichten fest aneinander. Durch die feine Faseraufteilung bleiben etwaige Risse begrenzt und werden durch benachbarte Fasern überbrückt.

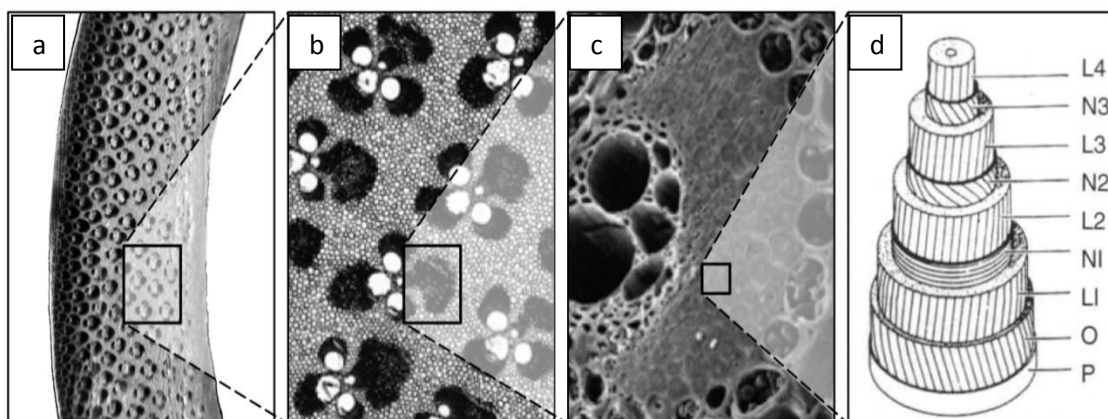


Abb. 17: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Maßstabsstufen im Aufbau der Halmwand. a) Ausschnitt einer Halmwand. b) Gewebe mit Leiterbündeln. c) Faserbündel. d) Polylamellarer Aufbau einer einzelnen Faser (Bilder b - d nach Liese (9)).

Während für ganze Bambushalme Zugfestigkeiten von 83 – 335 MPa angegeben werden (11), haben einzelne Faserbündel sogar (fast unglaubliche) Zugfestigkeiten von 800 – 1000 MPa (13). Trotz der extrem hohen Zugfestigkeit des Materials wurde diese in Konstruktionen bisher kaum ausgenutzt. Grund hierfür ist die beschränkte Lasteinleitungsmöglichkeit durch ungünstige Fügeprinzipien. Diese konstruktiven Unzulänglichkeiten sollen in der weiteren Entwicklung dieser Arbeit näher betrachtet werden. Es gilt daher:

⇒ Die Bambus-Zugfestigkeit ist enorm – limitierend wirken allein die Fügeprinzipien.

## 2.4.2 Zugfestigkeit quer zur Faser

Stärker noch als bei Holz ist die gerichtete Faserstruktur bei Bambus ausgeprägt. Dies führt dazu, dass in Faserrichtung eine enorm hohe Zugfestigkeit herrscht, während quer zur Faser aus gleichem Grunde eine ausgeprägte Schwäche vorliegt. Im Bereich der Nodien ist diese Schwäche zwar weniger bedeutend, da hier das Gewebe des Diaphragmas stabilisierend wirkt, die grundsätzliche Schwächung bleibt jedoch bestehen. Quer zur Faser können Zugspannungen in zwei Richtungen unterschieden werden (Abb. 18):

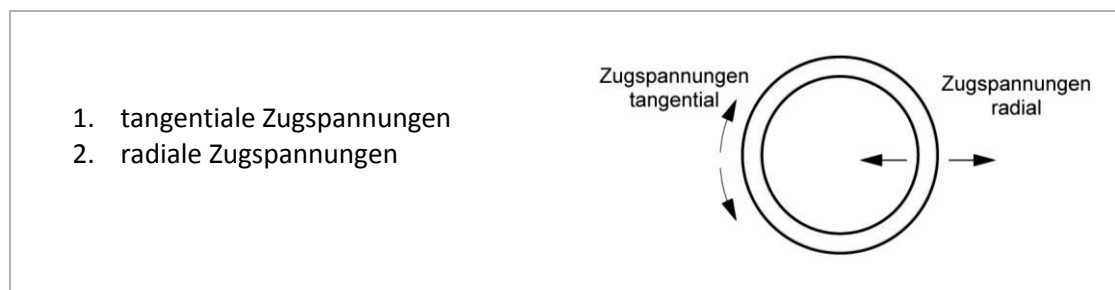


Abb. 18: Zugspannungen quer zur Faser können in zwei Richtungen unterschieden werden.

Bei der Verwendung von Bambushalmen zu Konstruktionszwecken stellen Zugspannungen in tangentialer Richtung die größte Gefahr dar. Radiale Zugspannungen spielen dagegen eine untergeordnete Rolle. Durch die Sprödhheit des Materials geschieht das Auftreten von radialen Rissen stets ohne erkennbare Vorwarnung. Die Ursachen sind vielfältig und überlagern sich mitunter. Mehrere unkritische Einzelfaktoren können sich dabei zu einem gefährlichen Gesamtzustand verdichten. Dann kann eine leichte Querpressung, intensive Sonneneinstrahlung oder eine vorübergehende Abnahme der Luftfeuchte ausreichen, damit sich Halme ganz von alleine der Länge nach aufspalten.

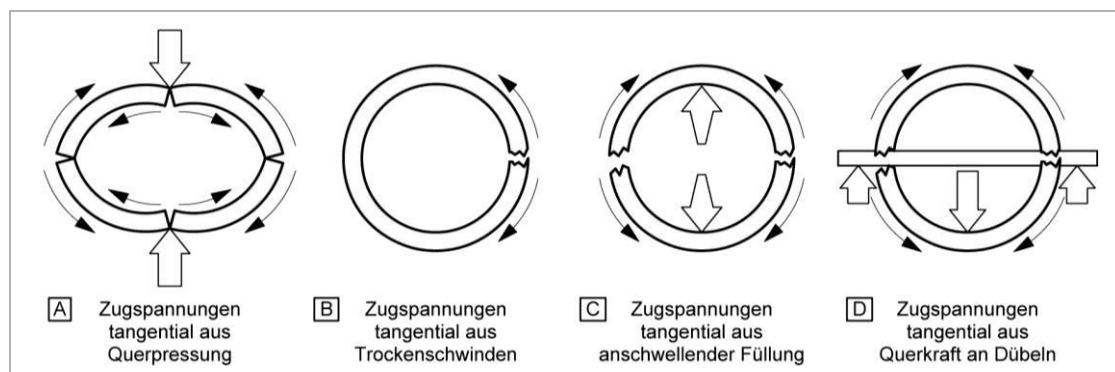


Abb. 19: Bambushalme können aus unterschiedlichen Ursachen unter den Einfluss tangentialer Zugspannung geraten. Als Folge entstehen radiale Risse.

In der Literatur finden sich Querkzugfestigkeiten von 0,2 – 1,8 MPa. Es ist jedoch nicht absehbar, wie stark ein Halm durch Trockenschwinden schon unter Vorspannung steht. Aus diesem

Grund ist dringend davor zu warnen, sich auf Querkzugfestigkeiten oder Festigkeiten radialer Scherflächen zu verlassen.

⇒ Für Zugspannungen in tangentialer Richtung besitzt Bambus keine verlässliche Festigkeit.

### 2.4.3 Druckfestigkeit parallel zur Faser

Während junge Halme aufgrund der reißfesten Fasern aus Zellulose schon früh eine enorm hohe Zugfestigkeit haben, wird die maximale Druckfestigkeit der Halme erst im Alter von etwa fünf Jahren erreicht. Das „Verholzen“ der Halme findet durch die Einlagerung von Lignin im Halmmantel statt. Auch die „Verkieselung“ des Cortex (Einlagerung von Silikaten in der Halmrinde) nimmt mit der Zeit zu. Daher ist es wichtig, die Halme erst heranwachsen und reifen zu lassen, bevor sie geerntet werden (13).

Im Vergleich zu Holz besitzt Bambus eine relativ hohe Druckfestigkeit von etwa 40 – 60 MPa, die jedoch aufgrund der Knickgefahr nur selten voll ausgenutzt werden kann. Problematisch ist die Schlankheit der Stäbe, welche aus der natürlichen Begrenztheit der Halmquerschnitte resultieren kann. Nach *Atrops* (14) setzt das schlagartige Versagen der Halme ein, wenn das seitliche Ausweichen etwa 5 – 10 % der Knicklänge beträgt. Entlang der Halmlänge sind Außendurchmesser und Wanddicke (und damit der Trägheitsradius) abnehmend (vgl. 2.5.7). Der Unterschied von dickem zu dünnem Ende ist folglich umso größer, je länger der Halmabschnitt ist. Stab-Imperfektion durch krummen Wuchs wirkt auf die Druckfestigkeit zusätzlich mindernd.

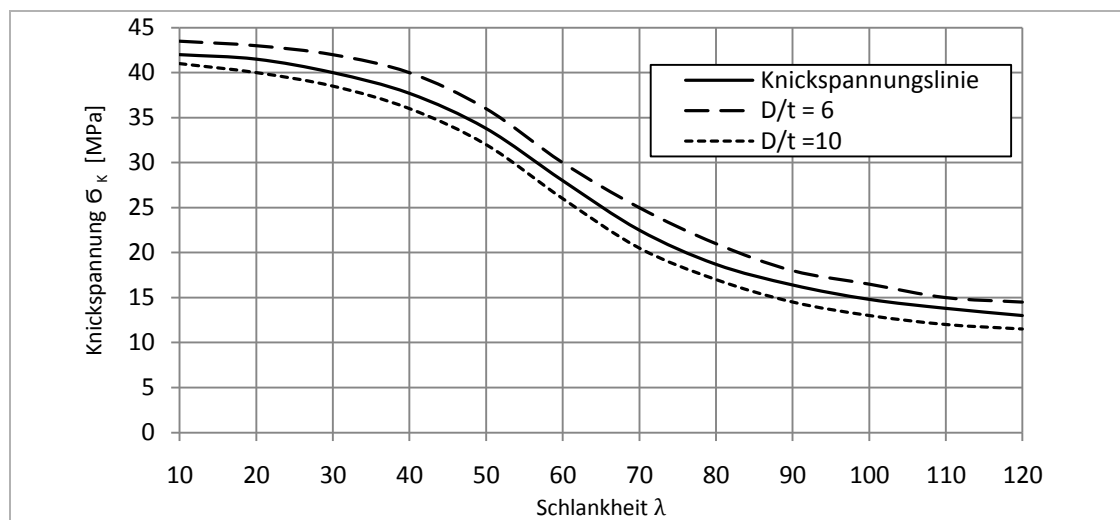


Abb. 20: Knickspannungslinien von Bambushalmen in Abhängigkeit zu ihrer Schlankheit nach J. L. Atrops (14).

Als vereinfachtes Beispiel: Ein Halm mit den Maßen 70/7 mm besitzt einen Trägheitsradius von  $i = 2,24$  cm. Wenn dieser Halm eine Knicklänge von  $s_k = 250$  cm hat, folgt die Schlankheit mit  $\lambda = 112$ . Das Verhältnis von Außendurchmesser zu Wanddicke beträgt  $D/t = 10$ . Es resultiert eine Festigkeit gegenüber Knickspannung von nur noch etwa 12 MPa. Bezogen aufs Knicken und die Querschnittsfläche von  $A = 1390$  mm<sup>2</sup> ergibt sich eine maximale Druckkraft von 16,6 kN. Ohne die Reduktion der Knickspannung könnte der Halm 57 kN Druckkraft aufnehmen.

⇒ Es ist eine konstruktive Begrenzung der Knicklänge anzustreben, um die Leistungsfähigkeit des Materials nicht unnötig zu reduzieren.



#### 2.4.4 Druckfestigkeit quer zur Faser

Ähnlich wie bei Holz ist die Druckfestigkeit von Bambusmaterial quer zur Faser gering. Sie beträgt etwa ein Fünftel bis ein Zehntel der Festigkeit in Faserrichtung.

Bei der Betrachtung der *Mikrostruktur* fällt auf, dass auf der Halminnenseite das weiche, schaumartige Bindegewebe anteilig dominiert. Entsprechend weich ist dieser Bereich. Die äußeren Schichten sind durch Verkieselung der Halmrinde härter und fester.

Das eigentliche Problem bei Druckspannungen quer zur Faser liegt in der *Makrostruktur* begründet. Durch die Röhrenform des Halmes führt eine Druckbelastung quer zur Stabrichtung zu einer Querpressung des Hohlkörpers. Infolgedessen entstehen Querkzugspannungen in der Halmwand, die den Halm zerstören können (vgl. 4.1.2).

#### 2.4.5 Biegefestigkeit

Um Biegemomenten aus wechselnden Windrichtungen zu widerstehen, ist die leicht konische Röhre die natürlich optimierte Form. Da der Halm als am Boden eingespannter und somit frei auskragender Stab angesehen werden kann, verhält sich das Widerstandsmoment über die Länge des Halmes betrachtet auch nicht konstant, sondern den Biegebeanspruchungen eines solchen eingespannten Stabes entsprechend.

Auch in Bezug auf Biegespannungen gilt es zu differenzieren zwischen der Leistungsfähigkeit des Bambusmaterials (*Mikrostruktur*) und des Bambushalmes als Rohr (*Makrostruktur*). Die Biegefestigkeit von Streifen (ca. 120 MPa) aus dem Bambushalm-Mantel ist etwa doppelt so hoch wie die des ganzen Rohrs (ca. 60 MPa). Aufgrund der Röhrenform kann die Biegefestigkeit des Materials im tatsächlichen Beanspruchungsfall kaum ausgenutzt werden, da es vor dem Überschreiten der Biegezugfestigkeit zum Versagen aus anderen Gründen kommt, etwa Zerstörung durch Querpressung (vgl. 4.1.2).

#### 2.4.6 Scherfestigkeit

Bambus ist durch die Röhrenform geometrisch geschwächt gegenüber Schubbeanspruchung. Bei Biegebeanspruchung eines Bambushalmes stehen sich Druck- und Zugspannung entsprechend des Moments an oberer und unterer Seite gegenüber. In der neutralen Ebene in Halmmitte herrschen zum Auflager hin die größten Schubkräfte. Stellt man diesen Schnittgrößen die verfügbare Querschnittsfläche eines Bambushalmes gegenüber, wird deutlich, dass die großen Schubkräfte in der neutralen Faser auf die geringste Scherfläche treffen (Abb. 21). Entsprechend groß ist hier die Scherspannung. Für die Aufnahme der Normalkräfte aus Biegung hat der Halm eine günstige Verteilung des Materials in der Halmwand.

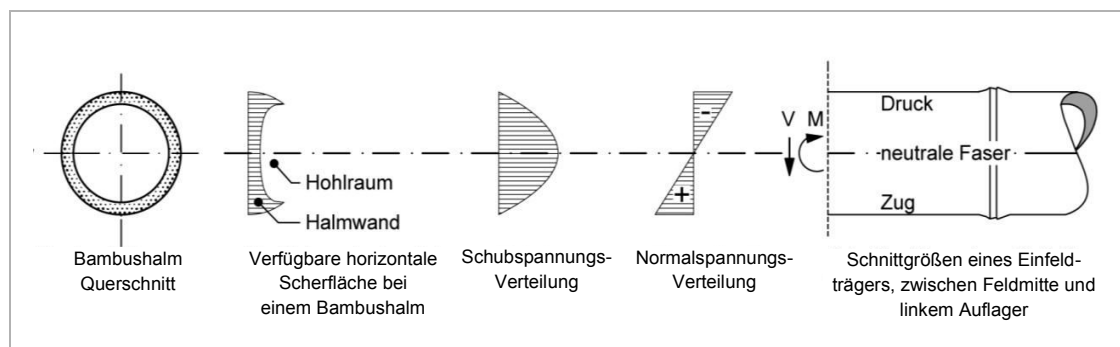


Abb. 21: Gegenüberstellung der verfügbaren Querschnittsfläche mit vorhandenen Schnittgrößen.

### 2.4.7 Quellen und Schwinden

Bambus besitzt, ähnlich wie Holz, ein stark anisotropes Quell- und Schwindverhalten. Bei abnehmender Materialfeuchte bilden sich irreversible Längsrisse im Halm aus, die in einzelnen Internodienbereichen auftreten oder sich bis hin zur ganzen Halmlänge ausbreiten können. Das Auftreten von Längsrissen deutet auf Zugspannungen hin, die senkrecht zum Rissufer wirken. Bei Holz ist aufgrund der Markstrahlen das Schwindverhalten in radialer Richtung weniger stark ausgeprägt als das in tangentialer Richtung. Hieraus folgen große tangentiale Zugspannungen, die sich schließlich als radialer Längsriss ausbilden. Bambus jedoch besitzt im Internodium keine Markstrahlen, auch kann der Hohlraum im Internodium nicht das radiale Schwinden behindern. Das Auftreten von Längsrissen bei Bambus bedarf also einer anderen Erklärung.

Der für das Quellen und Schwinden verantwortliche Pflanzenbestandteil ist Hemizellulose, ein Bestandteil der Zellulose (6). Je mehr gleichgerichtete Zellulose vorhanden ist, desto größer ist der absolute Betrag der Größenänderung quer zur Faser. Daher stehen die Rohdichte und das Schwindverhalten bei Holz in proportionalem Verhältnis zueinander (Abb. 22) Um das Quellen und Schwinden von Bambus zu verstehen, muss folglich die unterschiedliche Rohdichte der Innen- und Außenseite der Halmwand betrachtet werden.

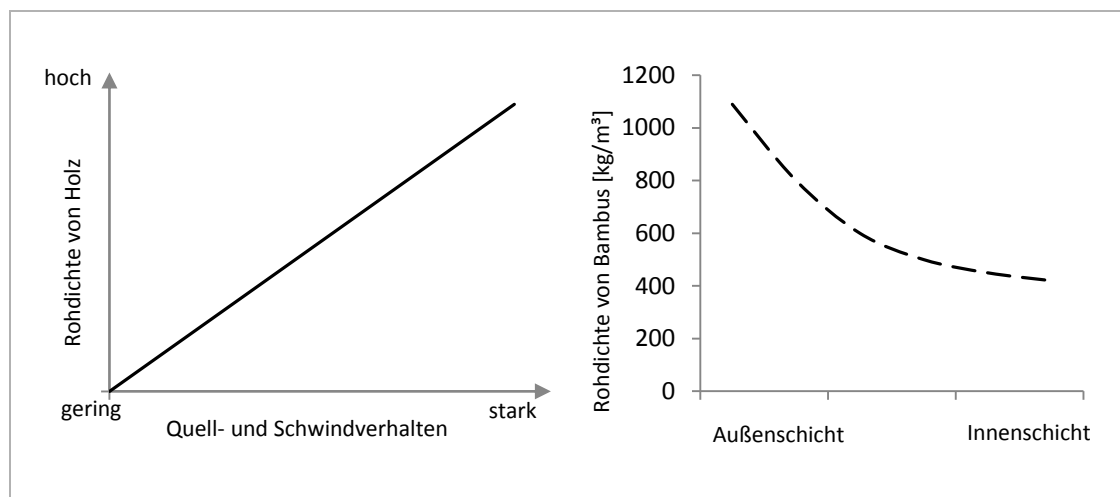


Abb. 22: Bei Holz nehmen Quell- und Schwindverhalten proportional zur Rohdichte zu (links).

Abhängigkeit der Rohdichte von der Position in der Halmwand bei Bambus (rechts) nach Janssen (8).

Die Trockenrohichte von Bambus nimmt (ebenso wie die Faserdichte) im Halmmantel von innen nach außen hin zu (vgl. 2.3). Die äußere Zone hat eine Trockenrohichte von etwa  $1,1 \text{ g/cm}^3$ , während sie auf der Innenseite nur etwa  $0,4 \text{ g/cm}^3$  beträgt.

Aufgrund der mehr als doppelt so hohen Rohdichte der Außenzone verkürzt sich der Außenumfang beim Trocknen prozentual stärker als der Innenumfang des Halmes. Dies führt schließlich dazu, dass bei abnehmender Feuchte die Außenzone zunehmend unter tangentialer Zugspannung gerät und schließlich versagt. Das lokale Versagen setzt sich axial nach beiden Rissenden fort, da hohe Spannungskonzentrationen (Kerbspannungen) an den Rissenden das weitere Aufreißen begünstigen.

Die Tatsache, dass die Rohdichte (und damit das Schwindverhalten) in der Halmwand außen und innen jeweils stark unterschiedlich ist, gilt sowohl für dicke als auch für dünne Halmwände. Bei dünnwandigen Halmen liegen die stark- und schwach-schwindenden Zonen allerdings

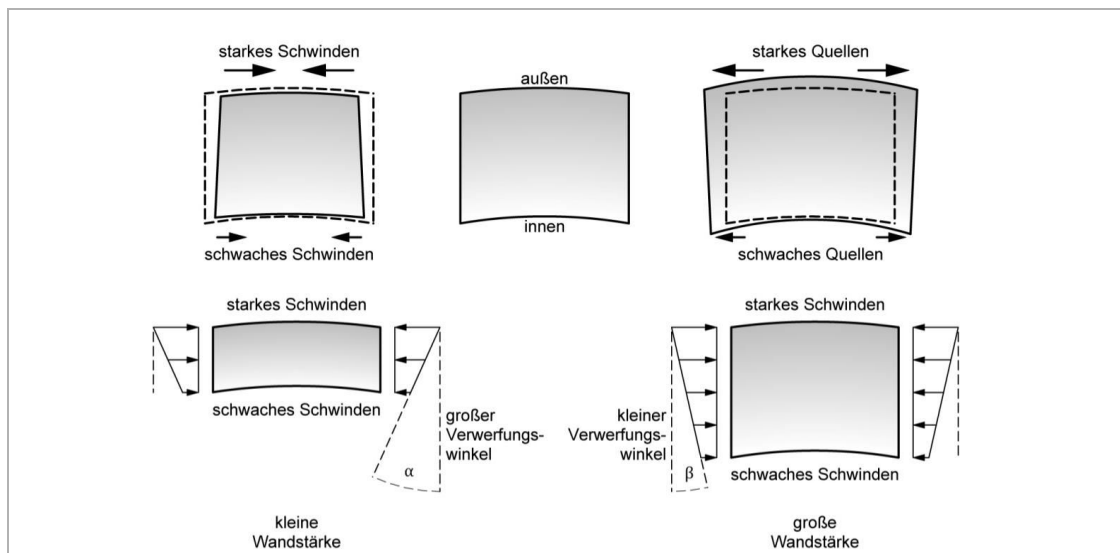


Abb. 23: Schematische Darstellung des unterschiedlichen Quell- und Schwindverhaltens der inneren und äußeren Mantelzonen (oben). Unterschiedliche Verwerfung zweier Kreissegmente in Abhängigkeit von der Wanddicke des Halmes (unten).

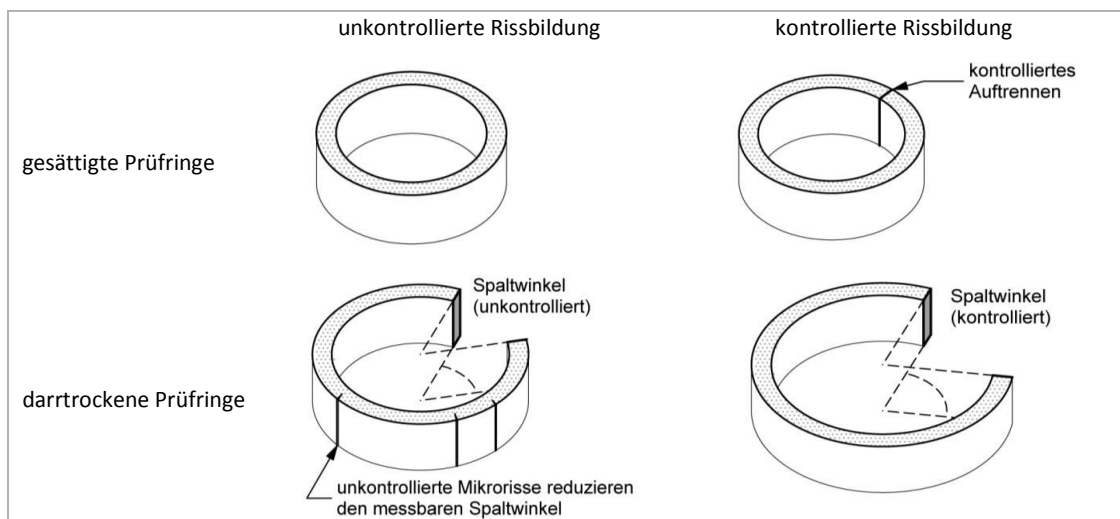


Abb. 24: Wirkung der vorherigen, kontrollierten Auftrennung beim Trockenschwindversuch.

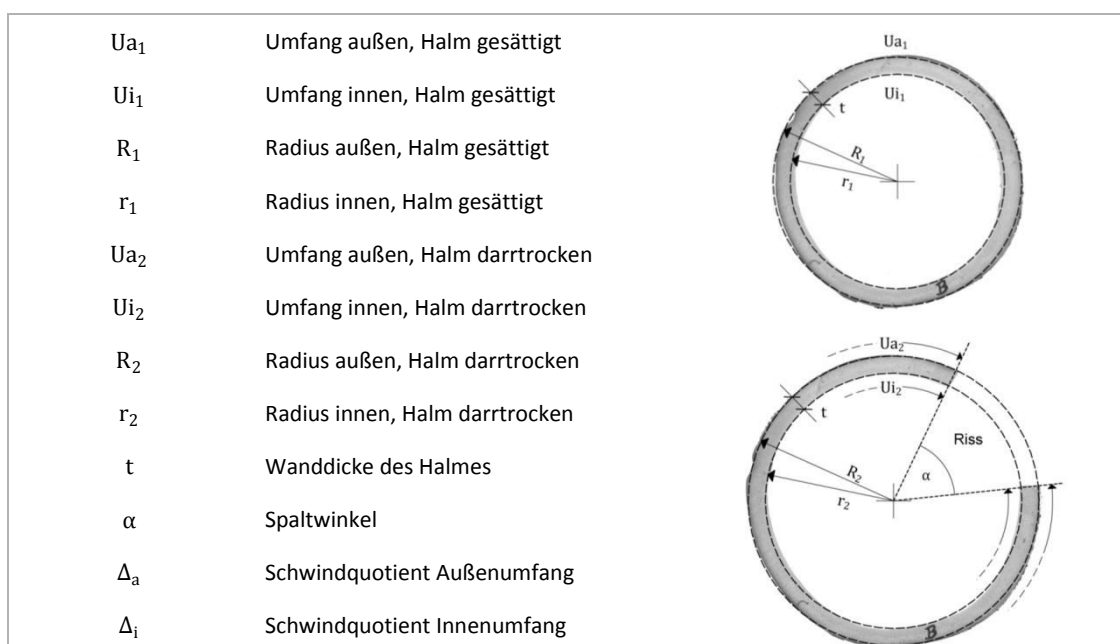


Abb. 25: Rissbildung aufgrund von Trockenschwinden; geschlossener Ring (oben), gerissener Ring (unten).

viel enger zusammen als bei dickwandigen Halmen, was bei gleichem Trocknungsvorgang eine stärkere Verwerfung der einzelnen Kreissegmente zur Folge hat (Abb. 23). Hieraus folgt die größere Rissanfälligkeit dünnwandiger Halme.

⇒ *Die Ursache für das Auftreten von Trocknungsrisen bei Bambus liegt somit im unterschiedlich starken Schwindverhalten der inneren und äußeren Halmzonen, welches wiederum aus der unterschiedlichen Faserdichte resultiert.*

Zum Schwindverhalten von runden Bambushalmen lagen dem Verfasser keine ausreichenden Daten<sup>16</sup> vor. Daher wurde eine Reihe eigener Untersuchungen angestellt und das Trockenschwinden an mehreren Halmproben beobachtet. Hierzu wurden einer Anzahl von Halmen der Gattung *Phyllostachys pubescens* 20 ringförmige Abschnitte von jeweils 2,5 cm Länge entnommen, welche unterschiedliche Durchmesser und unterschiedliche Wanddicken hatten. Die Prüfringe wurden sieben Tage in Wasser eingetaucht, mit dem Ziel, alle Fasern zu sättigen. Anschließend wurden die Ringe vermessen. Nach der Ermittlung der Ursprungsdimensionen wurden die Abschnitte an einer beliebigen Stelle mit einer Messerklinge aufgetrennt, um ein kontrolliertes Vergrößern des beigebrachten Entspannungsspalts beobachten zu können.

Vorausgegangen war dieser Maßnahme eine erfolglose Versuchsreihe, bei der auf das vorherige Auftrennen verzichtet worden war. Das hatte jedoch beim Trocknen zur Folge, dass sich vor dem Auftreten des erhofften *einen* Trocknungsrisse in jedem Prüfring zahlreiche Mikrorisse bildeten. Diese betrafen nur die äußere Schicht des Halmmantels und reichten nicht bis zur inneren Schicht hinab. Durch diese unkontrollierte Verteilung des Gesamtschwindmaßes auf viele kleine Mikrorisse wurde der messbare Öffnungswinkel des Rings reduziert. Im Vergleich zu den zuvor kontrolliert geöffneten Ringen war der messbare Spalt bei den unkontrolliert gerissenen Ringen im Durchschnitt um 10 ° bis 20 ° geringer. Dieser Betrag musste sich folglich auf die Mikrorisse verteilt haben (Abb. 24).

Nach dem Auftrennen der 20 Ringe wurden diese in einem Backofen fünf Stunden lang bei knapp über 100°C getrocknet und anschließend erneut vermessen (Abb. 25). Beim Trocknen zeigte sich, dass der Spalt dünnwandiger Halme einen größeren Öffnungswinkel annahm. Nach etwa einer Stunde waren die Ringe alle geöffnet und besaßen mehr oder weniger große Spaltwinkel. Bis zum Ablauf der Trocknungszeit traten jedoch keine weiteren sichtbaren Verformungen auf, sodass nach fünf Stunden die geöffneten Ringe entnommen und erneut gemessen wurden. Alle Ringe hatten sich verworfen und größere Krümmungsradien angenommen. Der Spaltwinkel war jedoch nicht einheitlich. Zur Ermittlung der Verformung wurde die Veränderung des gesättigten zum darrtrockenen Umfang ermittelt.

Der Außenumfang des gesättigten Halmes ( $U_{a1}$ ) kann bestimmt werden aus:

$$U_{a1} = R_1 \cdot 2\pi$$

Der Außenumfang des darrtrockenen Halmes ( $U_{a2}$ ) folgt aus der Gleichung:

---

<sup>16</sup> Die vorliegenden Daten zum Schwindverhalten werden der Halmwandstruktur von Bambus nicht gerecht, da sie in *radiales und tangentialen* Quellen und Schwinden differenzieren. Diese Unterscheidung mag bei Holz aufgrund der Markstrahlen sinnvoll sein. Für die Faserstruktur von Bambus-Internodien ist sie jedoch nicht zielführend.

$$U_{a2} = R_2 \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360^\circ}\right)$$

Als Schwindquotient für den Außenumfang ( $\Delta_a$ ) ergibt sich im Schnitt:

$$\Delta_a = \frac{U_{a2}}{U_{a1}} = \mathbf{0,940}$$

Auf gleiche Weise wird unter Verwendung von  $r_1$  und  $r_2$  für den Innenumfang vorgegangen. Der Innenumfang des gesättigten Halmes ( $U_{i1}$ ) kann bestimmt werden aus:

$$U_{i1} = r_1 \cdot 2\pi$$

Den Innenumfang des darrtrockenen Halmes ( $U_{i2}$ ) gibt die folgende Gleichung wieder:

$$U_{i2} = r_2 \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360^\circ}\right)$$

Aus den Veränderungen des Innenumfangs ermittelt sich  $\Delta_i$  im Schnitt wie folgt:

$$\Delta_i = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \mathbf{0,967}$$

Um den Einfluss der ursprünglichen Halmabmessungen auf die Schwindverformung zu bestimmen, werden folgende zwei Formeln für  $R_2$  und  $r_2$  ( $= R_2 - t$ ) miteinander gleichgesetzt:

$$R_2 = \frac{\Delta_a \cdot R_1}{1 - \frac{\alpha}{360^\circ}}$$

$$R_2 - t = \frac{\Delta_i \cdot (R_1 - t)}{1 - \frac{\alpha}{360^\circ}}$$

$$\Delta_a \cdot R_1 = \Delta_i \cdot (R_1 - t) + t \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360^\circ}\right)$$

Wird nun die Formel nach dem Spaltwinkel ( $\alpha$ ) umgeformt, ergibt sich:

$$\alpha = \left(1 - \left(\Delta_i + (\Delta_a - \Delta_i) \cdot \frac{R_1}{t}\right)\right) \cdot 360^\circ$$

Es wird deutlich, dass der Spaltwinkel  $\alpha$  direkt vom Verhältnis  $R_1/t$  abhängt. Die Halmwand im Bereich der Nodien zeigte geringere Verformungen der betrachteten Kontrollspalte. Allerdings traten weitere unkontrollierte Längsrisse an anderen Stellen im Halm auf, was auf eine Verteilung der Gesamtverformung auf mehrere kleine Nebenrisse hindeutet. Als Grund hierfür ist die stabilisierende Ebene des Diaphragmas anzusehen. Werden die gemessenen Werte  $\alpha$  und  $\frac{R_1}{t}$  gegenübergestellt, ergibt sich folgende Grafik (Abb. 27). Es ist nicht ausgeschlossen, dass unterschiedliche Bambusarten unterschiedliche Schwindquotienten ( $\Delta_a; \Delta_i$ ) besitzen und somit die Ergebnisse untereinander abweichen. Nodien haben auf das Entstehen von Schwindrissen eine gewisse Auswirkung. Durch die größere Querschnittsfläche und den andersartigen Faserverlauf stellt sich eine geringfügige Reduktion der tangentialen Zugspannung dar. Größeren Spannungen können die Nodien jedoch ebenso wenig widerstehen wie die Internodien, was die verschiedenen Rissbilder in Abb. 26 deutlich zeigen.

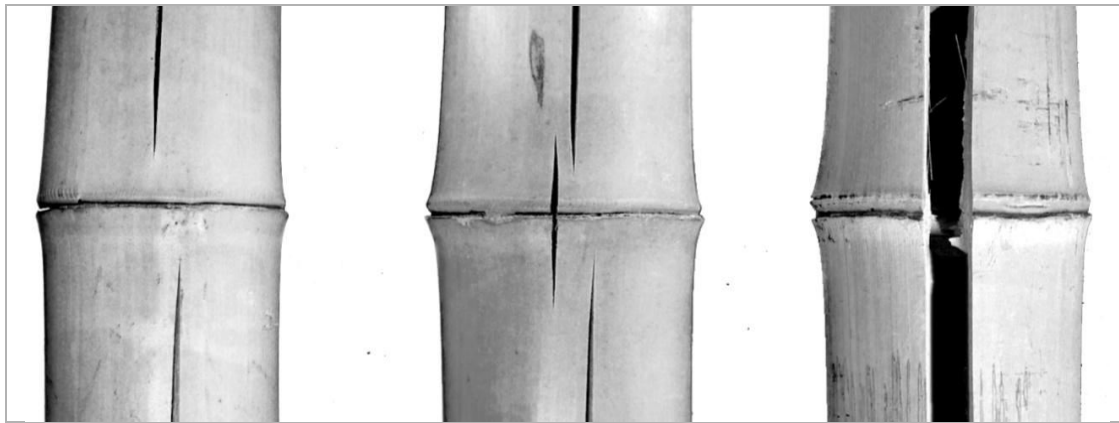


Abb. 26: Verschiedene Schwindrisse infolge von Austrocknung. Alle drei Halme wurden bei gleichen Klimabedingungen gelagert. Der Einfluss der Nodien auf die Begrenzung von Rissen ist offensichtlich gering: Am Nodium können Risse enden, verspringen oder unkontrolliert durchlaufen.

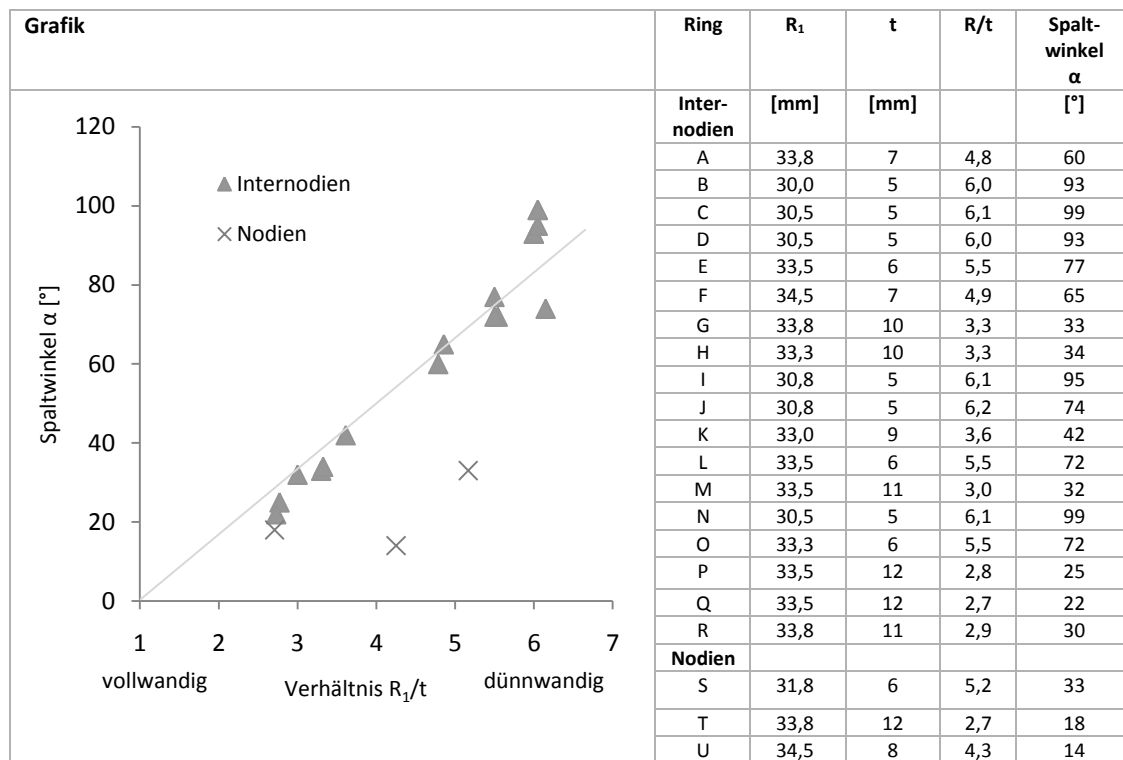


Abb. 27: Größe des Spaltwinkels  $\alpha$  in Abhängigkeit von der relativen Wanddicke  $R_1/t$ . Die Ringe wurden vorher kontrolliert aufgetrennt.

In geschlossenen Gebäuden wird sich früher oder später die Materialausgleichsfeuchte eines Wohnraumklimas einstellen. Dieses vergleichsweise trockenere Klima führt zu einer steigenden Querkzugspannung der äußeren Schichten in tangentialer Richtung und erhöht damit die Gefahr unkontrollierter Schwindrisse. Tragende Konstruktionen müssen also unter diesem Aspekt beurteilt werden. Zum Schwindverhalten lässt sich zusammenfassen:

- ⇒ Halme mit großem Durchmesser und geringer Wanddicke sind besonders durch Trocknungsrisse gefährdet.
- ⇒ Nodien können Risse nicht wirkungsvoll begrenzen.

### 2.4.8 Elastizitätsmodul

Mit der Faserdichte nimmt auch der E-Modul zur Halmwandaußenseite zu. Dies ist wenig verwunderlich, da die Steifigkeit offensichtlich von den Fasern herrührt. Auf eine durch Wind induzierte Biegebelastung bezogen ist es naturgemäß vorteilhaft, die unter starker Spannung stehenden Randbereiche zu versteifen. Der hohe E-Modul bedeutet für die Randzonen, dass auch hier mehr Spannungen angenommen werden (Steifigkeit zieht Lasten an). Dies führt angesichts der entsprechend verlaufenden Festigkeitswerte in der Halmwand zu einer gleichmäßigen Auslastung des Festigkeitspotenzials (Abb. 12).

## 2.5 Variierende geometrische Parameter von Bambushalmen

In der Auseinandersetzung mit der Verwendung von Bambushalmen als Baustoff, muss beachtet werden, dass es sich bei dem Material um ein nahezu unaufbereitetes Naturprodukt handelt. Der Vergleich zum Holzbau ist auf den ersten Blick zwar naheliegend, da auch dort eine Pflanze als natürliche Materialquelle dient, doch unterscheiden sich Baumstamm und Bambushalm nicht nur im Wachstum, sondern auch in der Aufbereitung zum Bauprodukt.

Um den Stand der Bautechnik mit Bambus nachzuvollziehen, stelle man sich die Holzbautechnik auf einer Stufe vor, bei der ausschließlich mit ungesägten Baumstämmen gearbeitet werden könnte. Es gäbe kein Sägewerk und somit weder Kantholz noch Brettschichtholz. Die einzigen Zimmermannswerkzeuge wären Axt, Bohrer, Holznagel und Strick. So etwa verhält es sich – bis auf wenige Ausnahmen – mit dem heutigen Stand der Bambusbautechnik. Mittlerweile werden zwar auch Werkstoffplatten (OSB) und laminierte Profile (LBL) aus Bambus industriell hergestellt, doch dienen letztere aufgrund des enormen Prozessaufwandes bisher nur als Sonderprodukt für Nischenanwendungen oder als Ersatz für Edelhölzer. Die Tatsache, dass Bambushalme nicht in genormten Profilgrößen verfügbar sind, erschwert die Planungsarbeit enorm und verlagert infolgedessen zwangsläufig einen Großteil der konstruktiven Entscheidungen auf die Baustelle. Improvisationsvermögen und Erfahrung der ausführenden Handwerker ist Voraussetzung, um diese Unvorhersehbarkeit auszugleichen<sup>17</sup>.

Eine Standardisierung der Bauprodukte ist folglich anzustreben. Nur durch vorhersehbare Geometrie der Bauteile lassen sich Fügpunkte exakt planen und reproduzieren. Gerade weil Bambus zum Bauen technisch kaum aufbereitet werden muss, ist es wichtig, die unvermeidlichen, natürlichen Varianzen der Halmformen besonders zu berücksichtigen. Es gilt eine diesbezüglich angemessene Konstruktionsweise zu wählen. Zwei Möglichkeiten im Umgang mit natürlichen Halmvarianzen ergeben sich dabei:

1. Möglichkeit:  
Die Konstruktion reagiert vor Ort mit Anpassung auf alle geometrischen Abweichungen der Halme (bisher praktizierte Konstruktionsweise).
2. Möglichkeit:  
Die Konstruktion bezieht sich ausschließlich auf exakt und einfach zu kontrollierenden Parameter der Bambusgeometrie (angestrebte Konstruktionsweise).

---

<sup>17</sup> Ohne Zweifel erwachsen aus diesem Mangel an ingenieurtechnischen Möglichkeiten die schönsten Zweige der Handwerkskunst und Kultur, wie es Beispiele traditioneller Holzverbindungen beweisen. Nicht ohne Grund wird heute der Niedergang des Holzhandwerks beklagt. Doch ebenso wenig besteht Zweifel daran, dass der technische Fortschritt neue Möglichkeiten des Bauens ermöglicht.

Zur Eingrenzung der exakt und einfach zu kontrollierenden Parameter bedarf es einer Übersicht der variablen und konstanten Geometriefaktoren von Bambushalmen.

⇒ *Die wichtigste Voraussetzung für eine verlässliche Planung ist die Vorhersehbarkeit der Bauteilparameter.*

### **2.5.1 Rotationssymmetrie**

Obwohl Bambushalme generell als runde Rohre angesehen werden können, weisen sie dennoch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abweichung von der Rotationssymmetrie auf. Bambusarten der Gattung *Phyllostachys* besitzt in Wuchsrichtung, oberhalb der Nodien, die Spur der abgehenden Blattstiele (7). Die Blattstiele liegen anfangs sehr eng am Halm an und sind von der Blattscheide umhüllt. Die Halmwand ist hier dünner und weicht nach innen zurück (vgl. Schnitte B bis D in Abb. 28). Es bildet sich die charakteristische Längskerbe (lat. *sulcus*) im Internodium, welche sich bis zum nächst höheren Nodium wieder ausrundet. Unterhalb des abzweigenden Blattstiels ist die Halmwandung hingegen dicker ausgebildet (vgl. Schnitt A in Abb. 28). Da bei Bambus die Blätter gewöhnlich wechselständig sind, ergibt sich oberhalb des nächsten Nodiums das gleiche Bild der Längskerbe auf der gegenüberliegenden Halmseite. Im unteren Halmbereich fehlen diese Kerben jedoch gänzlich, da dort auch keine Blattstiele zu finden sind. Höhe des Halmwachstums und Ansatz des untersten Blattstiels hängen zusammen, bei höher wachsenden Halmen findet sich eine größere Zahl von Internodien ohne Blattstielkerbe.

Auch durch äußere mechanische Einflüsse kann der Halm während des Wachstums oder der Lagerung von der ideal-zylindrischen Form abweichen und gegebenenfalls abflachen. Schließlich kann auch durch einseitiges Austrocknen, zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung, der Querschnitt verformt werden bis hin zum Auftreten von Trocknungsrisen, an denen sich die lokalen Spannungen entladen. In der Folge verwerfen sich die Rissflanken und damit auch der Rotationskörper.

⇒ *Von rotationssymmetrischen Querschnitten kann bei Bambus nicht ausgegangen werden.*



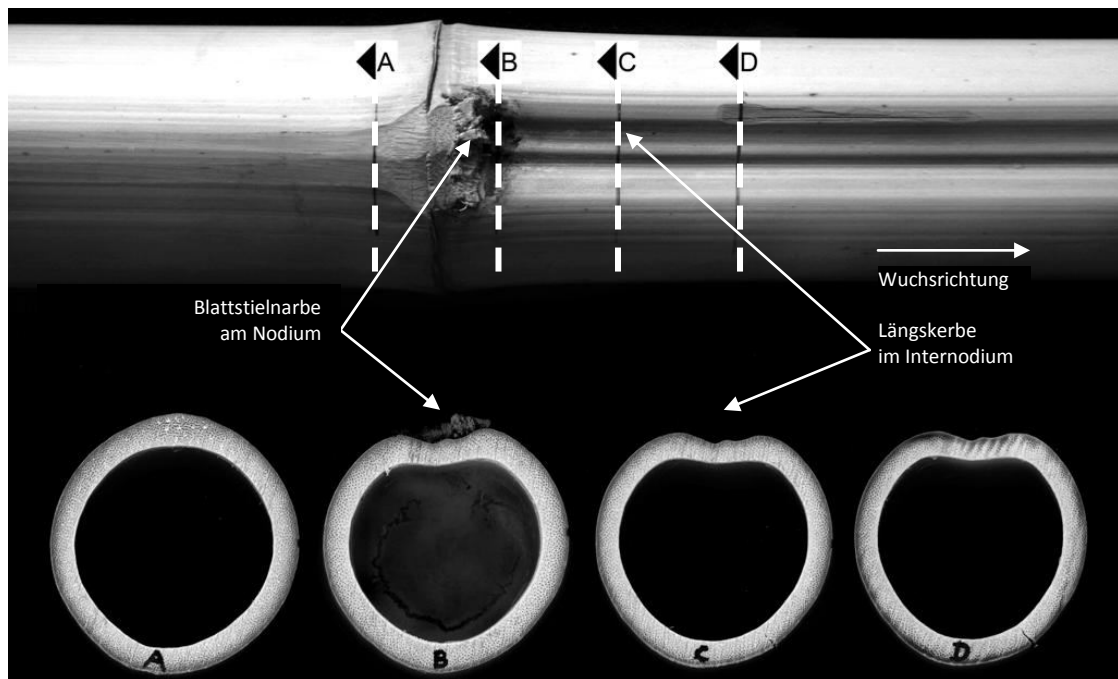


Abb. 28: Abweichung von der Rotationssymmetrie des Rohrquerschnitts am Nodium.



Abb. 29: Abweichung von der Rotationssymmetrie durch Trocknungsrisse und Verformung durch Querpressung während der Lagerung.

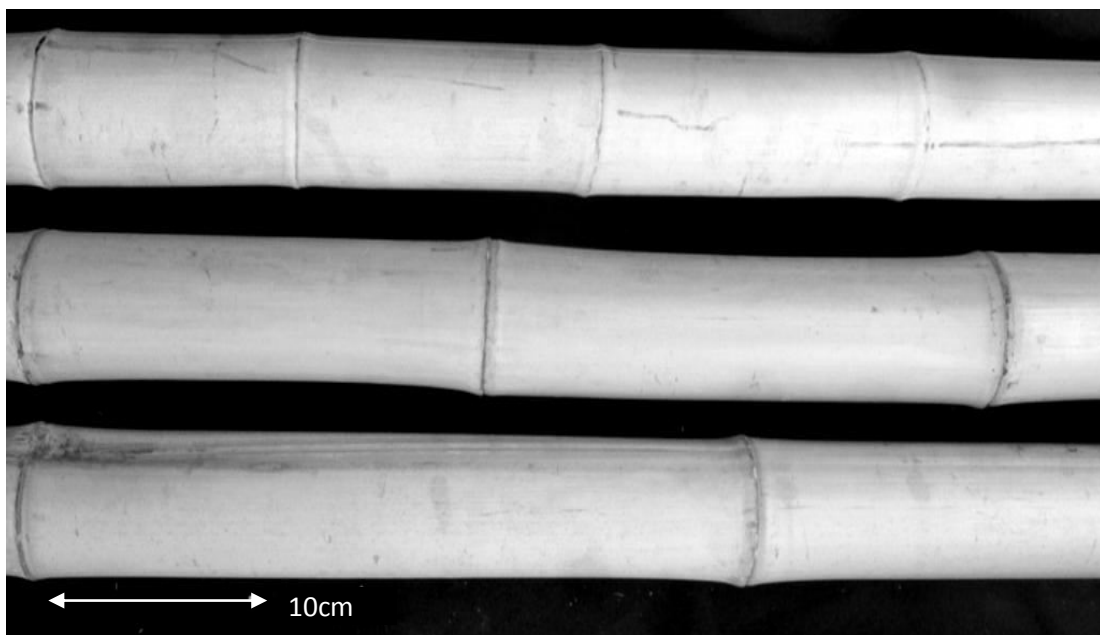


Abb. 30: Längenvergleich der Internodien an verschiedenen Abschnitten eines Halmes der Art „Moso“ (*Phyllostachys pubescens*).

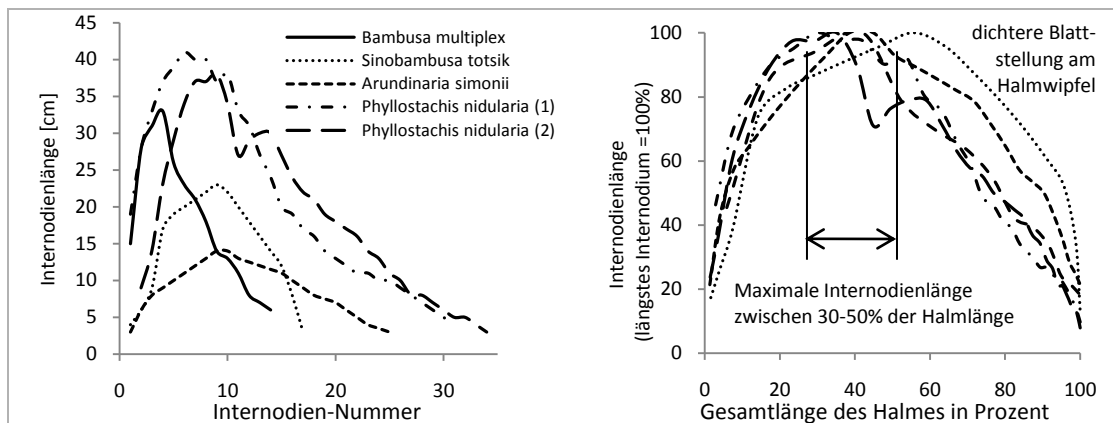


Abb. 31: Entwicklung der Internodienlängen in Bezug auf die Internodien-Nummer verschiedener Bambusarten. Zusammenfassung mehrerer Grafiken nach McClure (7) (links). Prozentuale Entwicklung der Internodienlängen in Bezug auf die Gesamtlänge verschiedener Bambusarten (rechte Grafik umgeformt auf Datengrundlage der linken Grafik).

### 2.5.2 Internodienlänge

Über die gesamte Halmlänge betrachtet nimmt die Länge der einzelnen Internodien vom Rhizomhals in Richtung Spitze erst stark zu, bevor sie etwa ab der Halmmitte wieder abnimmt (Abb. 30). Die unterschiedlichen Längen der Internodien führen dazu, dass konstruktive Anschlussdetails, die auf die Nähe von Nodien angewiesen sind, nicht planmäßig angeordnet werden können, sondern sich entweder nach den vorhandenen Nodien richten oder entsprechende Halme vorsortiert werden müssen, bei denen die Nodien an den gewünschten Stellen liegen. McClure (7) hat in den 1960er Jahren verschiedene Bambusarten vermessen und die Internodienlänge in Bezug auf die Position am Halm dargestellt. Es zeigen sich charakteristische Kurven, die sich in Bezug auf die absolute Länge der Nodien und die Gesamtlänge der Bambushalme deutlich unterscheiden.

Dennoch folgen die verschiedenen Entwicklungen der Internodienlängen einer gemeinsamen Grundtendenz (Abb. 31). Vergleicht man die relativen Internodienlängen in Bezug auf das längste Internodium im Halm, zeigen sich über die gesamte Halmlänge wieder ähnliche Verläufe. Betrachtet man die Anzahl der Nodien, die auf einen Meter Halmlänge liegen, fällt auf, dass diese Nodiendichte zur Halmbasis besonders groß ist (vgl. 2.5.7). Unter statischer Betrachtung gibt es einen Zusammenhang von Nodiendichte und Schubkraft am eingespannten Stab. Die Zunahme der Nodiendichte zur Halmspitze erklärt sich dagegen aus den dichteren Blattstellungen mit stets kürzer werdenden Blattspreiten in der Halmkrone.

⇒ *Es kommen innerhalb eines Halmes kaum zwei Internodien gleicher Länge vor.*

### 2.5.3 Krümmung

Bambuspflanzen wachsen entsprechend der jeweiligen Standortbedingungen. Zu Bauzwecken eignen sich jedoch vornehmlich gerade Stäbe, stark gekrümmte Halme werden nur verwendet, wenn eine solche Krümmung erwünscht ist. Eine Vorsortierung findet daher schon bei der Ernte statt. Für die Verwendung von Bambus zu Bauzwecken gibt es bisher keine Normung oder Einteilung in Sortierklassen, wie dies beim Holz der Fall ist. Die Krümmung hat aber als Stab-Imperfektion einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Tragfähigkeit. Auf die Geradheit des Halms hat auch die Stellung der Blattstiele eine Auswirkung: Der Bambushalm erfährt am Nodium, an dem die gestielten Blattspreiten entspringen, eine leichte Auslenkung.

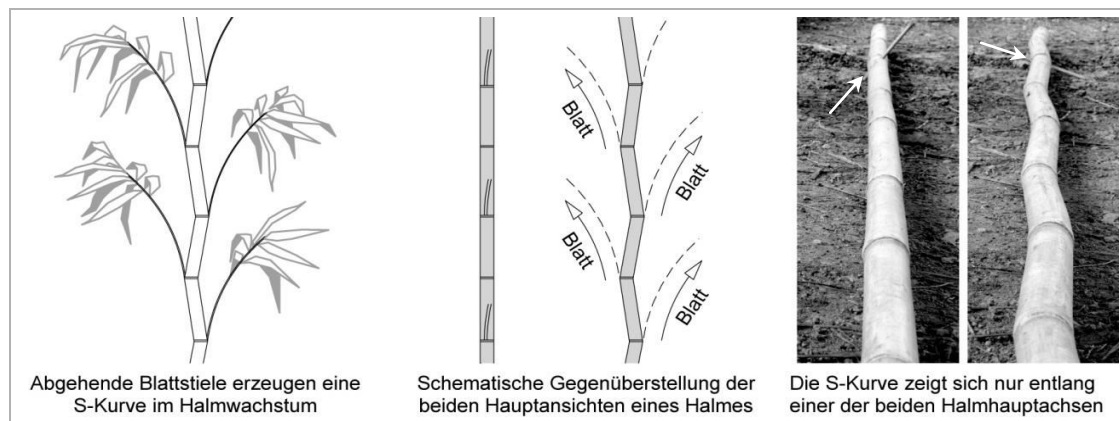


Abb. 32: Krümmung des Halmes durch abgehende Blattstiele. Im Foto ist oben im Halm ein Dübel mit Pfeil zu erkennen, der die jeweilige Orientierung (90° nach rechts gedreht) verdeutlicht (äthiopischer Hochland-Bambus *Arundinaria alpina*).

Durch die zweizeilige Wechselständigkeit der Blätter entspricht der Halm somit nicht einem geraden Stab, sondern einer einachsigen, mehrfachen S-Kurve. Diese geometrische Besonderheit ist konstruktiv nicht zu vernachlässigen. Sie hat zum Beispiel Auswirkungen auf die Fügung zweier Halme parallel zueinander. Der Abstand zweier solcher Elemente schwankt nicht nur durch die Verdickung der Nodien, sondern auch durch die dem Halm eigne S-Kurve.

Aufgrund der unterschiedlichen Internodienlängen zweier Halme lassen sich diese Kurven unmöglich in absolute Deckung bringen. Folglich sollten die jeweils ungekrümmten Halmflanken in der Konstruktion aneinandergrenzen.

⇒ *Bambushalme kommen unterschiedlich stark gekrümmt in der Natur vor.*

#### 2.5.4 Außendurchmesser

Bambushalme haben im Gegensatz zu Bäumen keinerlei Breitenwachstum. Der Spross besitzt schon den Durchmesser des späteren Halms. Vom Rhizom schießen jedes Jahr an verschiedenen Stellen neue Halme auf, die umso dicker und stärker sind, je älter das Rhizom wird. Diese Entwicklung dauert so lange, bis die für die Art maximale Größe erreicht ist. Neue Bambushalme an einem jungen Rhizom-Standort sind nur von bescheidenem Durchmesser, während die in den Folgejahren aufschießenden Halme jeweils größere Durchmesser aufweisen. Grund hierfür ist, dass die späteren Halme auf die Photosynthese-Produkte des gesamten Rhizoms zurückgreifen können und somit über eine stärkere Ausgangsposition verfügen.

Wie bereits zuvor dargestellt, verjüngen sich Bambushalme zur Spitze hin deutlich. Geometrisch betrachtet liegt deshalb über die gesamte Länge der Sprossachse kein Zylinder, sondern ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Konus vor. Bei manchen Bambusarten ist der Halmdurchmesser von der Basis bis zur Halmmitte relativ konstant und nimmt erst von dort nach oben hin ab. Daraus folgt eine starke Streuung der Querschnittsgrößen – nicht nur zwischen verschiedenen Halmen, sondern auch innerhalb eines einzelnen Halmes. Bei kürzeren Ausschnitten aus dem mittleren Halmbereich sind die absoluten Differenzen des Durchmessers, zwischen dünnem und dickem Ende, nicht besonders ausgeprägt – an den Enden von längeren Stäben lassen sich diese Unterschiede jedoch nicht übersehen. Neben der Konus-Form ist an allen Nodien die Narbe der Blattscheide als besondere Wulst zu beobachten. Diese beeinflusst den Durchmesser ebenfalls (Abb. 33).

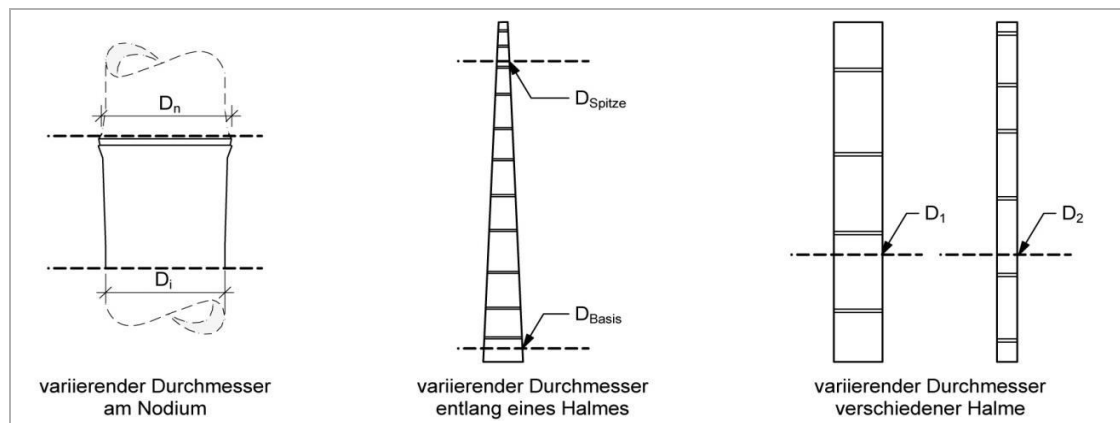


Abb. 33: Verschiedene Gründe für variierende Durchmesser von Bambushalmen.

Die an Bambushalmen zu beobachtenden Durchmesser variieren somit aus folgenden Gründen:

- An allen Nodien führen die Blattscheidennarben zu ringförmigen Verdickungen.
- Der Durchmesser eines Halmes verjüngt sich zur Spitze hin.
- Verschiedene Halme haben verschiedene Basisdurchmesser.

Um im Handel mit Bambushalmen dennoch eine gewisse Sortierung nach Dimensionen zu ermöglichen, werden die Halme stets über den Querschnitt des dickeren Endes definiert. Es scheint ein natürlicher Zusammenhang zu bestehen zwischen der Halmlänge und dem Durchmesser des Halmes<sup>18</sup>.

⇒ *Bambus besitzt keinen einheitlichen Außendurchmesser.*

### 2.5.5 Wanddicke

Die Mehrzahl der zu Konstruktionen verwendeten Bambusarten ist hohl. Einzelne Bambusarten weisen über die gesamte Länge einen Vollquerschnitt auf, andere nur im unteren Bereich, unmittelbar am Rhizomhals.

Bei den Bambusarten mit hohlem Internodium kann in den mittleren Bereichen das Verhältnis von Durchmesser zu Wandungsstärke grob mit etwa  $D/t = 10/1$  angegeben werden, wobei natürliche Varianz und Bambusart einen großen Einfluss haben. An der Halmbasis ist die Wanddicke jedoch stets größer und damit  $D/t < 10/1$ . Abgesehen davon ist die Wandung unmittelbar ober- und unterhalb der Nodien durch Aufweitung dicker als in der Mitte der Internodien. Der Rohr-Innendurchmesser variiert daher ebenso wie der Außendurchmesser (Abb. 34).

⇒ *Bambus besitzt keine einheitliche Wanddicke.*

### 2.5.6 Flächenträgheitsmoment

Maßgebend für die Steifigkeit eines Stabes ist dessen Flächenträgheitsmoment ( $I$ ). Bei einem zylindrischen Rohr ergibt sich dieser Wert aus folgender Gleichung:

$$I [\text{cm}^4] = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$$

<sup>18</sup> In Japan werden die Halmlängen grob abgeschätzt mittels der Formel: "Umfang des Internodiums in Augenhöhe multipliziert mit dem Faktor 60." Lopez (13) überprüfte diese Faustformel und erhielt dabei als Mittelwert 58,2.

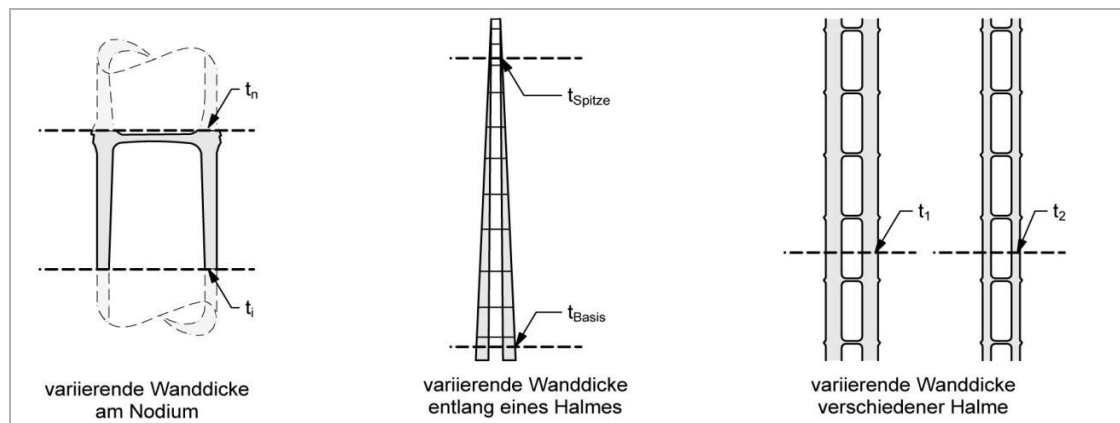


Abb. 34: Verschiedene Gründe für variierende Dicken der Halmwand.

Da bei Bambus Außendurchmesser ( $D$ ), und Innendurchmesser ( $d$ ) über die Länge des Halmes variieren, kann einem Bambushalm kein eindeutiger Steifigkeitswert zugeordnet werden. Am dicken und dünnen Stabende können zwar die benötigten Querschnittsgrößen abgegriffen werden, dennoch folgt daraus keine verlässliche Aussage über die Werte im Bereich dazwischen.

Um die Entwicklung der Steifigkeit entlang der Halmlänge exemplarisch abbilden zu können, wurde ein Bambushalm von 500 cm Länge in Segmente geschnitten, welche jeweils von der Mitte eines Internodiums bis zur Mitte des darauffolgenden reichten (Abb. 36). An den entstehenden Schnittflächen der Internodien wurden anschließend Durchmesser und Wandstärke ermittelt und in Bezug auf ihren Abstand zur Halmbasis<sup>19</sup> miteinander verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Außendurchmesser auf den vorliegenden fünf Metern Halmlänge zur Spitze hin nahezu linear abnahm. Die Wanddicke ( $t$ ) hingegen war im unteren Bereich überproportional dicker, als im oberen Bereich. Aus den gemessenen Werten wurde das jeweilige Flächenträgheitsmoment ermittelt und in Abb. 35 als Kurve dargestellt. Die Entwicklung der gemessenen Werte liegt mit hoher Genauigkeit entlang einer logarithmischen Kurve, welche folgende Funktion besitzt:

$$I = -32,29 \ln(h) + 223$$

Setzt man die Kurve nach den beiden unbekanntenen Enden des Halmes fort, so lässt sich auf eine ursprüngliche Halmlänge von 10,24 m schließen. Zur Halmbasis, weist die Kurve in den unteren 25 cm auf eine vermutliche Verdopplung des Flächenträgheitsmoments auf  $228 \text{ cm}^4$  hin, was bei einem Halmdurchmesser von 8 cm durchaus zutreffen könnte. Die von Lopez (13) vorgeschlagene Formel zur Abschätzung der Halmlänge ergibt, bei Einsetzen des Durchmessers 6,5 cm in 1,60 m Höhe, eine vermutliche Gesamthöhe von 11,88 m. Das Extrapolieren in Richtung beider Enden stellt vorerst nur eine Vermutung dar, die Messwerte eines einzelnen Halmes sind nicht repräsentativ, um allgemeingültige Aussagen zu treffen.

Um diesen Aspekt natürlicher Variabilität durch Formeln berechenbar zu machen, bedarf es weiterer Forschungen, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden.

<sup>19</sup> Der tatsächliche Abstand zur Erdoberfläche konnte nicht ermittelt werden, da der Halm aus dem Handel bezogen wurde und die Einschlaghöhe beim Fällen somit unbekannt war. Üblicherweise wird ein Halm in weniger als 30 cm Höhe über dem Boden gefällt. Der 90°-Bogen des gekrümmten Rhizomhalses, welcher noch deutlich über die Erdoberfläche reichen kann, wird bei der Ernte möglichst entfernt, um gerade Halme zu erhalten.

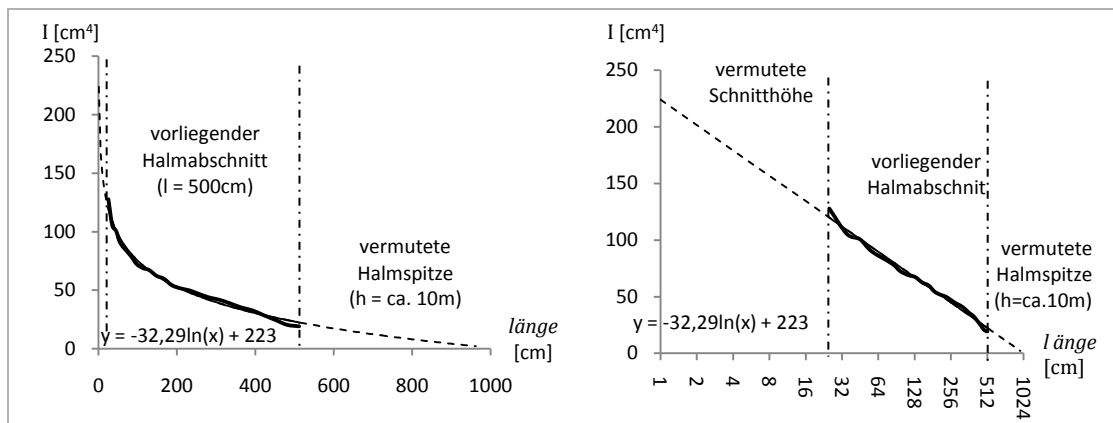


Abb. 35: Entwicklung des Flächenträgheitsmoments entlang der Halmlänge und die vermuteten Werte der fehlenden Abschnitte (rechte Grafik: X-Achse mit logarithmischer Folge).

Das Mittel der an beiden Enden gemessenen Werte, kann nicht als Durchschnittswert angenommen werden, da die Steifigkeitsabnahme, vom unteren Halmende aus betrachtet, besonders stark ausgeprägt ist. Deutlich wird aus den Werten an dieser Stelle lediglich folgendes:

- ⇒ *Das Flächenträgheitsmoment nimmt im Halmverlauf stark ab.*
- ⇒ *Es finden sich entlang eines Halmes keine zwei Querschnitte mit gleichem Flächenträgheitsmoment.*

### 2.5.7 Gegenüberstellung der geometrischen Kenngrößen

Während McClure ganze Pflanzen vom Rhizom bis zur Spitze vermessen hat, ist im Folgenden eine fünf Meter lange Bambusstange der Art *Phyllostachys pubescens*, wie sie typischerweise auch zum Bauen genutzt wird, dargestellt (Tab. 3).

Der sehr schlank zulaufende Wipfel des Bambushalmes wurde nach der Ernte entfernt, weshalb die zur Spitze hin zunehmende Nodiendichte (abnehmende Internodienlänge) nicht abgebildet werden kann. Es ist davon auszugehen, dass der Halm nur etwa mit der Hälfte der natürlichen Gesamtlänge vorliegt, da ab Halmmitte naturgemäß die Internodienlänge wieder abnimmt (vgl.2.5.2).

Deutlich erkennbar ist die Abnahme aller wichtigen Kenngrößen ab der Basis. Nodiendichte, Außendurchmesser, Wanddicke, Querschnittsfläche, Flächenträgheitsmoment und Trägheitsradius lassen sich mechanisch nicht beeinflussen oder verändern. Es kann lediglich sortiert werden. Daraus folgt:

- ⇒ *An einem Bambushalm kann als einzige geometrische Größe die Länge exakt kontrolliert werden.*

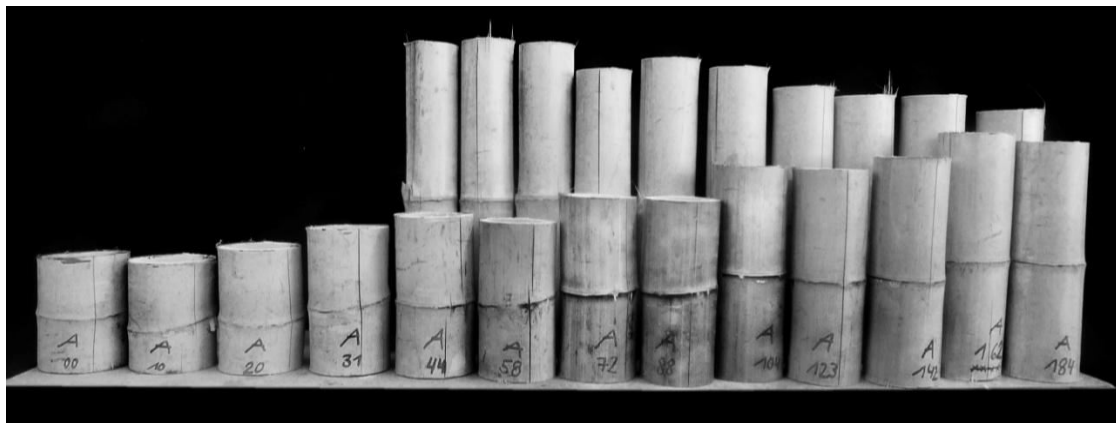


Abb. 36: Die einzeln aufgestellten Abschnitte eines 500 cm langen Bambushalmes, welche jeweils von der Mitte eines Internodiums bis zur Mitte des nächsten reichen. Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Internodienlänge und die Abnahme des Durchmessers (vordere Reihe v.l.n.r., hintere Reihe umgekehrt).

Internodiennummer	Position entlang des Halmes	Internodienlänge	Nodiendichte	Außendurchmesser	Wanddicke	Querschnittsfläche	Flächenträgheitsmoment	Trägheitsradius
				D	t	A	I	i
	[cm]	[cm]	[n/m]	[mm]	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm]
2	0	10,0	10,0	77	11,5	23,5	127,90	2,33
3	10	10,0	10,0	74	10,0	20,1	105,45	2,29
4	20	11,0	9,1	73	10,0	19,8	100,66	2,25
5	31	13,0	7,7	72	9,0	17,8	90,17	2,25
6	44	14,0	7,1	73	9,0	18,0	92,31	2,26
7	58	14,0	7,1	70	8,5	16,4	79,12	2,19
8	72	16,0	6,3	69	8,0	15,3	72,53	2,17
9	88	16,0	6,3	68	8,0	15,1	69,06	2,14
10	104	19,0	5,3	68	8,0	15,0	67,37	2,12
11	123	19,0	5,3	66	8,0	14,6	62,46	2,07
12	142	20,0	5,0	66	7,5	13,8	59,93	2,08
13	162	22,0	4,5	65	7,0	12,8	54,41	2,06
14	184	23,0	4,3	66	7,0	12,9	55,82	2,08
15	207	24,0	4,2	64	6,5	11,6	47,88	2,02
16	231	26,0	3,8	64	6,5	11,6	47,88	2,02
17	257	26,0	3,8	63	6,5	11,4	45,43	1,99
18	283	27,0	3,7	62	6,5	11,2	43,06	1,95
19	310	28,0	3,6	60	6,0	10,2	37,56	1,92
20	338	29,0	3,4	59	6,0	10,0	35,53	1,88
21	367	28,0	3,6	57	6,0	9,6	31,69	1,81
22	395	30,0	3,3	57	5,5	8,9	29,84	1,83
23	425	31,0	3,2	54	5,5	8,4	24,96	1,72
24	456	31,0	3,2	52	5,0	7,4	20,62	1,67
	487			51	5,0	7,2	19,34	1,63

Tab. 3: Halmgeometrie eines 5 m langen Halmabschnitts der Art *Phyllostachys pubescens*.

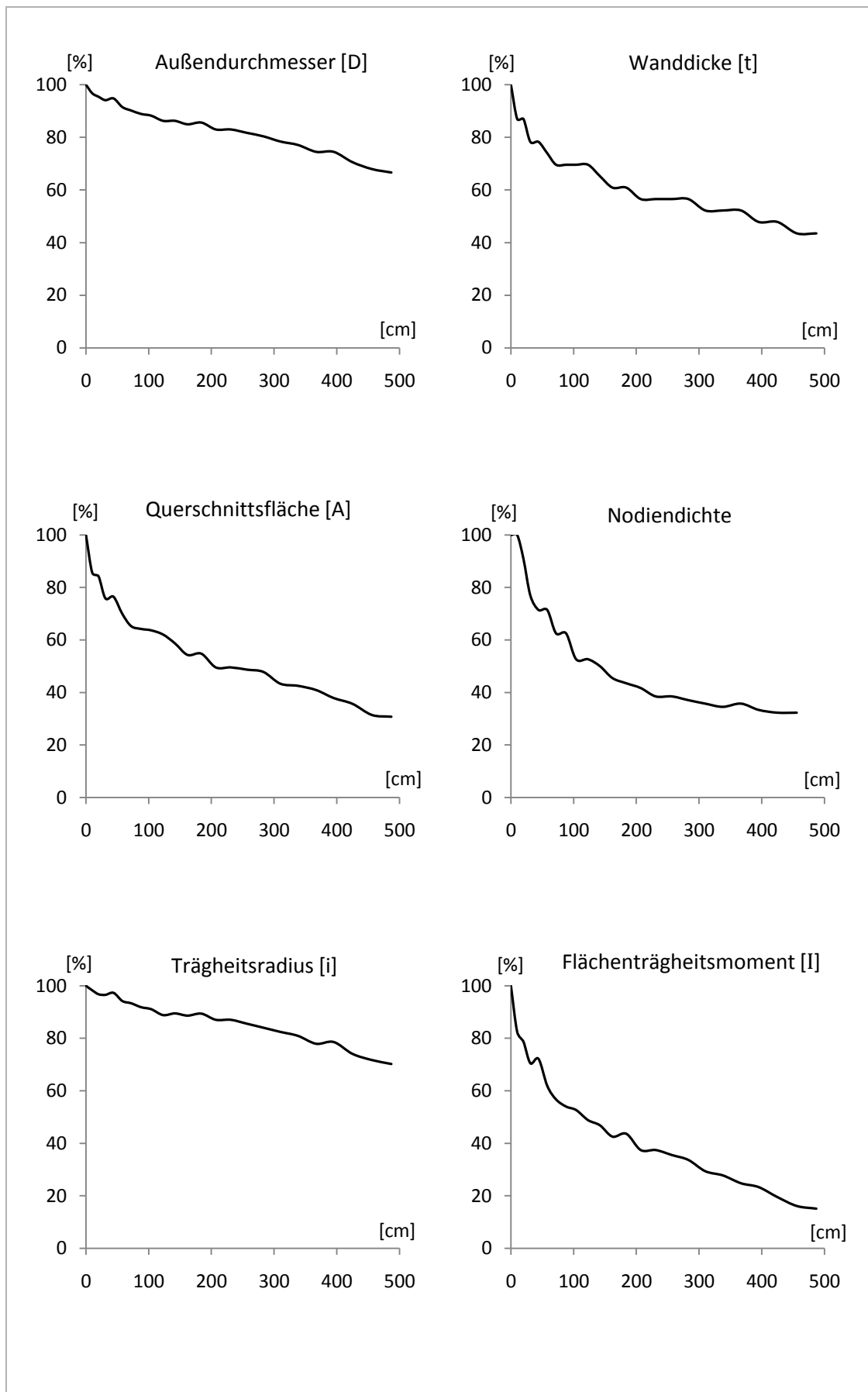


Abb. 37: Darstellung der einzelnen geometrischen Kenngrößen und deren relative Entwicklung. Y-Achse: Prozent des Wertes in Bezug auf die Halmbasis (100 %). X-Achse: Position entlang der Halmlänge in cm.



### 3 Prinzipielle Arten der Krafteinleitung

Bevor ein Verbesserungsvorschlag für Bambus-Fügetechniken vorgelegt werden kann, bedarf es einer vergleichenden Analyse der grundsätzlich möglichen Fügeprinzipien im Bambusbau. Für jede mögliche Stabanordnung lassen sich mehrere mögliche Fügeverfahren denken, die zudem noch untereinander kombiniert werden können, weshalb theoretisch eine unendlich große Anzahl möglicher Fügepunktausbildungen denkbar wäre.

Einfacher ist es daher, auf die *grundsätzlichen Arten der Krafteinleitung* in Bambus zu schauen und diese in Hauptgruppen zu gliedern (Abb. 38).

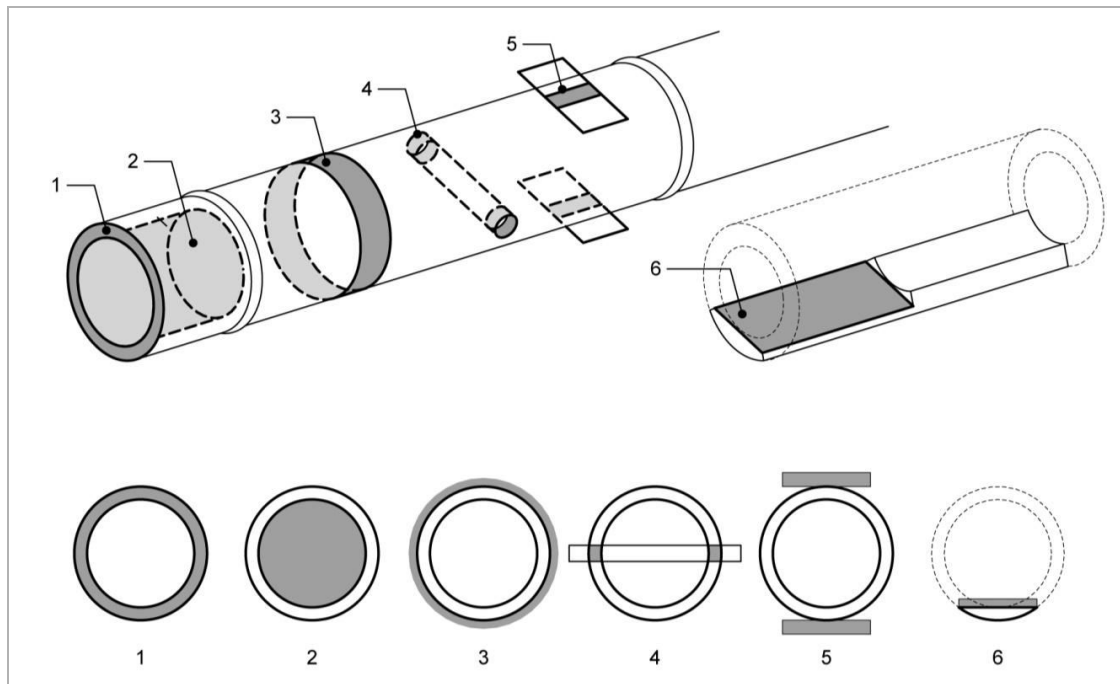


Abb. 38: Schematische Darstellung möglicher Krafteinleitung am Bambusquerschnitt.

Die Möglichkeiten der Krafteinleitung resultieren aus der Halmgeometrie. Nicht alle Knotenarten können alle Kräfte übertragen. Es ist also eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Eignung nötig (Abb. 39).

Gruppe	Knotenart	Krafteinleitung	übertragbare Kräfte		
			Druck (axial)	Zug (axial)	Querkraft
1	<b>Stirnkontakt</b>	Faserenden der Stirnfläche	+++	++ (Keilzinken)	++ (Keilzinken)
2	<b>Kammerfüllung</b>	Diaphragma	++	++	++
3	<b>Schelle</b>	Halmmantel Reibung	+	+	++
4	<b>Dübel</b>	Lochleibung	+	+	+
5	<b>Stapelung</b>	Querpressung der Halmwand			+
6	<b>geleimte Spalte</b>	geebnete Halminnenwand	+	+++	+

Abb. 39: Tabellarische Aufzählung der verschiedenen Krafteinleitungsarten und ihre Bewertung mit möglich (+), geeignet (++) und hervorragend (+++).

### **3.1 Stirnkontakt**

Durch die gerichtete Faserstruktur besitzt Bambus eine enorme Festigkeit in Faserrichtung, welche mittels Kontakt der Stirnflächen voll ausgenutzt werden kann. Ohne zusätzliche Maßnahmen lässt sich jedoch nur Druckkraft auf diese Weise in die Faserenden einleiten. Der Kontaktbereich ist idealerweise eine ebene Fläche, die durch einen Sägeschnitt einfach hergestellt werden kann. Zur Übertragung axialer Druckkräfte sollten beide Enden des Stabes planparallele Schnittflächen aufweisen, die orthogonal zur ideellen Stabachse stehen (vgl. 7.3.2). Schräge Schnittflächen erzeugen entsprechend einen seitlichen Abtrieb und Spannungsspitzen. Zur Übertragung axialer Druckkräfte ist der Stirnkontakt am besten geeignet.

#### **Fischmaul-Anschluss**

In traditioneller Fügetechnik werden Halme an den Stirnflächen zum Teil konkav ausgerundet, um als angeschmiegttes Auflager den daraufgelegten Stäben einen günstigeren Kraftübertrag zu ermöglichen und gleichzeitig ein seitliches Abrutschen zu verhindern. Ein solcher "Fischmaul-Anschluss" hat den Vorteil, dass der von ihm getragene Halm in der Röhrenform gestützt wird (15). Beim Querkraftübertrag ist der Halm somit weniger von kritischer Querverpressung betroffen (vgl. 4.1.2). Um alle Faserenden mit dem darauf liegenden Halm in Kontakt zu bringen, müssen Ausrundung und Halmform einander exakt entsprechen. Ist der Radius des Halmes größer als der Radius des Fischmauls, werden die Fasern im Fischmaul auseinandergetrieben. Wenn der Radius des Halmes zu klein ist, kann die Ausrundung nicht die stabilisierende Wirkung entfalten und der Halm ruht faktisch auf nur einem Punkt. Angesichts der natürlichen Varianz der Halmdurchmesser sind für die Herstellung passender Fischmaulanschlüsse entsprechende Werkzeuge auf der Baustelle vorzuhalten. Improvisierende handwerkliche Anpassung auf der Baustelle prägt diese Technik.

#### **Keilzinken**

Im Rahmen dieser Arbeit sind Versuche unternommen worden, Bambushalme und Holzquader an den Stirnflächen mittels Keilzinken so zu verbinden, dass sie zusätzlich zur Druckkraft auch Zugkraft und Querkraft übertragen können. Auf diese Technik wird in Abschnitt 5.1.2 näher eingegangen.

### **3.2 Kammerfüllung**

Der Hohlraum im Halminneren erschwert die Krafteinleitung von der Halmaußenseite. Eine Querverpressung der Röhre, zu geringe Lochleibungsflächen und exzentrische Krafteinleitung sind einige der Probleme, die eine Kammerfüllung – und damit eine Lasteinleitung innerhalb des Halmes – als notwendig erscheinen lassen. Der Kraftübertrag über die Kammer kann dabei auf drei unterschiedliche Arten erfolgen:

1. Halmwandinnenseite
2. Diaphragma
3. Diaphragma und Halmwandinnenseite zusammen

Um die Hohlräume im Halminneren auszufüllen, bedarf es eines Füllstoffs, der sich an die unterschiedlichen Abmessungen verschiedener Halme anpassen kann. Häufig wird hierfür ein fließfähiger Zementmörtel verwendet, der aushärtet und anschließend durch Kontakt Druckkräfte auf das Diaphragma überträgt.

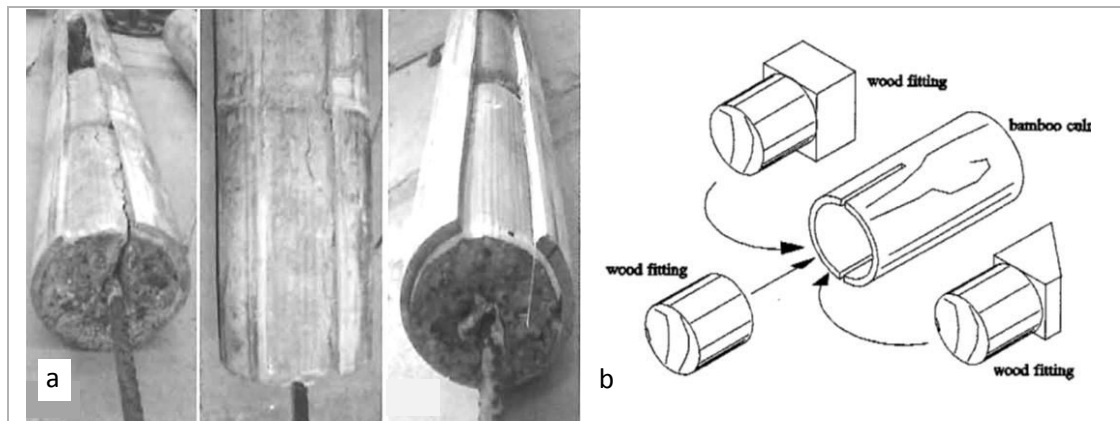


Abb. 40: a) Betonfüllung mit Polyurethan-Haftbrücke nach Garrecht (16). b) Vorschlag von Holzfittings als Füllkörper nach Acre-Villalobos (17).

Die Last wird mittels eingelegter Stahlteile oder Dübel in den Mörtel eingeleitet. Es gibt auch Ansätze, bei denen versucht wird, durch Entfernen des feinen Häutchens auf der Halmwandinnenseite und Verwendung einer Haftbrücke auf Basis einer Polyurethan-Sand-Mischung, axiale Lasten mittels Scherbeanspruchung von innen in die Halmwand einzuleiten (16).

Weiterhin sind Versuche mit eingeleimten Holzzylindern unternommen worden (17). Eine Schwierigkeit stellen dabei jedoch die variierenden Halm-Innendurchmesser dar, die dann durch Schleifen auf den Zylinder-Außendurchmesser angepasst werden müssen.

### 3.3 Schelle

Kräfte über die Außenseite des Halmmantels einzuleiten gelingt auf schonendere Art mit einer Schelle oder Schlinge. Der Halm muss dafür nicht angebohrt werden und das Auftreten von punktuellen Spannungsspitzen ist reduziert. Der umfassende Ring beugt bis zu einem gewissen Grad dem Entstehen von Spalten und Längsrissen vor. Der Übertrag von Kräften in Längsrichtung erfolgt ausschließlich über Reibung. Dafür bedarf es einer Anpresskraft entsprechend des gegebenen Reibebeiwerts.

Hier sind auch die Grenzen dieser Verbindungsart zu finden, da die Anpresskraft weder zu groß noch zu klein werden darf. Wird die Anpresskraft zu groß, wird der Halm beschädigt, wird sie zu klein, löst sich die Verbindung. Traditionell werden diese Verbindungen durch Schlingen aus Naturfasern (zum Teil auch durch Bambusstreifen) hergestellt, die sich mit zunehmender Belastung immer fester zuziehen. Auf variierende Halmgeometrien kann mit den Schlingen gezielt reagiert werden. Von geübten Arbeitern können sie schnell ausgeführt werden. Bambusgerüste werden auf diese Art einfach (und reversibel) zusammengefügt. Neben Kabelbindern, Natur- und Kunstfaserseilen gibt es auch standardisierte Metallverbinder, ähnlich Schlauchschellen, die mit entsprechenden Knotenblechen variable Kombinationen ermöglichen.

### 3.4 Stabförmige Verbindungsmittel

Bei dieser weit verbreiteten Fügetechnik (18) werden Dübel oder Bolzen aus Stahl, aber auch Bambus-Stifte verwendet. Unerlässlich ist das Vorbohren passender Löcher. Der Kraftübertrag erfolgt dabei mittels Lochleibungsspannung. Nägel oder Schrauben, die ohne Vorbohren eingetrieben werden, drücken die Bambusfasern auseinander und spalten die Halmwand. Anschließend ist nicht nur der Halm beschädigt, sondern der Nagel hängt auch ohne Halt lose im Loch.

### 3.5 Stapelung

Mittels Stapelung von Halmen lassen sich allein Querkräfte übertragen. Der Kraftübertrag geschieht dabei durch den direkten Kontakt der Mantelflächen. Die Ausführung ist denkbar einfach, weshalb die Halm-Stapelung bei konventionellen Bambus-Bauweisen häufig angewandt wird. Diese Art des Kraftübertrags ist für die beteiligten Halme jedoch äußerst ungünstig, was in Abschnitt 4.1 genauer betrachtet wird.

### 3.6 Geleimte Halmspalten

Spalten von Bambushalmen können auf der Innenseite einfach geebnet und verleimt werden. Die Größe der Leimfläche ist dabei für den zu übertragenden Kraftbetrag maßgeblich. Die maximal einleitbare Kraft wird nur durch die axiale Zugfestigkeit der Halmspalte selbst begrenzt (Bruchspannung ca. 150 – 200 MPa). Bei Leimverbindungen müssen die beteiligten Oberflächen formschlüssig und sauber sein<sup>20</sup>, weshalb ein Entfernen des inneren Halmhäutchens und eine Ebnung der Innenseite nötig ist (vgl. 8.6). Angesichts moderner Klebstoffe ist eine Befestigung nahezu jeglicher Materialien denkbar. Leimverbindungen sollten stets unter kontrollierten Bedingungen in der Werkstatt hergestellt werden, da nur so die hohe Festigkeit dieser Verbindungsart sicher erreicht werden kann.

---

<sup>20</sup> DIN EN 302-1, Klebstoffe für tragende Holzbauteile

## 4 Unvorteilhafte Bambus-Fügeprinzipien

Bei der Bewertung von Fügeprinzipien hinsichtlich ihrer Vor- bzw. Nachteile gilt es zunächst zu verstehen, auf welche Aspekte sich diese Qualitäten beziehen. Die im Folgenden vorgetragenen Bewertungen beziehen sich auf die Frage, ob die Verbindungen den mikro- und makrostrukturellen Eigenschaften von Bambus gerecht werden.

Ohne Zweifel gibt es auch andere Qualitätsbetrachtungen, die sich etwa auf die Fertigungsmöglichkeiten, die Verfügbarkeit von Werkzeugen oder den zeitlichen Aufwand beziehen – diese sollen jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt erörtert werden. In manchen Fällen kann es gerechtfertigt erscheinen, für das Material ungünstigere Fügeprinzipien zu wählen, weil die betreffende Verbindung nur gering belastet oder mit einfacheren Mitteln auszuführen ist. Diese Frage muss je nach Situation beantwortet werden. Für die Konzeption einer Vorfertigung wird jedoch davon ausgegangen, dass die nötigen Werkzeuge zur Verfügung stehen.

### 4.1 Stapelung von Halmen

In der traditionellen bzw. handwerklichen Bambusbauweise werden Halme zu verschiedenen Zwecken gestapelt. Es ist die einfachste Art, vertikale Lasten an ein darunterliegendes Bauteil weiterzuleiten. Grundsätzlich kann zwischen einer orthogonalen und einer parallelen Stapelung der Halme unterschieden werden (Abb. 41).

#### Parallele Stapelung

Zur Erlangung höherer Steifigkeiten in biegebelasteten Bauteilen werden Halme parallel gestapelt und (soweit möglich) schubfest miteinander verübelt.

#### Orthogonale Stapelung

Die Ebenen unterschiedlicher Tragwerks-Hierarchien (wie Haupt- und Nebenträger) werden in der konventionellen Bauweise gekreuzt übereinander gelegt. Auch als Endauflager von Hauptträgern dienen oft horizontale Bambusstäbe, indem sie in der Art eines Ringbalkens den oberen Wandabschluss bilden. Auch wenn es aus handwerklichen Gründen an vielen Punkten erforderlich erscheint, Halme in der Konstruktion zu stapeln, eignet sich diese Art der Fügung in Hinsicht auf Maßhaltigkeit und Vorfertigungsfähigkeit nicht. Werden in einer gestapelten Konstruktion Halme kreuzweise übereinander gelegt, können sich bei Bambushalmen wie auch bei Holzbalken Probleme durch Querpressung der Fasern ergeben. Durch die Röhrenform der Halme tauchen darüber hinaus beim Bambus noch weitere Probleme auf, die im Folgenden erläutert werden.

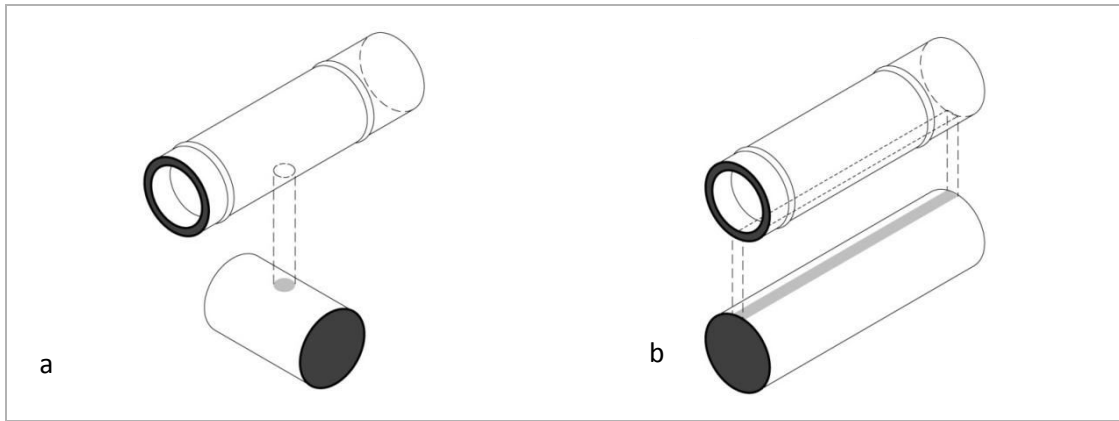


Abb. 41: Stapelung von Halmen: a) orthogonale Stapelung führt zu punktförmigem Kontakt. b) Parallele Halmstapelung resultiert in linienförmigem Kontakt. Beide Arten der Stapelung führen zur Querverpressung der Halme.

#### 4.1.1 Lokale Überlastung der Halmwand durch Querverpressung

Der Berührungsbereich zweier gekreuzt übereinanderliegenden Bambushalme ist äußerst gering. Geometrisch betrachtet handelt es sich um den Schnittpunkt zweier Mantellinien (Abb. 42). Die im Kontaktbereich wirkende Spannung ( $\sigma$ ) stellt sich als Quotient von einwirkender Kraft ( $F$ ) und verfügbarer Fläche ( $A$ ) dar:  $\sigma = \frac{F}{A}$  (vgl. Abb. 42).

Aus der anfangs äußerst geringen Kontaktfläche ( $A_1$ ) ergibt sich eine entsprechend große Spannung ( $\sigma_1$ ), die die maximale Druckfestigkeit quer zur Faser weit übersteigt. Durch die enorme Querverpressung verformen sich die Halmwände beider Bambushalme plastisch – sie flachen ab und schmiegen sich einander an, was zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche führt. Diese Flächenvergrößerung bewirkt wiederum eine Reduktion der Spannung. Die Abflachung der Halmwände kommt erst dann zum Stillstand, wenn die Spannung ( $\sigma_2$ ), die Bambusdruckfestigkeit quer zur Faser nicht mehr übersteigt. Die Kontaktfläche ( $A_2$ ) hat sich dabei entsprechend vergrößert. Eine deutliche Steigerung der Stabilität führt das Vorhandensein von Nodien an den entsprechenden Lasteinleitungspunkten herbei, da angreifende Druckkräfte auf direktem Wege durch die Scheibe des Diaphragmas an den übrigen Halmmantel abgeleitet werden können. Diese günstigen Bedingungen stehen jedoch nicht an jeder Stelle zur Verfügung, sondern sind von der natürlichen Verteilung der Nodien entlang des Halmes abhängig (vgl. 2.5.2). Besitzt jedoch nur einer der beiden gekreuzten Halme ein Nodium am Kontaktpunkt, so erfährt der Halm ohne Nodium am Kreuzungspunkt eine noch stärkere Querverpressung.

Durch die versteifende Wirkung des Nodiums verformt sich die erste Halmröhre deutlich weniger, was eine umso größere Deformation des zweiten Halmes nötig macht, um die erforderliche Kontaktfläche zur Übertragung der Kraft zu erzeugen. Diese stärkere Deformation führt schnell zur Überlastung des zweiten Halmes und somit zu einem Längsbruch im Internodium. Aus der einseitigen Stärkung folgt letztlich eine Schwächung des Gesamtsystems. Um die vorteilhaften Eigenschaften von Nodien in gekreuzt gestapelten Konstruktionen auszunutzen, ist es also erforderlich, dass alle beteiligten Halme unmittelbar im Kontaktbereich ein Nodium aufweisen. Exakt passende Halme durch Vorsortierung zu erhalten wird jedoch umso unwahrscheinlicher, je mehr Kontaktpunkte entlang eines Halmes dieser Mehrfachbedingung genügen müssen.

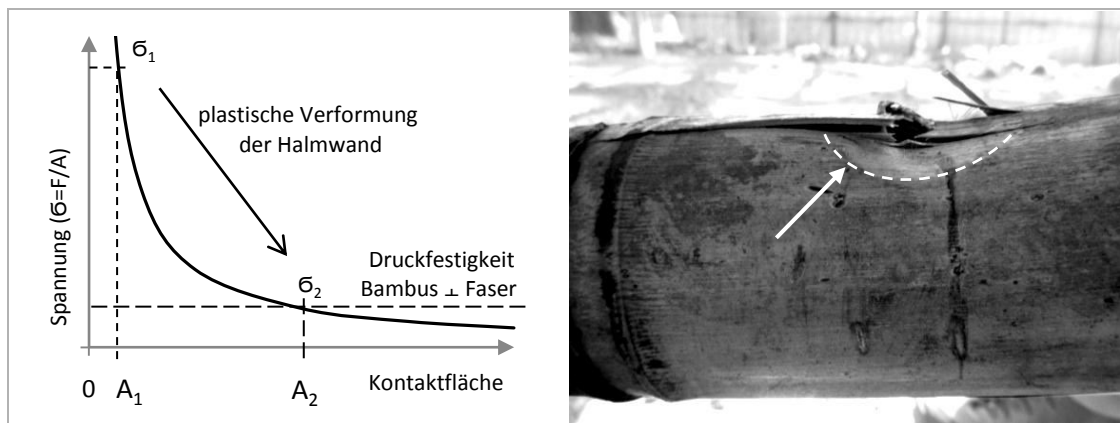


Abb. 42: Halmwandverformung infolge der Überschreitung der Querdrukfestigkeit im Kontaktbereich einer gekreuzten Stapelung. Das Foto entstand nach dem Abbau der Konstruktion und belegt das Überschreiten der maximalen Querdrukfestigkeit.

#### 4.1.2 Zerstörung des Halmes durch Querpressung

Bei der Querpressung ergibt sich ein weiteres Problem aus der Röhrenform des Halmes. Die Kraft muss von oben nach unten durch den Kreisring des Querschnitts geführt werden und verlässt auf dem Weg durch die runde Halmwandung die direkte Linie durch den Mittelpunkt um den Betrag des Radius. Diese exzentrische Lastführung erzeugt ein Versatzmoment, dem ein inneres Biegemoment in der Halmwand entgegenwirken muss (Abb. 43). Beim Übersteigen der geringen Querdrukfestigkeit von Bambus zeigen sich diese Zugspannungen schnell als Längsriss auf den Halmaußenseiten der horizontalen Symmetrieachse. An den Kräfteinleitungspunkten wird hingegen die Innenseite der Halmwand einer Biegezugbelastung quer zur Faser ausgesetzt. Es lässt sich für dieses geometrische Problem zusammengefasst feststellen:

- Je größer der Durchmesser des Halmes ist, desto größer ist das Versatzmoment.
- Je dünner die Halmwand ist, desto geringer ist der entgegenwirkende Hebel, folglich werden die quer zur Faser auftretenden Druck- und Zugkräfte umso größer.

Das Aufreißen der Flanken zerstört mit der Röhrenform auch unumkehrbar die Tragfähigkeit des Halmes. Querpressung steht fast immer im Zusammenhang mit dem Eintrag von Querkraften und somit auch dem Auftreten von Biege- und Schubspannungen in der Bauteilachse, wodurch sich eine kombinierte und damit gesteigerte Belastung ergibt.

⇒ *Halme mit großem Durchmesser und geringer Wanddicke sind besonders gefährdet, durch Querpressung zerdrückt zu werden und sich in der Länge zu spalten.*

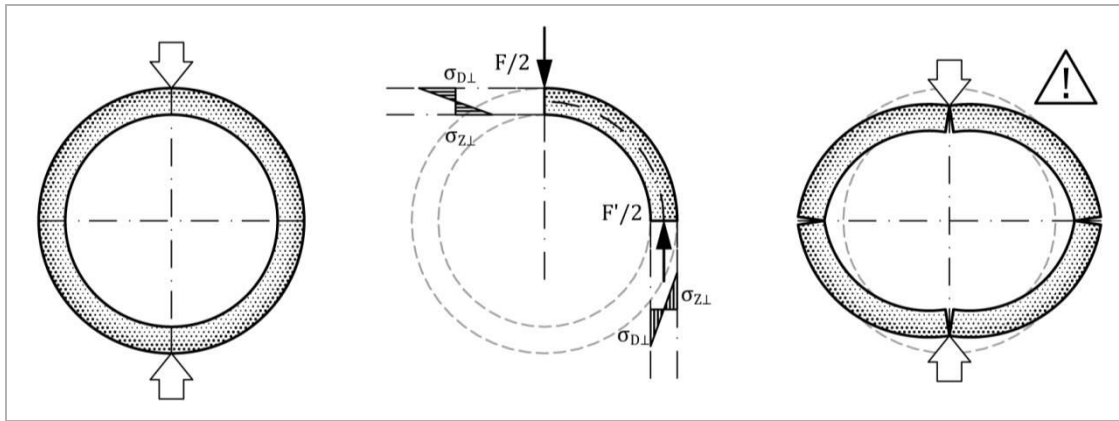


Abb. 43: Zerstörung des Halmes durch Querpressung. Radiale Risse an den sich gegenüberliegenden Kontaktstellen und an den Halmflanken sind die Folge.

## 4.2 Stabförmige Verbindungsmittel

Bei vielen traditionellen und auch aktuellen Bambuskonstruktionen wird auf stabförmige Verbindungsmittel (zum Beispiel Dübel, Bolzen oder Schrauben) zurückgegriffen. Geringe Lasten lassen sich mit stabförmigen Verbindungsmitteln problemlos in vielfältiger Weise übertragen. Die vergleichsweise einfache Ausführbarkeit und der geringe Maschinenbedarf rechtfertigen die Verwendung für einfache Bauten mit geringen Lasten. Bei größeren Lasten jedoch zeigen sich die Schwächen dieser Verbindungsmethode.

Im Folgenden werden die Mängel der Konstruktion mit stabförmigen Verbindungsmitteln aufgezeigt.

### 4.2.1 Lochleibungsspannungen

Aufgrund der geringen Wanddicken von Bambushalmen steht bei der Lasteinleitung mittels stabförmiger Verbindungsmittel nur eine entsprechend geringe Kontaktfläche zur Verfügung. Diese geringe Kontaktfläche führt schon bei moderaten Lasten zu relativ hohen mechanischen Spannungen in der Lochleibung.

Vergleicht man die Lochleibungsfläche mit der Querschnittsfläche des gesamten Halmes, so wird deutlich, dass über die Lochleibung kaum Last eingeleitet werden kann (Abb. 44). Zur Verdeutlichung wird ein Anschluss mit folgenden Abmessungen betrachtet:

Durchmesser Bambushalm	(D)	=	10,0 cm
Wanddicke	(t)	=	1,0 cm
Durchmesser Dübel	( $\varnothing_d$ )	=	0,8 cm

Es ergibt sich eine Lochleibungsfläche von:  $A_L = 1,6 \text{ cm}^2$ . Die Querschnittsfläche des Halmes beträgt demgegenüber:  $A_\varnothing = 28,3 \text{ cm}^2$ . Setzt man diese Flächen zueinander ins Verhältnis, so erhält man:  $\frac{A_L}{A_\varnothing} = 0,06$ . Lediglich 6 % der Querschnittsfläche werden folglich von der Lochleibung abgebildet. Da bei vielen Bambusarten das Verhältnis von Wanddicke zu Halmdurchmesser im Mittel etwa 1 : 10 beträgt, kann in dieser vereinfachten Rechnung  $t = 0,1 \cdot D$  gesetzt werden. Es folgt:

$$\frac{A_L}{A_\varnothing} = \frac{2 \cdot (0,1 \cdot D) \cdot \varnothing_d}{(0,9 \cdot D) \cdot \pi \cdot (0,1 \cdot D)} = \frac{1,41 \cdot \varnothing_d}{D}$$



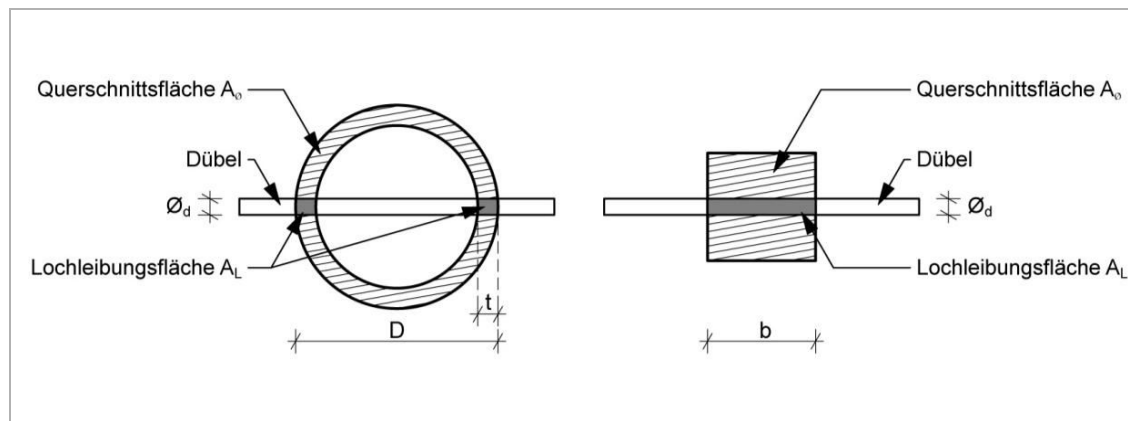


Abb. 44: Stabförmige Verbindungsmittel besitzen bei Bambushalmen nur geringe Lochleibungsflächen.

Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Halmdurchmesser das Verhältnis von Lochleibung zu Querschnittsfläche ungünstiger wird. Vergleicht man die Lochleibungsfläche von einem Bambushalm mit einem quadratischen Vollquerschnitt gleichgroßer Querschnittsfläche, so wird der Nachteil der Röhrenform deutlich (Abb. 44).

Bei einer vergleichbaren Querschnittsfläche von  $A = 28,3 \text{ cm}^2$  beträgt die Breite des quadratischen Vollquerschnitts:  $b = 5,32 \text{ cm}$ . Bei gleicher Dübelgröße ( $\varnothing_d = 0,8 \text{ cm}$ ) beträgt am Vollquerschnitt die Lochleibungsfläche folglich:  $A_L = 4,3 \text{ cm}^2$ . Das Verhältnis von Lochleibungsfläche zu Querschnittsfläche beträgt hier 15 %. Trotz gleicher Querschnittsfläche und Dübelgröße ist die Lochleibungsfläche am quadratischen Vollquerschnitt also um den Faktor 2,6 größer.

⇒ *Bambushalme sind also durch ihre Röhrenform beim Lasteintrag durch stabförmige Verbindungsmittel benachteiligt, da aus der geringeren Lochleibungsfläche größere Lochleibungsspannungen resultieren.*

#### 4.2.2 Scherspannungen

Nicht nur die Lochleibungsspannung ist bei der Betrachtung von stabförmigen Verbindungsmitteln von Bedeutung. Auch die erforderliche Länge der Scherfläche hat Auswirkungen auf die Abstände der Dübel untereinander, auf nötige Randabstände und auf Vorholzlängen am Ende von zugbelasteten Stäben. Unabhängig von der tatsächlichen Scherfestigkeit des Materials ergeben sich allein aus der Querschnittsform des Bambushalmes entscheidende Nachteile für etwaige Dübelverbindungen (Abb. 45).

⇒ *Im Vergleich zu Holzkonstruktionen benötigen Dübelverbindungen in Bambuskonstruktionen bei vergleichbarer Last ein Vielfaches der Mindestrandabstände.*

Betrachtet man bei oben gewähltem Beispiel (4.2.1) mit gleichgroßer Querschnittsfläche die Breite der zum Kraftübertrag nötigen Scherflächen, ergibt sich analog zum Verhältnis der Lochleibungsflächen ein Verhältnis der Scherflächen von 2,6 zu Ungunsten des Bambus. Wird eine gleich große Scherfestigkeit des Vergleichsquerschnitts angesetzt, ist also eine 2,6-fach größere Länge der Scherfläche (Vorholzlänge) zum Übertragen der Kräfte nötig. Bei der Dimensionierung von Holzbauteilen sind oftmals die Mindestabstände der Verbindungsmittel untereinander und die Randabstände in den Fügepunkten maßgeblich. Die Holzquerschnitte werden in der Folge meist kaum ausgenutzt. Diese vom Holzbau bekannte Problematik trifft für das Konstruieren mit Bambus in noch weit stärkerem Maße zu.

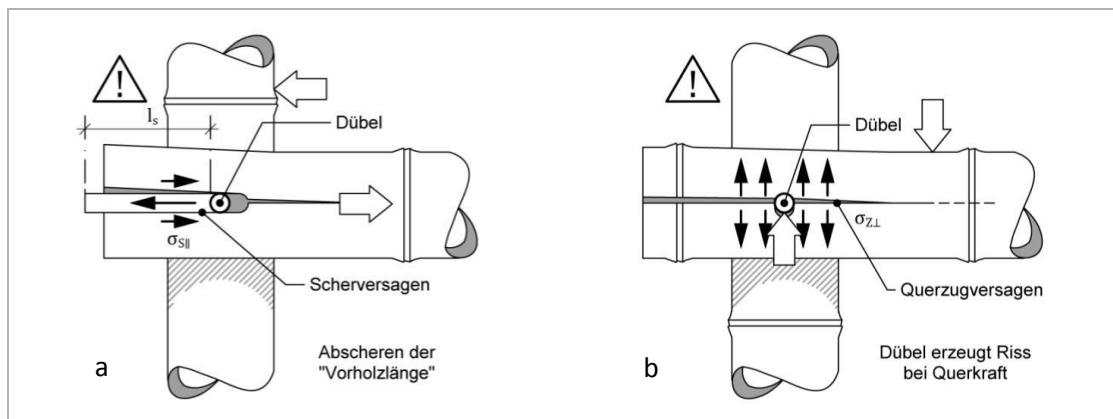


Abb. 45: a) Versagen der Scherflächen bei axialer Zugbelastung ist besonders bei Dübelverbindungen an Stab-Enden ein Problem. b) Querzugversagen einer Dübelverbindung am Auflager durch Querkräfteübertrag.

Um axiale Kräfte über Scherspannungen in den Halm einzuleiten, ist es zudem erforderlich, dass diese Scherspannungen nicht nur theoretisch übertragen werden können, sondern auch praktisch. Die Gefahr des Halmlängsspaltens stellt dabei die größte Unsicherheit dar. Reißt der Halm im Dübelloch, muss die Dübelverbindung versagen.

#### 4.2.3 Querzugspannungen

Querkräfte mittels stabförmiger Verbindungsmittel einzuleiten führt im Bambushalm schnell zu großen Zugspannungen quer zur Faser. Diese Belastung ist für den Halm enorm ungünstig: Direkt am Dübelloch herrschen die größten Zugspannungen, woraufhin dieser besonders geschädigte Bereich zuerst versagt und sich in Faserrichtung ein Riss ausbildet. Dieser Riss breitet sich ungebremst aus, da am Rissende stets die höchste Kerbspannung herrscht (Abb. 45). Ein Versagen der Halmwand tritt verfrüht ein durch:

- Geringe Halmwanddicke
- Vorschädigung der Lochleibung beim Bohren
- Schubspannungen an Auflagern
- Querzugspannungen durch blockiertes Trockenschwinden

Wenn der Halm nicht durch Schellen zusätzlich gegen Querzugversagen gesichert wird, sollte auf Dübel zum Querkräfteübertrag verzichtet werden, da die Tragfähigkeit auf diese Weise nicht sichergestellt ist.

#### 4.2.4 Dübel fördern die Tendenz des Halmsplitters

Obwohl das Entstehen von Halm-Längsrissen die Tragfähigkeit von Dübelverbindungen infrage stellt, fördern die Dübel selbst das Entstehen dieser Längsrisse. Der kreisrunde Dübelquerschnitt erzeugt auseinandertreibende Kräfte orthogonal zur eigentlichen Krafrichtung (Abb. 46). Druckkräfte können in Kontaktbereichen nur senkrecht zur Kontaktfläche übertragen werden, was bei einer gekrümmten Mantelfläche des Dübelschafts dazu führt, dass die resultierenden Kräfte an den Kontaktpunkten jeweils radial aus dem Zentrum des Dübels wirken ( $F_d$ ). Diesen radial wirkenden Kräften stehen entsprechende Kräfte in der Lochleibungsfläche gegenüber ( $F'_d$ ), welche durch zwei Vektorrichtungen beschrieben werden können:

1. Kräfte, die parallel zur Faserrichtung wirken ( $F'_{||}$ )
2. Kräfte, die orthogonal zur Faserrichtung wirken ( $F'_{\perp}$ )

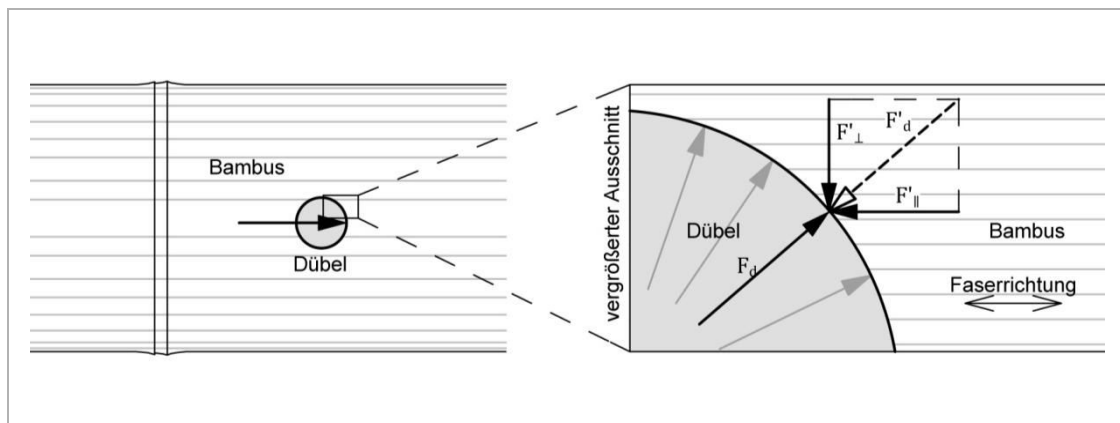


Abb. 46: Rundung der Schaftfläche des Dübels erzeugt Querspannungen im Bambushalm.

Je größer der Winkel zwischen  $F'_d$  und  $F'_{||}$  ist, desto größer ist die Komponente, welche quer zur Faserrichtung wirkt. Infolgedessen gerät der Bereich der Lochleibung unter Querspannung. Wie Spaltkeile treiben die Flanken des Dübelmantels die Bambusfasern auseinander. Diese Zugspannungen quer zur Faserrichtung führen beim Überschreiten der Quersugfestigkeit des Bambusmaterials zum Versagen. Aufgrund der geringen Wanddicke und der daraus resultierenden vergleichsweise sehr geringen Lochleibungsfläche bei Bambushalmen (vgl. 4.2.1) sind die auftretenden Spannungen entsprechend hoch. Verschärfend kommen Schädigungen des Faserverbunds im Bereich des Dübellochs hinzu.

#### 4.2.5 Bohren schädigt den Halm

Vor jeglicher Belastung oder dem Einsetzen des Dübels kann der Bambushalm schon durch das bloße Bohren beschädigt werden. Die dünne Halmwand setzt dem mechanischen Kräftefeld des Bohrprozesses vergleichsweise wenig Konsolidierungsmaterial in der Tiefe entgegen. Das macht jeglichen Bohrvorgang zur Belastungsprobe der gesamten Halmstruktur. Beim Bohren des Dübellochs kann die Spitze des Bohrers sich in bestimmten Positionen leicht zwischen den spröden Fasern verkeilen und diese auseinandertreiben. Dies geschieht besonders dann, wenn die Schneiden des Bohrers in sehr flachem Winkel auf die Stirnflächen der Fasern treffen, welche dann den größten Widerstand darstellen und nicht durchtrennen, sondern seitlich mitgerissen werden. Ist der Bohrer erst einmal zwischen die Fasern geraten, wirkt das Drehmoment des Bohrers wie ein Brechisen, das den Faserzusammenhalt aufspaltet und die Halmwand in voller Tiefe aufreißt (Abb. 47).

Folgende Faktoren begünstigen diese Schädigung:

- stumpfe, abgenutzte Bohrer
- Bohrer mit größerem Durchmesser
- Bohren mit zu großem Druck
- dünnwandige Bambushalme
- Bambusmaterial, das durch Trockenschwinden unter tangentialer Zugspannung steht

Wenn auch der Schaden nicht immer offensichtlich auftritt, reicht schon eine geringfügige Schädigung des Faserzusammenhalts, um Folgeschäden von diesem Punkt ausgehen zu lassen. Jeder Spalt stellt eine Vorschädigung dar, da Kerbspannungen die Risse schnell anwachsen lassen.

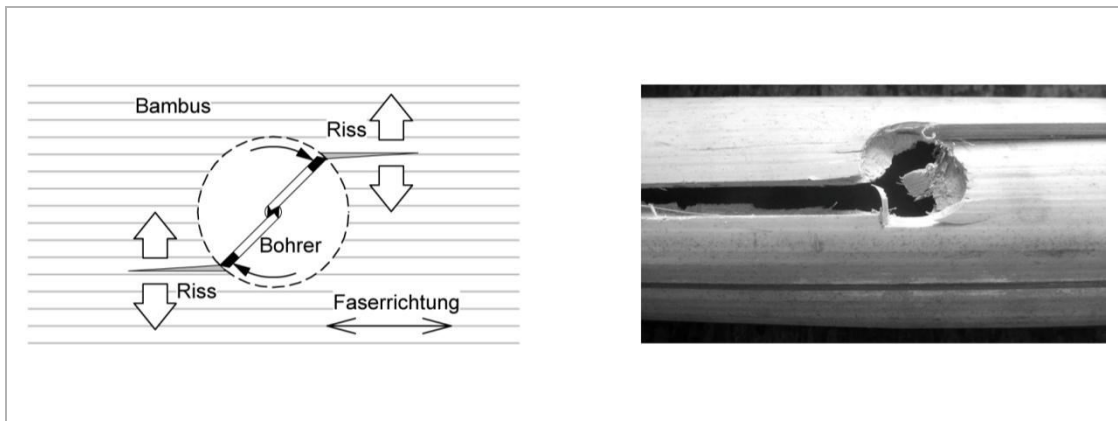


Abb. 47: Drehmoment des Bohrkopfs schädigt den Faserverbund der Halmwand im Bereich des Dübellochs.

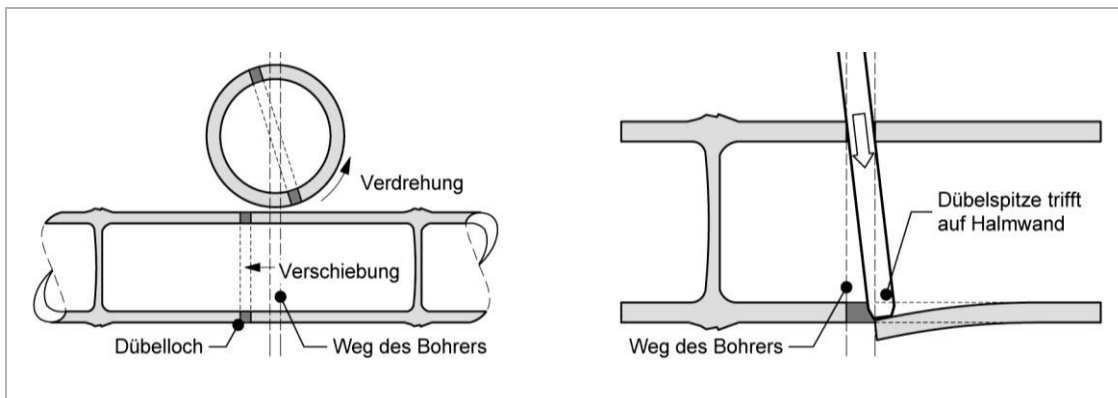


Abb. 48: Folgt der Dübel nicht dem Weg des Bohrers, beschädigt die Dübelspitze leicht die Halmwand.

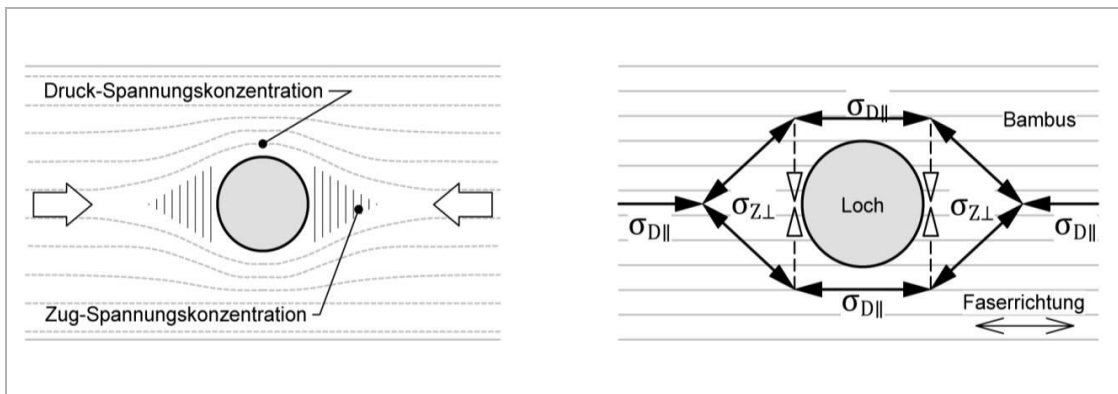


Abb. 49: Kraftumlenkung am Dübelloch führt zu Spannungskonzentrationen im geschwächten Querschnitt.

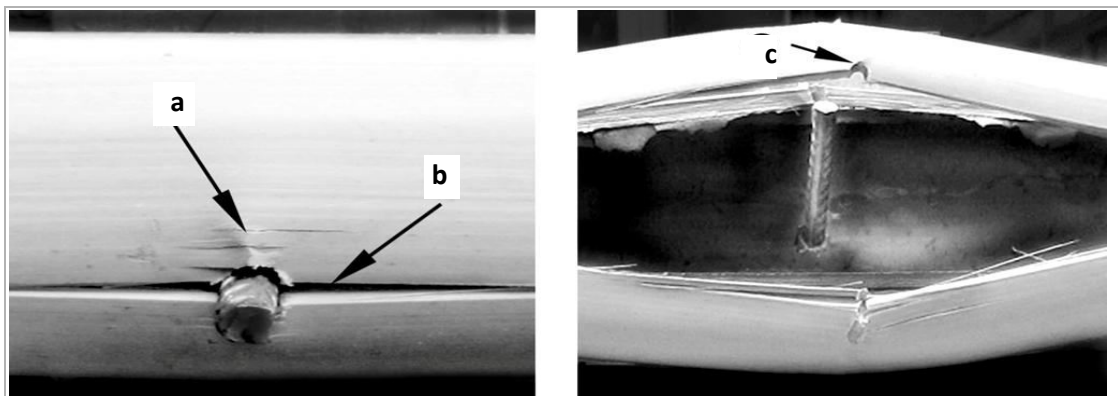


Abb. 50: Halmwandversagen im Bereich von unbelasteten Dübellöchern bei großer axialer Druckkraft. a) Lokales Faserknicken aufgrund von Druckspannungskonzentrationen an den Lochflanken. b) Längsrisse resultieren aus Zugspannungen quer zur Faser durch Kraftumlenkung am Dübelloch. c) Das Dübelloch ist der Ausgangspunkt des Halmversagens (Ausknicken der Halmwand unter Last).

#### **4.2.6 Dübelspitzen schädigen die Halmwand bei Kontakt**

Dübel werden oftmals durch mehrere Halme hintereinander eingetrieben, um diese miteinander zu verbinden. Nach dem Vorbohren der Dübellöcher können sich diese leicht zueinander verschieben oder verdrehen, was beim Eintreiben der Dübel zu schweren Schäden der Halmröhre führen kann (Abb. 48).

Folgt die Spitze des Dübels nicht exakt dem Weg des Bohrers, sondern trifft auf den Rand des Dübellochs, wird die Kraft des eintreibenden Werkzeugs punktuell auf die Halmwand gelenkt. Die Kraft wirkt dann quer zur Faser auf einen Bereich, der durch die Nähe des Dübellochs schon vorgeschwächt ist. Die dünne Halmwand verfügt über kein tieferliegendes Material welches unterstützen könnte und versagt daher schnell. Der Schaden kann beim Eintritt der Dübelspitze in die Halmwand oder unbemerkt beim Austritt aus der Halmwand auftreten. Das Problem wird durch die Röhrenform von Bambushalmen bedingt und findet sich nicht bei Holz.

#### **4.2.7 Dübellöcher als Ausgangspunkte für Schäden**

Das Dübelloch stellt eine lokale Schwächung des Halmmantels dar. Um das Dübelloch herum entstehen infolgedessen Spannungskonzentrationen, die sich besonders gravierend auswirken, wenn Zugspannungen quer zur Faser auftreten; diese können unterschiedliche Ursachen haben:

- Querpressung (vgl. 4.1.2)
- Querkrafteinleitung mittels Dübel (vgl. 4.2.1)
- Trockenschwinden (vgl. 2.4.7)
- spreizende Kräfte durch Eintreiben zu großer Dübel
- radial wirkende Druckkräfte, aus Füllkörpern resultierend (z.B. Mörtelfüllung), welche im Inneren des Internodien-Hohlraums eingebracht werden (Abb. 53)
- axiale Druckkraft, die um ein Dübelloch herumläuft und durch diese Umlenkung Querzugspannungen erzeugt (Abb. 49 und Abb. 50)

#### **4.2.8 Beteiligung mehrerer Dübel am Kraftübertrag**

Da bei einer Mehrzahl von Dübeln nicht alle mit der exakt gleichen Kraftschlüssigkeit eingebaut werden können, übertragen auch nicht alle gleich viel Kraft. Die formschlüssigste Dübelverbindung überträgt nahezu den gesamten Betrag der Kraft, bis die ansteigende Spannung Lochleibung oder Dübel verformt und die Verbindung nachgibt. Nun erst werden die im Kraftschluss jeweils nachfolgenden Verbindungen aktiv am Kraftübertrag mitwirken. Diese Rangordnung der Lastannahme führt dazu, dass die zuerst belastete Dübelverbindung überlastet wird und im Extremfall versagt.

Durch Ausfall der ersten Dübelverbindung verlagert sich die Last auf die nun verbleibenden Dübel, die in der Folge nacheinander ebenfalls versagen können. Dieses kettenförmige Versagen ist umso wahrscheinlicher, je größer die Toleranzen in den Dübelverbindungen und je spröder die beteiligten Materialien sind. Sprödheit verhindert ein günstiges Anschmiegen der Verbindungen und damit eine Verteilung der Spannungsspitzen.

#### 4.2.9 Kammerbeton

Die offenkundigen Nachteile, die aus der Verwendung von stabförmigen Verbindungsmitteln entstehen, lassen sich durch das Ausmörteln der Internodien-Hohlräume in gewisser Weise reduzieren:

- + Eine Mörtelfüllung stützt die Halmwand gegenüber kritischen Querpressungen.
- + Die Lochleibungsfläche der Dübel kann vergrößert werden: Nicht nur die Wanddicke des Halmes, sondern auch der Innendurchmesser des Halmes stehen dem Dübel als Krafteinleitungsfläche zur Verfügung. Die Mörtelfüllung leitet die Kräfte ans nächste Diaphragma weiter, wo sie dann von der Halmwand aufgenommen werden.
- + Mit einer Mörtelfüllung konnte in Versuchen die mittels Dübeln einleitbare Kraft deutlich gesteigert werden (13). Werden mehrere Internodien mit Mörtel gefüllt und gleichmäßig mit Dübeln belastet, steigt die einleitbare Kraft entsprechend proportional.

Dieser Art der Knotenpunktverstärkung sind allerdings auch gewisse Grenzen gesetzt:

- Der Kraftübertrag mittels Reibung auf die Innenseite der Halmwand lässt sich nicht nachweisen. Ohne zusätzliche Maßnahmen der Oberflächenbearbeitung lässt sich ein Verbund von Mörtelfüllung und Halminnenwand nicht sicher erzeugen.
- Die Formschlüssigkeit der Mörtelfüllung ist nur bedingt kontrollierbar durch die kleine Einfüllöffnung in der Halmwand. Das Abstützen der Mörtelfüllung auf dem Diaphragma kann bei größeren Lasten das Diaphragma auseinanderdrücken. Die Halmwand gerät dabei unter Querspannung und reißt der Länge nach auf. Bei hochbelasteten Knoten müssen daher vorbeugend Schellen um die Halme gelegt werden, um dieses Versagen zu verhindern. In letzter Konsequenz wird dann das Diaphragma abscheren.
- Nach Möglichkeit ist ein großer Abstand zum Nodium zu suchen, um die quer zur Krafteinleitungsrichtung wirkenden Zugkräfte im Mörtel und Nodium zu begrenzen. Das Anbringen von Dübeln in Internodien mit Mörtelfüllung ist somit nicht unabhängig von den Positionen der Nodien zu sehen (Abb. 51).

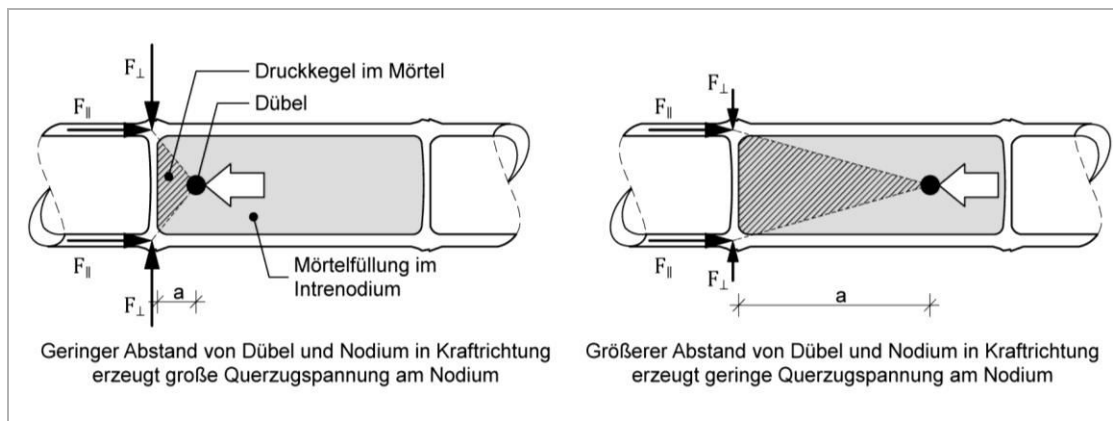


Abb. 51: Der Abstand von Dübel und Nodium und die daraus resultierende Querzugspannung am Nodium stehen in Beziehung zueinander. Je kleiner der Abstand  $a$  ist, desto größer sind die quer zur Faser wirkenden Kräfte ( $F_{\perp}$ ) durch das Abstützen des Mörtels auf dem Diaphragma.

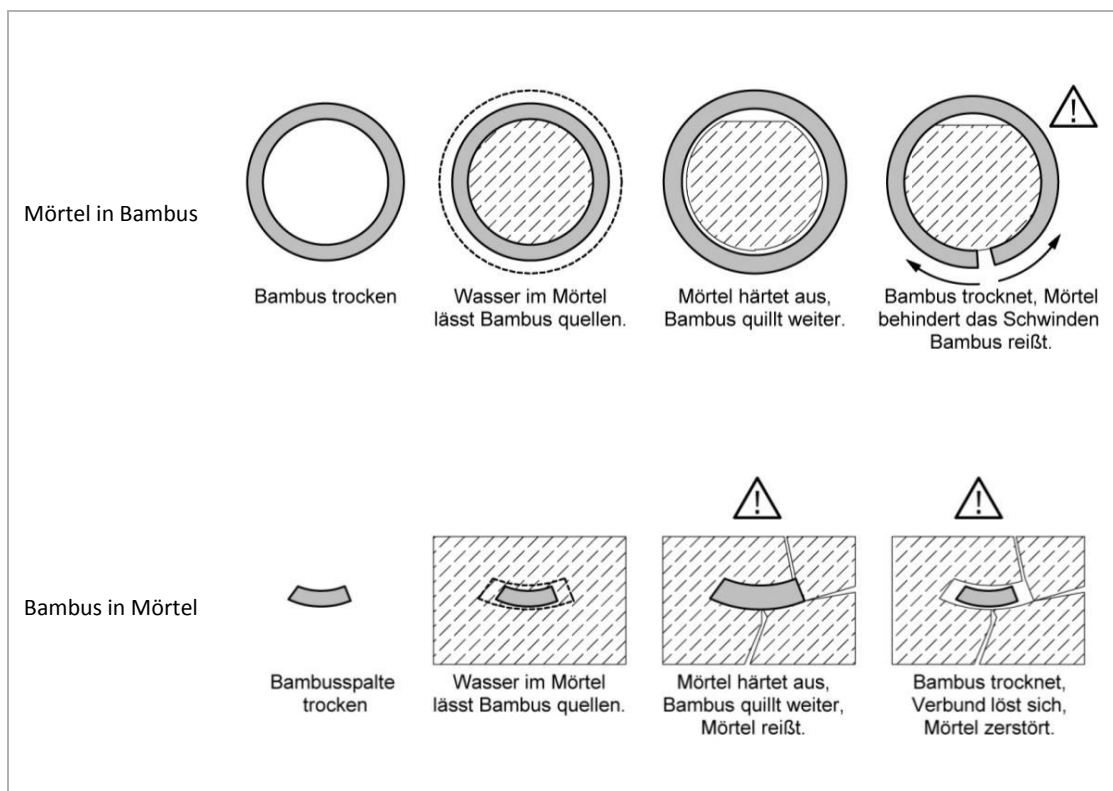


Abb. 52: Die Kombination von Bambus und Mörtel führt zu gegenseitiger Schädigung.



Abb. 53: Schädigung des Halms durch Mörtelfüllung der Halmkammer. a) Die Einfüllöffnung stellt eine deutlich größere Schwächung des Halmmantels als ein Dübelloch dar. b) Querzugversagen durch Schwinden der Halmwand nach Aushärten des Mörtels.

Aus der Verwendung von Zementmörtel mit Bambuskontakt ergeben sich schließlich weitere Probleme, welche auf die stofflichen Eigenschaften der Bambuspflanze zurückzuführen sind:

- Das Zement-Anmachwasser lässt Bambus quellen. Das anschließende Schwinden wird durch die Mörtelfüllung des Internodiums behindert und führt schließlich zu Rissen im Bambushalm. Das gilt auch für Bambusstreifen, die in Beton als Bewehrung eingelegt werden. Hier nimmt der Beton Schaden und der Verbund löst sich durch das anschließende Schwinden des Bambusstreifens (Abb. 52). Aufgrund dieser Tatsache sind in Forschungen unterschiedlichste Versuche unternommen worden, den Bambus zuvor hydrophob zu beschichten. Unter anderem wurden folgende Beschichtungen verwendet: Bitumen<sup>21</sup>, Wasserglas<sup>22</sup>, Epoxidharz<sup>23</sup> oder Polyurethan<sup>24</sup>.
- Zement schädigt die Bambus-Molekularstruktur. Das stark alkalische Zementmilieu zersetzt das Pektin, welches die Zellulose in den Bambusfasern zusammenhält (19). Gegenüber schädigenden Einflüssen von Pilzen und Schadorganismen hingegen scheint ein hoher PH-Wert eine konservierende Wirkung zu entfalten (20).

Für die konventionelle Bambusbauweise hat das Ausmörteln stärker belasteter Dübelverbindungen seine Bedeutung und kann Schwächen reduzieren. Jules J. A. Janssen (21) hat nach seinen wegweisenden Forschungen zum mechanischen Verhalten des Bambus mit Recht darauf hingewiesen, dass die Schwachpunkte von Bambus in konstruktiver Anwendung grundsätzlich die drei folgenden sind:

- Zug- und Druckspannungen senkrecht zur Faserrichtung
- Schubspannungen parallel zur Faserrichtung
- Spannungskonzentrationen im Bereich von Dübel-Löchern

Diese wichtigen Feststellungen stehen im völligen Gegensatz zur praktizierten Bautechnik, die durch das Stapeln von Bambushalmen und das Bohren von Dübellöchern ganz offensichtlich dem Bambus in seinen stofflichen Eigenschaften nicht gerecht wird. Die Zuhilfenahme von Zementmörtel in diesen Konstruktionen löst die grundsätzlichen Probleme nicht, sondern unterstreicht vielmehr die systematischen Unzulänglichkeiten.

⇒ *In der weiteren Entwicklung dieser Arbeit soll aufgrund der aufgezeigten Probleme von Dübelverbindungen generell Abstand genommen werden.*

---

<sup>21</sup> Glenn, 1950 (24)

<sup>22</sup> Atrops, 1983 (25)

<sup>23</sup> Ghavami, 2004 (20)

<sup>24</sup> Garrecht, 2010 (16)



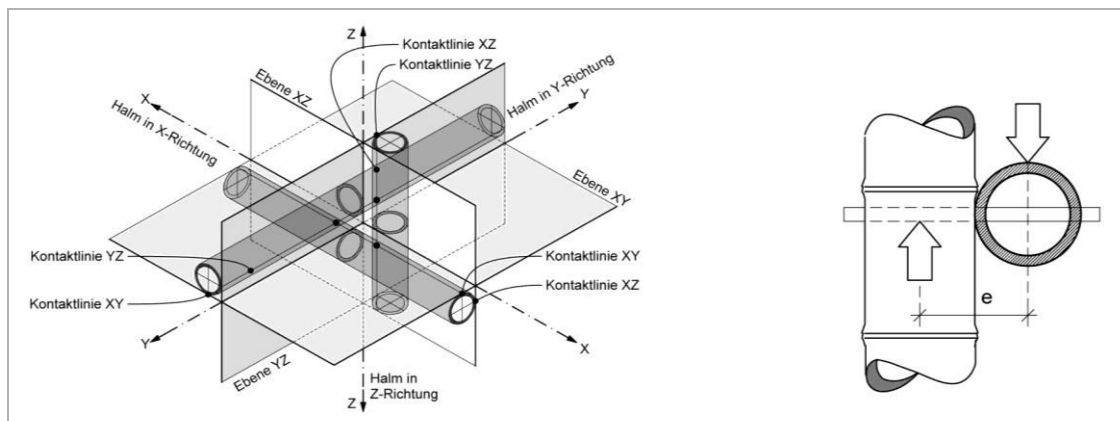


Abb. 54: Einschnittige Verbindungen: Drei Ebenen eines gedachten Konstruktionsrasters in orthogonaler Durchdringung. Entlang der Rasterebenen ordnen sich Bambushalme mit ihren Mantellinien an (links). An allen einschnittigen Verbindungen tauchen ungünstige Versatzmomente auf (rechts).

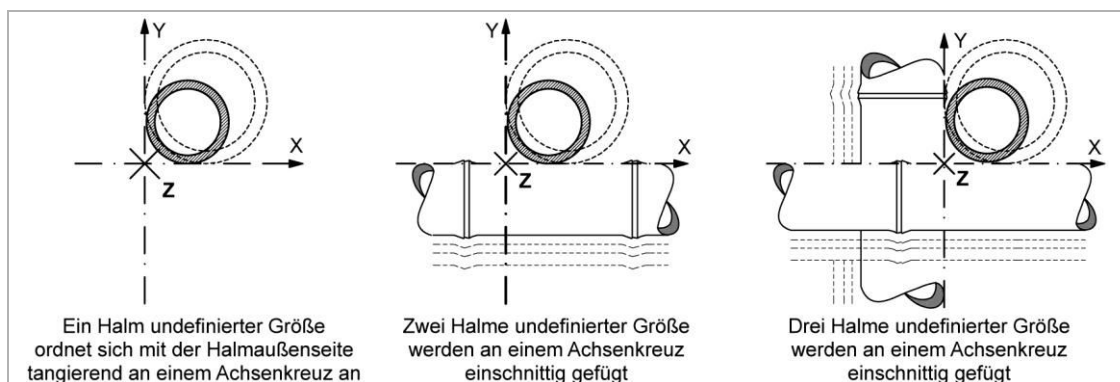


Abb. 55: Einschnittige Verbindungen können an einem Konstruktionsraster Halm-Toleranzen ausgleichen.

### 4.3 Einschnittige Verbindungen

Der Vorteil einschnittiger Verbindungen ist die einfache Reproduzierbarkeit. Wenn auf einen Halm vier gedachte Mantellinien projiziert werden, die auf der Mantelfläche einen Abstand von je einem Viertel Umfang zueinander haben, so können zwei benachbarte Mantellinien an zwei gekreuzten Konstruktionsraster-Ebenen angeordnet werden (Abb. 54). Die anderen beiden Mantellinien liegen somit von den Rasterebenen abgewendet. Über diese offenen Flanken können Halmtoleranzen ausgeglichen werden. So können Halme in allen räumlichen Dimensionen einfach gefügt werden und geraten nicht in geometrischen Konflikt miteinander (Abb. 55). Für den Bau von leichten Bambusgerüsten wird diese einfache Stabanordnung angewandt. Der Kraftübertrag geschieht dabei mittels Reibung von festgezurrten Schlingen. Dieses Fügeprinzip widersteht jedoch nur relativ geringen Lasten, auch löst sich mit der Zeit die Schnürung, was zur Abnahme der Reibkraft und zum Nachgeben der Verbindung führt.

Für dauerhaftere Konstruktionen werden traditionell Dübel verwendet. Zu den bereits erwähnten Nachteilen stabförmiger Verbindungsmittel kommt hinzu, dass in jeder einschnittigen Verbindung ungünstige Versatzmomente auftauchen. Der Dübel erfährt zur Scherbelastung noch Biegung. Das Versatzmoment muss durch ein zusätzliches Kräftepaar von der Halmwand aufgenommen werden, was in der Folge zu einer weiteren Steigerung der Lochleibungsspannungen führt.

⇒ *Trotz der einfachen Fügetechnik ist von einschnittigen Verbindungen aufgrund der Versatzmomente und geringer Belastbarkeit abzuraten.*

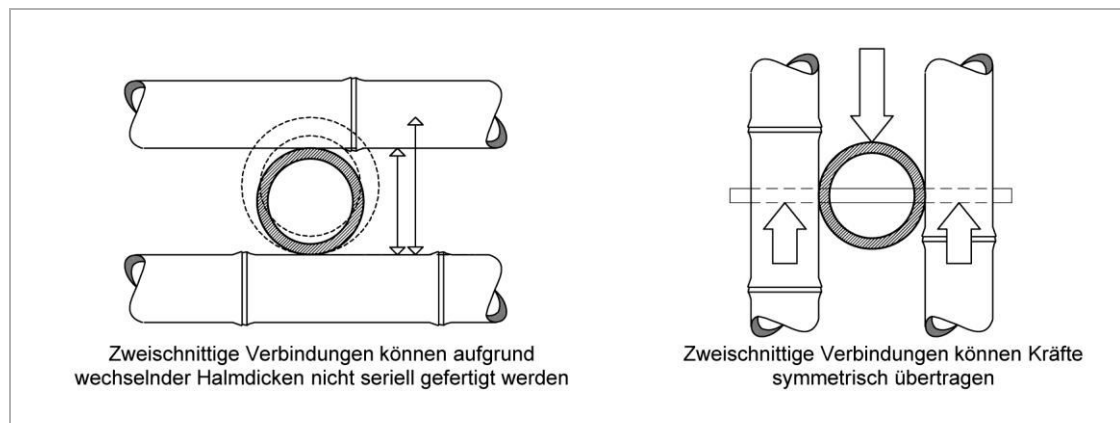


Abb. 56: Zweischnittige Verbindungen lassen sich geometrisch schlechter kontrollieren, konstruktiv sind sie aber günstiger.

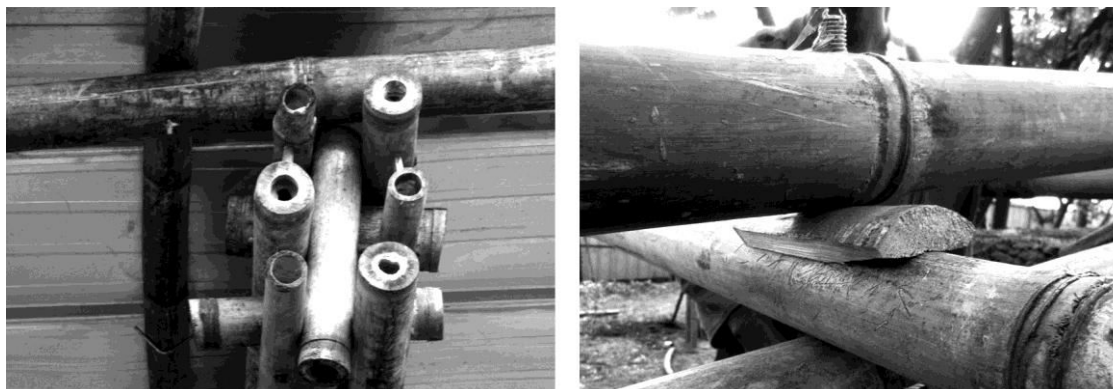


Abb. 57: Maßabweichungen der Halmquerschnitte führen zur Schrägstellung (links). Das dünne Ende eines Halmes wurde mit einem Reststück aufgefüllert, um die Zangenkonstruktion zu füllen (rechts).

#### 4.4 Zweischnittige Verbindungen

Verglichen mit einschnittigen Verbindungen, sind zweischnittige Verbindungen deutlich stärker belastbar. Versatzmomente werden durch die symmetrische Anordnung einer Zangenkonstruktion verhindert (Abb. 56). Daher finden sich bei mäßig belasteten Konstruktionen zweischnittige Verbindungen. Balkenaufleger können durch Konsolen in der Zange noch zusätzlich gestärkt werden. In der konventionell-handwerklichen Fügechnik sind Zangenkonstruktionen weit verbreitet. Das Hauptargument gegen die Verwendung zweischnittiger Verbindungen für eine vorgefertigte Elementbauweise liegt in der fehlenden Maßhaltigkeit dieser Fügechnik. Bei einschnittigen Verbindungen muss jeder Halm nur für sich allein mit dem Raster in Beziehung stehen. Bei zweischnittigen Verbindungen hingegen müssen die Außenkanten der Halme überdies noch zueinander in exakter Maßbeziehung stehen. Diese Doppelbedingung kann von einer undefinierten Halmgeometrie jedoch nicht erfüllt werden. Entsprechende Vorsortierungen, Ausgleichsmaßnahmen und Improvisationen werden daher erforderlich, um die immensen Toleranzen auszugleichen (Abb. 57). Dies gilt auch für alle anderen Fügechniken, bei denen mehrere Halmaußenkanten zueinander in Maßbeziehung stehen (Stapelung, Bündelung, etc.)

⇒ *Zweischnittige Verbindungen haben zwar eine höhere Belastbarkeit; aufgrund der fehlenden Maßhaltigkeit ist jedoch von dieser Fügechnik für die Vorfertigung abzuraten.*

## 5 Vorteilhafte Bambus-Fügeprinzipien

Unter strikter Vermeidung unvorteilhafter Fügeprinzipien bleibt nur eine geringe Zahl an Fügeprinzipien, die der Struktur von Bambushalmen nicht schaden. Dabei ist die Qualität eines jeden Fügeprinzips direkt aus der Belastung für den Bambushalm ableitbar. Diese hier aufzuführen stellt die Vorstufe für die Entwicklung eines bambusgerechten Tragwerksmodells für eine Geschossdecke dar.

### 5.1 Übertragung von Normalkräften

Normalspannungen stellen als einzige Belastungsart für die Halmstruktur von Bambus kein Problem dar. Druck und Zugspannungen können im Rahmen der vorhandenen Festigkeiten ohne strukturelle Einschränkung übertragen werden. Die Knickgefahr besteht bei Bambus zwar wie bei allen schlanken Stäben, doch ist der Halm strukturell aufgrund der Röhrenform und Faseranordnung ideal für axiale Druckkräfte geeignet. Es bleibt jedoch die Frage nach dem Einleiten der Kräfte -und damit dem Fügeprinzip- bestehen.

#### 5.1.1 Einleitung von Druckkräften über Stirnkontakt

Die einfachste und gleichzeitig effektivste Art, axiale Druckkräfte in einen Bambushalm einzuleiten erfolgt über Kontakt des vollen Querschnitts. Wenn die Stirnflächen beider Halmenden vollständig druckbelastet werden, können alle Fasern des Halmes gleichmäßig an der Last beteiligt werden. Nur so kann die maximale Druckkraft übertragen werden. Diesen Vorteil bringt kein anderes Fügeprinzip. Gleichzeitig sind die Stirnflächen die am besten zu kontrollierenden Positionen an einem Halm. Sie lassen sich einfach durch paralleles Sägen erstellen – unabhängig von Durchmesser, Wanddicke oder Stellung der Nodien.

Es sind keine schwächenden Eingriffe, Bohrungen, Querpressungen nötig. Auch werden keine zusätzlichen Verbindungsmittel wie Schellen, Dübel, Mörtel oder Schlitzbleche gebraucht.

⇒ *Druckkräfte über Stirnkontakt in Bambushalme einzuleiten ist also nach Möglichkeit anzustreben.*

#### 5.1.2 Einleitung von Zugkräften

Zugkräfte in Halme einzuleiten ist die größte Herausforderung beim Konstruieren mit Bambus. Zahlreiche Forschungsarbeiten handeln allein von diesem Thema, mit der Absicht, Bambus als normalkraftbelastetes Rohr in räumlichen Fachwerken einsetzen zu können.

Die besten Erfolge wurden bisher mit Dübeln oder axialen Bewehrungseisen in Kombination mit Kammerbeton erreicht. Die axialen Kräfte werden dabei über mehrere ausgemörtelte Internodien an die Diaphragmen und damit über die Nodien an die Halmwand abgegeben. Als Versagensgrund stellte sich dabei das Abscheren des Diaphragmas oder ein Scherversagen der Halmwand dar. Weil die Fügeprinzipien stets die Schwachstelle darstellten, konnte die Zugfestigkeit von Bambus bisher in keiner Konstruktion voll ausgenutzt werden. Die Beispiele in Tab. 4 stellen ausgewählte Zugkraft-Anschlüsse dar, die in drei verschiedenen Forschungsarbeiten entwickelt wurden. Die Zugkräfte sind mit bis zu 135 kN betragsmäßig beeindruckend, doch keines der Fügeprinzipien kann auch nur annähernd die Zugfestigkeit des Bambusquerschnitts (ca. 150 MPa) ausnutzen. Beispiel Nr. 7 nutzt mit 40,6 MPa die Zugfestigkeit von Bambus nur zu einem Viertel aus.

Fügeprinzip	Versagensgrund	Autor	Nr.	D	t	A	F	$\sigma_{t,0}$
				[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]
Bewehrungsstab axial mit Kammerbeton über 2 Internodien, PU-Sand-Haftbrücke	Versagen von Beton und Stahlverbund	(16)	1	176	17,0 <sup>25</sup>	8.491	135,1	<b>15,9</b>
			2	174	17,4 <sup>a</sup>	8.560	118,8	<b>13,9</b>
			3	155	15,5 <sup>a</sup>	6.793	105,7	<b>15,6</b>
Schlinge aus Stahlseil, innenliegende, axiale Gewindestange über 2 Internodien	Versagen der Lochleibungen	(11)	4	102	10,0	2.890	74,0	<b>25,6</b>
			5	103	12,0	3.431	77,0	<b>22,4</b>
			6	101	12,0	3.355	80,9	<b>24,1</b>
Dübel und Kammerbeton über 3 Internodien	Scherversagen, ausgehend von Dübellöchern	(22)	7	100	10,0	2.827	115,3	<b>40,6</b>
			8	115	17,5	5.360	135,3	<b>25,2</b>
			9	120	25,0	7.461	128,0	<b>17,2</b>

Tab. 4: Vorhandene Bambus-Zugspannungen  $\sigma_{t,0}$  beim Versagen verschiedener Fügepunkte, welche auf die Maximierung der Zugkraft ausgelegt wurden. Die Zugkräfte sind beachtlich, die Zugfestigkeit des Bambusmaterials wird jedoch nicht erreicht.

Dabei ist der Aufwand durch den Einsatz von Stahldübeln, Schellen, Laschen und Mörtel nicht unerheblich. In diesem Beispiel hat jedes Ende des Zugstabs einen Lasteinleitungsbereich über drei Internodien, was einer Länge von jeweils 80 cm entspricht.

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, weshalb die Kraft nicht direkt in die Fasern der Halmwand eingeleitet wird, sondern über den Umweg von Dübel, Lochleibung, Mörtel und Diaphragma? Mittels Leimverbindung könnten Zugkräfte direkt in die Fasern lateral übertragen werden. Begrenzend wirkt hier allein die Scherfestigkeit des Materials. Über eine Vergrößerung der Scherfläche kann die Scherkraft aber so weit erhöht werden, dass sie die Zugfestigkeit des Materials erreicht.

Hier liegt der Schlüssel zur Steigerung der in den Stabenden von Bambushalmen einleitbaren Zugkraft. Das Verhältnis von Scher- und Zugfestigkeit spielt dabei eine besondere Rolle. Es muss sich im Verhältnis von Scherfläche und Halmquerschnitt widerspiegeln. Infrage kommen zunächst folgende zwei Leimverbindungsverfahren:

1. Keilzinkenverbindung der Halm-Stirnflächen (vgl. Abschnitt 8.3)
2. Ebnen und Verleimen von Halmspalten (vgl. Abschnitt 8.6)

⇒ *Nur mittels Leimverbindung können alle Fasern des Halmquerschnittes am Kraftübertrag beteiligt werden.*

<sup>25</sup> Wandstärke geschätzt ( $t = D/10$ )

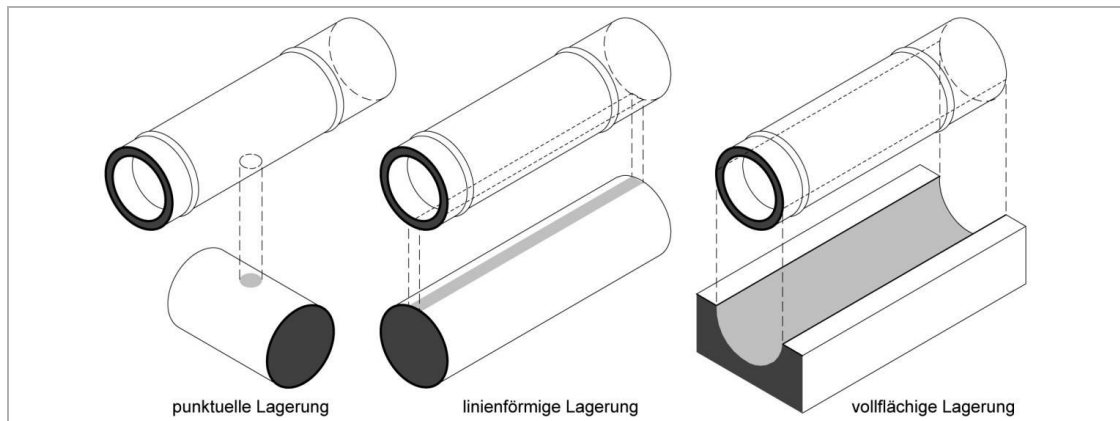


Abb. 58: Verschiedene Arten der Lagerung: punktuell, linienförmig, vollflächig. Nur die vollflächige Bettung kann die negativen Wirkungen der Halm-Querpressung verhindern.

## 5.2 Übertragung von Querkräften

### 5.2.1 Rohre vollflächig lagern

Die Einleitung von Querkräften erfolgt traditionell mittels stabförmiger Verbindungsmittel oder Kontakt der Halmaußenseite mit einem Auflager oder einer Last. Die möglichen Nachteile sind in Abschnitt 4.2 aufgeführt und es wird deutlich, dass die schlechte Auflagerausbildung bei vielen Bambuskonstruktionen verantwortlich für das Halmversagen ist. Punktuelle und linienförmige Lagerungen sind ungeeignet, da aus dem Kontakt einer Halm-Mantellinie zwangsläufig Halmquerpressungen folgen. Um dies zu vermeiden, sollte der Kontakt über eine möglichst große Fläche stattfinden (Abb. 58). Nur so kann eine vollflächige Lagerung erfolgen, welche die Halmquerpressung minimiert, eine gleichmäßige Kontaktspannung zur Folge hat und die Röhrenform des Halmes stützt.

Angesichts der undefinierten Außenkontur von Bambushalmen ist es nötig, für die vollflächige Lagerung der Halme Materialien zu verwenden, die sich der Form des Halmes anschmiegen. Infrage kommen daher folgende Arten der Lagerungen:

- Aufhängung in breiten Schlaufen (radial wirkende Kräfte auf Halmmantel durch Seilumleitung)
- Elastomere in passenden Halbschalen
- Schüttungen

Für Geschossdecken betrifft die Querpressung nicht nur die Auflager, sondern die gesamte Fläche der Deckenplatte. Eine Schüttung erscheint daher am sinnvollsten. Es gilt:

⇒ *Die Forderung, Halme vollflächig zu lagern, sollte konsequent auf alle Bereiche angewandt werden, in denen Kräfte quer zur Halmrichtung wirken.*

# 6 Eignung von Bambus für Deckenkonstruktionen

## 6.1 Bambushalme als Biegeträger

Da das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines vorgefertigten Deckenelements aus Bambus ist, wird zunächst das einfache statische System eines Einfeldträgers betrachtet. Am Einfeldträger zeigen sich schon die grundlegenden Herausforderungen, denen auch eine entsprechend einachsige gespannte Deckenplatte (als gedachte Balkenschar) genügen muss. Es gilt also festzustellen, inwiefern Bambushalme für diese Anwendung geeignet sind und wo etwaige strukturelle Schwächen liegen. Unter einer Gleichstreckenlast erfährt ein Einfeldträger drei Belastungsarten, die im Folgenden einzeln betrachtet werden sollen:

1. Biegebeanspruchung (maximales Biegemoment in Feldmitte)
2. Querkraftbeanspruchung (maximale Querkräfte an den Auflagern)
3. Schubbeanspruchung (maximale Schubkräfte an den Auflagern)

### 6.1.1 Biegebeanspruchung von Bambus

In der Natur widersteht der Bambushalm großen Windkräften. Bei einer frei auskragenden Stablänge von 10 bis 20 m können beachtliche Biegemomente entstehen, welche der Halm offensichtlich ohne Probleme in den Boden übertragen kann. Kann daraus gefolgert werden, dass Bambus auch zur Verwendung als Biegebalken geeignet ist? Entscheidend für die Beantwortung dieser Frage sind dabei die Art der Laststellung und die des Auflagers. In Abb. 59 werden diese grundverschiedenen Auflager- und Belastungssituationen einander exemplarisch gegenübergestellt.

Bei der lebenden Bambuspflanze ist der Lastfall relativ eindeutig: Der Lasteintrag geschieht als Windangriff von einer beliebigen Seite. Die Querkräfte summieren sich in Richtung der Halmbasis, wo sie am Rhizomhals ihr Maximum erreichen. Dort wird nun der Widerstand des Erdbodens aktiviert, Rhizomhals und Wurzelwerk übertragen die Querkraft und das aus dem Biegemoment resultierende Kräftepaar aus Druck und Zug ins Erdreich.

Der Rhizomhals stellt dabei die am stärksten belastete Stelle am Halm dar. Hier ist der Betrag von Querkraft und Biegemoment am größten. Der Habitus der Pflanze ist darauf entsprechend evolutionär vorbereitet, denn auch der Halmdurchmesser, die Dicke der Halmwandung und die Dichte der Nodien sind hier am größten. Betrachtet man die aus der Geometrie des Halmes resultierenden statischen Kennwerte entlang der Länge des Halmes, so lässt sich die Anpassung an diese charakteristische Belastungssituation also klar erkennen.

Verwendet als Baumaterial in einer Decke oder Fassade, kann aber die Belastungssituation des Halmes eine vollkommen andere sein: Ein Einfeldträger hat bei gleichmäßiger Last das maximale Biegemoment in Feldmitte und den maximalen Querkraftbetrag an *beiden* Enden des Feldes (an den Auflagern). Eine völlig andere Belastungssituation also, für die das Design des Halmes von Natur aus nicht vorbereitet ist.

⇒ *Bambushalme sind für ihre natürliche Belastungssituation optimiert. Abweichungen davon führen zu grundlegenden Schwierigkeiten biegebelasteter Bambuskonstruktionen.*

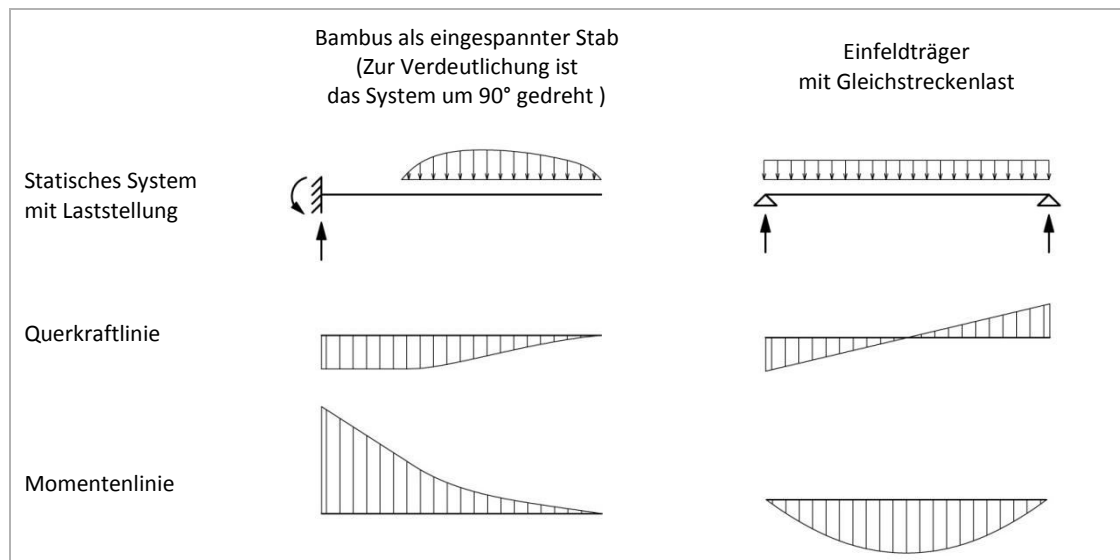


Abb. 59: Bambus als eingespannter Stab oder als Biegebalken mit Gleichstreckenlast hat grundsätzlich unterschiedlichen Schnittgrößen zu genügen.

### 6.1.2 Querkräfte

Auch wenn im Feld große Punktlasten vermieden werden können, führt selbst eine gleichmäßige Linienlast dazu, dass an den Enden des Trägers die Auflagerreaktionen als punktuell große Querkraftbeträge erscheinen. An den Auflagern wird der Halm somit zwangsläufig eine Querpressung seines Querschnitts erfahren. Aufgrund der Röhrenform ist ein Bambushalm besonders gegenüber punktuellen Querkrafteinträgen geschwächt. Zwar kommen in gewissen Abständen die Nodien stabilisierend hinzu, doch ist die Querpressung der Halme eine akute Gefahr der strukturellen Integrität. Während bei biegebeanspruchten Vollquerschnitten (z.B. Holzbalken) entweder die untere Zugzone reißt oder die obere Druckzone bricht, findet man bei biegebelastetem Bambus oft ein typisches *Versagen der Halmflanken*. Dieses Versagensbild lässt sich auf die röhrenförmige Geometrie von Bambus zurückführen (vgl. 4.1.2).

Zur Biegebelastbarkeit von Bambushalmen wurde eine Studie vom *International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)* mit der *Polytechnic University Hong Kong* veröffentlicht (23). Die Studie ist interessant, weil sie nicht die Biegezugfestigkeit ermittelt, sondern ungewollt einen ganz anderen Punkt verdeutlicht: die Problematik der Querpressung biegebelasteter Halme. Bei dem Biegeversuch betrug die Spannweite 1,20 m. Die Halme wurden mit mittiger Punktlast bis zum Bruch belastet. Abb. 60 zeigt den Versuchsaufbau und das typische Versagen der Prüfkörper nach Ende der durchgeführten Versuche. In der Auswertung der Versuche wurden die Arten des Versagens in zwei Gruppen geordnet:

1. Eindrücken der Halmoberseite am Lasteinleitungspunkt („local crushing“)
2. Aufspalten der Halmflanken an den Auflagern („splitting“)

Obwohl beide Arten des Versagens offenkundig Folgen der Halmquerpressungen am Lasteinleitungspunkt und an den Auflagern waren, wurden sie dennoch auf eine theoretische Biegezugfestigkeit umgerechnet.

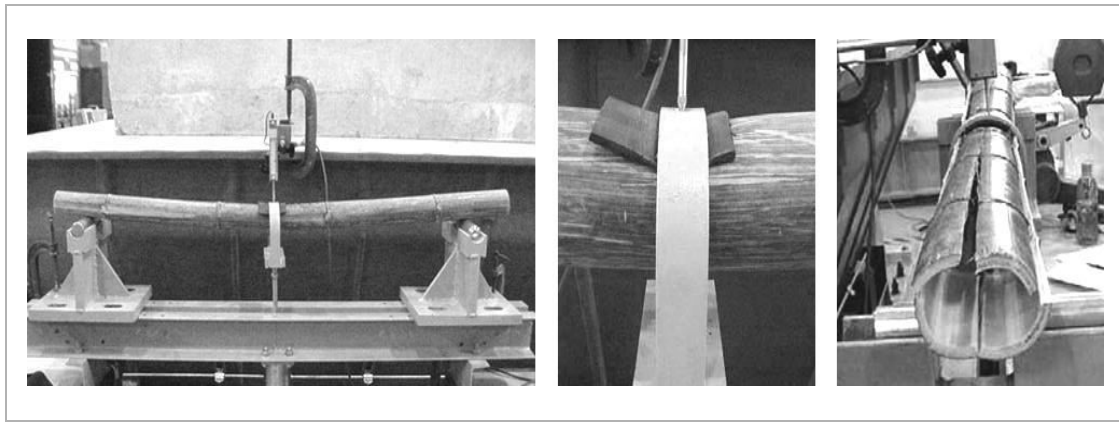


Abb. 60: Versuchsaufbau mit mittiger Punktlast (links). Unterschiedliche Arten des Versagens: „local crushing“ (mitte) und "splitting" (rechts). Versagen unter Querpressung beim Biegeversuch. Fotos nach Chung (23).

Bei der Art des Versagens spielte die Materialfeuchte scheinbar eine entscheidende Rolle. Die Autoren der Studie kamen zu folgendem Schluss:

*“It was found that most specimens failed in splitting, especially for those specimens with low moisture contents. For test specimens with high moisture contents, the specimens collapsed under combined bending and patch load, leading to local crushing.” (23)*

Es ist anzunehmen, dass bei der Versuchsanordnung die Spannweite deutlich zu gering gewählt war, um wirklich die Grenzen der Biegefestigkeit zu dokumentieren. Was hier gemessen wurde, war die Wirkung punktueller Querkräfte. Die tatsächliche Biegefestigkeit musste folglich größer als die gemessenen Werte sein. Dennoch ist die anschließende Beobachtung wichtig, dass Trockenheit das Versagen durch Längsrisse fördert. Dies deckt sich mit der beschriebenen Problematik der tangentialen Zugspannung durch Trockenschwinden (vgl. 2.4.7) und macht die eigentlichen Herausforderungen deutlich:

- ⇒ *Je trockener die Halme sind, desto eher versagen sie in Form von lateralem Längsrisse am Auflager.*
- ⇒ *Das Ein- und Ausleiten der Querkräfte und die Ausbildung der lastübertragenden Punkte stellen die Hauptproblematik biegebelasteter Bambushalme dar.*

### 6.1.3 Schubspannungen

Schubspannungen bedeuten für Bambus ein Problem, welches sich aus der Röhrenform des Halmes erklärt. Zwar führt die Röhrenform trotz geringen Eigengewichts zu einer vergleichsweise hohen Steifigkeit, doch fehlt in der neutralen Achse des Halmes bei Scherbeanspruchung die nötige Scherfläche, um diese Kräfte zu übertragen. Besonders die dünneren Enden der Halme trifft diese Problematik, was die Schubspannungen entsprechend verstärkt (vgl. 2.4.6).

Vergleicht man ein Kantholz mit quadratischem Vollquerschnitt und einen Bambushalm gleicher Steifigkeit miteinander, wird das Problem deutlich. Der Schubspannungsbetrag ist im Bereich der Bauteilnulllinie am größten, während die zur Verfügung stehende Fläche zur Übertragung der Schubspannungen durch die Röhrenform hier besonders gering ist.



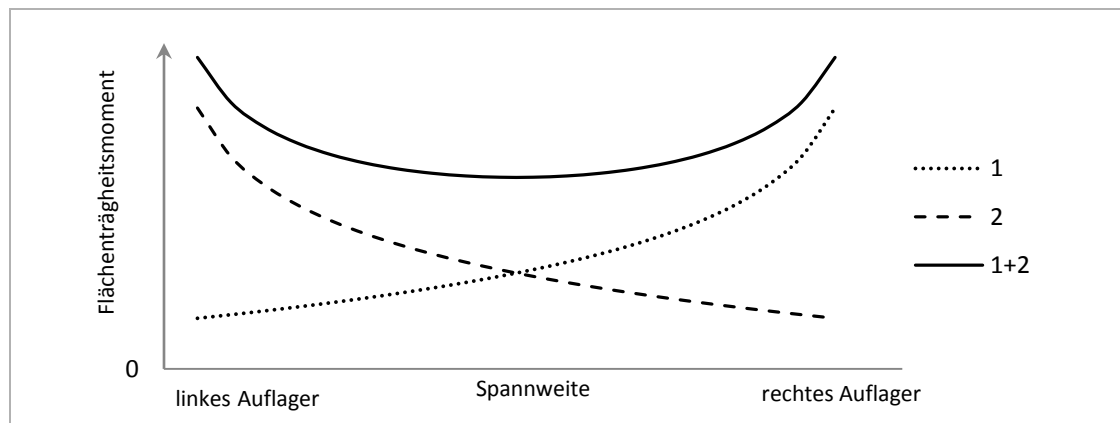


Abb. 61: Die Einzelsteifigkeit zweier kombinierter Halme und deren Gesamtsteifigkeit. Werden zwei Halme mit entgegengesetzter Richtung angeordnet, ergibt sich in Feldmitte die geringste Gesamtsteifigkeit.

Ein Halm mit Querschnitt 90/9 hat ein Flächenträgheitsmoment<sup>26</sup> von  $I = 190 \text{ cm}^4$ . Ein Kantholz mit den Abmessungen  $6,9 \text{ cm} \cdot 6,9 \text{ cm}$  besitzt ein vergleichbares Flächenträgheitsmoment von  $I = 189 \text{ cm}^4$ . Die zur Verfügung stehenden Scherflächen unterscheiden sich jedoch stark voneinander. Während der Bambushalm lediglich  $1,8 \text{ cm}^2$  Scherfläche je  $1 \text{ cm}$  Halmlänge in der neutralen Achse aufweist, besitzt der Vollquerschnitt des Kantholzes immerhin  $6,9 \text{ cm}^2$  je  $1 \text{ cm}$  Balkenlänge. Der Vollquerschnitt in diesem Beispiel besitzt also bei gleichem Flächenträgheitsmoment eine 3,8-mal größere Scherfläche, was die Schubsteifigkeit entsprechend verbessert.

⇒ Schwächen, die Bambus in Bezug auf Schubfestigkeit aufweist, resultieren also nicht so sehr aus der Scherfestigkeit des Materials, als aus der Röhrenform des Halmes: Es fehlt im Zentrum schlichtweg das Material.

#### 6.1.4 Statische Unwägbarkeiten durch Geometrieabweichungen

Werden Bambushalme als Einfeldträger eingesetzt, führt die Abnahme der Steifigkeit zu starken Verformungen nahe am Auflager des dünnen Halmendes. Um diesen Effekt zu kompensieren, werden in konventionellen Bambus-Bauweisen die Halme in wechselnder Richtung angeordnet und zur Lastverteilung miteinander verbunden. Hieraus ergibt sich zwar eine weniger weiche Gesamtkonstruktion, jedoch ist nun die Feldmitte die weichste Stelle des kombinierten Balkens, wo bekanntermaßen das größte Biegemoment herrscht (Abb. 61). Die enorme Steifigkeit der Halmbasis kommt also kaum zur Wirkung. Die Gesamtverformung wird nur ungenügend beschränkt.

## 6.2 Referenz-Deckentragwerke

Im Folgenden sollen drei verschiedene Ansätze der Verwendung von Bambus in Geschossdecken vorgestellt werden, welche zum Teil in Gebäuden realisiert wurden. Die Erzeugung schubsteifer Gesamtquerschnitte aus einzelnen Bambushalmen erfolgt dabei auf drei Arten:

1. Verbund von Bambus und Beton
2. Nachgiebig verbundene Bambus-Querschnitte mit Stahldübeln
3. Zu Balken verleimte Bambuslamellen („LBL“ – Laminated Bamboo Lumber)

<sup>26</sup> Flächenträgheitsmoment für Rohre:  $I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - (D - 2t)^4)$

### 6.2.1 Bambus-Beton-Verbund

Bereits in den frühen 1940er Jahren sind von Glenn (24) Versuche unternommen worden, Bambus als Ersatz für Stahlbewehrung in Beton zu verwenden. Der Ansatz erscheint bis in die neuere Zeit immer wieder verlockend, da Bambus mit 15 bis 20 GPa in Faserrichtung einen etwa doppelt so hohen Elastizitätsmodul besitzt wie Holz. Die Zugfestigkeit der äußeren Bambusbereiche ist mit über 300 MPa sogar vergleichbar mit der von Baustahl (21). Bambus lässt sich leicht in lange Streifen spalten, die anschließend als Bewehrungsstäbe in eine Schalung eingelegt und von Beton allseitig umhüllt werden können. Versuche dazu sind unter anderem an der Fachhochschule Köln unternommen worden (25) (vgl. 4.2.9).

In der Kombination von Bambus und Beton ergeben sich jedoch stets Probleme beim Kraftübertrag in der Grenzfläche beider Materialien. Fast immer führt dies zum Herausziehen der Bambusstreifen. Des Weiteren ist das Quellverhalten von Bambus in Kontakt mit dem Beton-Anmachwasser für das Bauteil extrem ungünstig, weshalb eine zusätzliche Beschichtung notwendig ist (Abb. 52).

Abgesehen vom Vorbild des klassischen Stahlbetonbaus gibt es Versuche nach Art des Stahlverbundbaus, Bambus zum Einsatz zu bringen. Zwei Konstruktionsbeispiele von *Guzman*<sup>27</sup> und *Ghavami*<sup>28</sup> sollen im Folgenden betrachtet werden:

#### 6.2.1.1 Konstruktionsprinzip nach Guzman

Der Konstruktionsansatz stellt eine Abwandlung der Stahl-Beton-Verbundbauweise dar. Bambus wurde von Guzman in der Zugzone eines Biegeträgers aus Beton eingesetzt. Die verwendeten Halme hatten einen Querschnitt von etwa 90/8 und wurden der Länge nach aufgetrennt. Etwas mehr als die halbe Rundung (200°) des Halmes blieb jeweils erhalten und wurde mit einem Leichtbeton aufgefüllt, der noch über die Halmoberkante hinausreichte und die Druckzone des Balkens darstellte (Abb. 62). Der verwendete Leichtbeton besaß einen sehr geringen E-Modul von lediglich 2 GPa (!) und eine Rohdichte von 18 kN/m<sup>3</sup>. Bambus und Beton sollten im Verbund wirken. Die Prüfkörper waren in zwei Gruppen unterteilt („Bn“ und „Bc“). Die Gruppen waren grundsätzlich identisch, bei Gruppe „Bc“ wurden jedoch vor dem Aufbringen des Betons, Dübel im Abstand von 20 cm quer durch die Halmmitte eingesetzt. Die Dübel sollten zur Steigerung der Verbundwirkung beitragen. In dieser Art wurden einzelne Halme in einem 3-Punkt-Biegetest mit 1 m Spannweite und mittig wirkender Punktlast getestet. Die Versuche zeigten jedoch, dass genau das Gegenteil der Fall war. Das Versagen ging stets von den Dübeln aus<sup>29</sup>. Guzman erkannte die Ursache der Schädigung:

*“The failure of the beams of series (Bc) was initiated at the reinforcing steel bars while series (Bn) did not exhibit this.” (26)*

Die Bruchlast war bei Gruppe „Bc“ im Schnitt sogar geringer als bei Gruppe „Bn“. Bemerkenswert bei diesem Versuch ist weiterhin, dass die Bambus-Beton-Prüfkörper eine größere Verformung aufwiesen als die ursprüngliche Röhrenform bei gleicher Belastung theoretisch aufgewiesen hätte. Dies gilt selbst für den Prüfkörper „Bn1“, welcher vergleichsweise biegesteif erscheint. (In Abb. 63 durch den Pfeil deutlich gemacht).

---

<sup>27</sup> Guzman-Chavez, 2007 (26)

<sup>28</sup> Ghavami, 2009, (57)

<sup>29</sup> Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass Dübel in Bambus-Konstruktionen eine Schwächung darstellen.

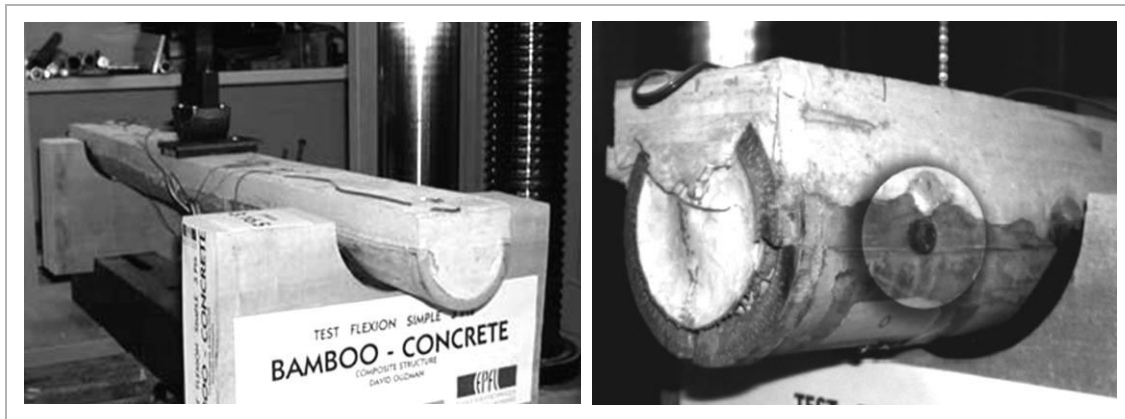


Abb. 62: Bambus-Halbschalen mit Aufbeton nach Guzman 2007 (26).

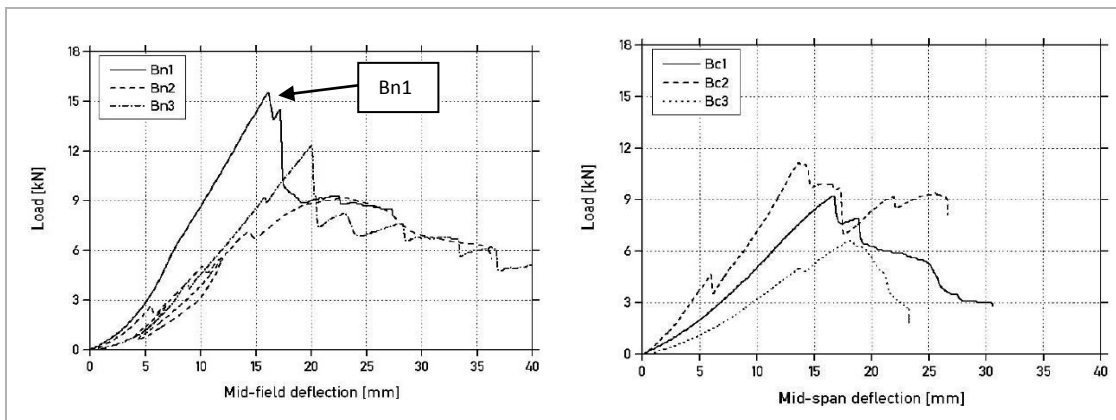


Abb. 63: Kraft-Weg-Diagramme nach Guzman (26). Links: ohne Dübel („Bn“), rechts: mit Dübeln („Bc“).

Das ursprünglich vorhandene Flächenträgheitsmoment<sup>30</sup> (Halmgeometrie: 88/8 mm) betrug:  $I = 163 \text{ cm}^4$ . Setzt man dieses und die wirkende Belastung miteinander ins Verhältnis, ergibt sich für den verwendeten Halm des Versuchs „Bn1“ bei 15,6 kN mittiger Punktlast folgende theoretische Verformung<sup>31</sup>:

$$f = \frac{n \cdot M \cdot l^2}{I} = \frac{55 \cdot 3,9 \text{ kNm} \cdot (1 \text{ m})^2}{163 \text{ cm}^4} = 1,3 \text{ cm}$$

Im Versuch verformte sich der Bambus-Beton-Balken jedoch um etwa 1,6 cm. Die übrigen Versuche zeigten sogar deutlich stärkere Verformungen bei geringerer Last. Hier machte sich der geringe E-Modul des Leichtbetons in der Druckzone bemerkbar. Es wird deutlich, dass dieser Ansatz nicht aus den Materialeigenschaften des Bambus entwickelt wurde, sondern eher einen fragwürdigen Substitutionsversuch für eine Komponente im Stahlbetonbau darstellt.

⇒ *Das vorgeschlagene Tragwerksprinzip verschlechterte die Steifigkeit und Tragfähigkeit des eingesetzten Bambushalmes erheblich.*

(In Abschnitt 9 werden die Tragwerke als „GUZMAN-Bn1“ und „GUZMAN-Bc2“ in der Vergleichswertung aufgeführt.)

<sup>30</sup> Flächenträgheitsmoment für Rohre:  $I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - (D - 2t)^4)$

<sup>31</sup> Für Bambus  $n = 55,5$  (E-Modul = 15.000 MPa) vgl. Tab. 21.

### 6.2.1.2 Konstruktionsprinzip nach Ghavami

In ähnlicher Weise wie *Guzman* hatte zuvor *Ghavami* Plattenelemente aus halbierten Bambushalmen mit einer Beton-Druckzone getestet (20). Hier wurde allerdings ein Beton mit größerem E-Modul verwendet. Eine Epoxidharz-Beschichtung auf der Halminnenseite sollte die verbundschädigende Wechselwirkung von Betonanmachwasser und Bambus verhindern.

Aus dieser Prüfreihe sollen zwei Prüfkörper („*BTDG-HD*“ und „*BTDG-ED*“) vorgestellt werden, die sich in Bezug auf die Verdübelung von Bambus und Beton unterschiedlich verhielten. Die beiden letzten Buchstaben bezeichneten die unterschiedliche Behandlung der Nodien. Während bei Prüfkörper „*HD*“ (*half diaphragm*) alle Nodien und Diaphragmen mit den Halmen halbiert wurden, wurden bei Prüfkörper „*ED*“ (*entire diaphragm*) die Nodien nicht durchtrennt (vgl. Abb. 64).

Die Prüfkörper hatten eine Breite von 60 cm bzw. 64 cm, die Spannweite betrug 3,50 m. In den Drittel-Punkten des Feldes fand die Lasteinleitung statt. Die Versuche zeigten, dass Bambus und Beton tatsächlich eine Verbundwirkung entwickelten und die Durchbiegung unter Last entsprechend begrenzt wurde (Abb. 65). Durch Schubverdübelung der Bambuszugzone mit der Betondruckzone konnte eine gute Tragfähigkeit und Verformungssteifigkeit des Bauteils erreicht werden. Die Verbundwirkung wurde durch die vollständig erhaltenen Nodien der Reihe „*BTDG-ED*“ besonders gut gewährleistet.

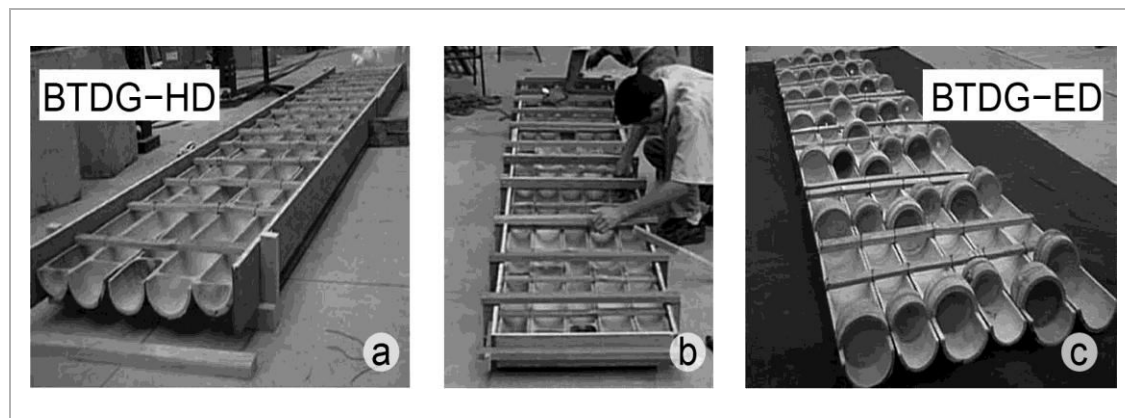


Abb. 64: Aufgeschnittene Bambushalme als verlorene Schalung und Zug-Bewehrung nach *Ghavami* (20):  
a) *BTDG-HD* („*half diaphragm*“) Halme halbiert. An den Flanken ist die Betonschalung zu erkennen.  
b) Auftragen der Epoxid-Harz-Beschichtung auf der Halminnenseite als Hydrophobierung und Haftbrücke.  
c) *BTDG-ED* („*entire diaphragm*“) Nodien bleiben als Schubverdübelung erhalten.

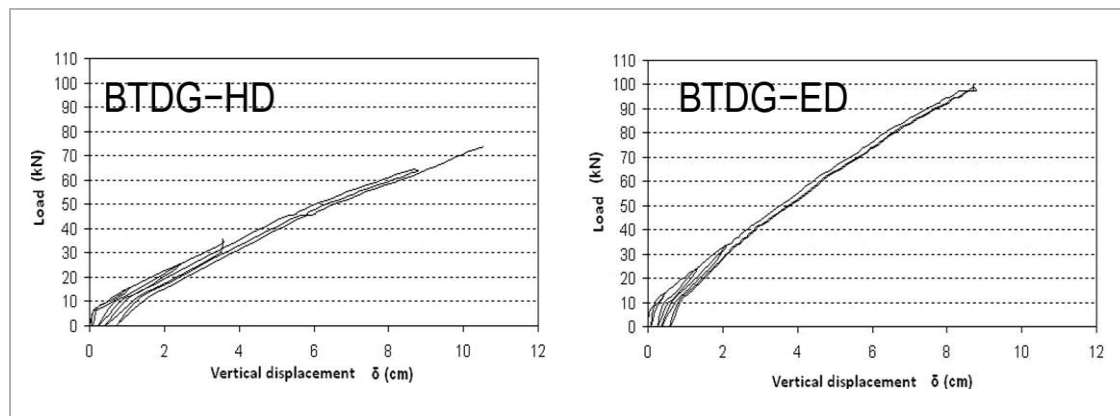


Abb. 65: Kraft-Weg-Diagramme der Belastungsversuche, nach *Ghavami* (20).

Die Vorteile der Konstruktion lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch Schubverdübelung der Bambuszugzone mit der Betondruckzone konnte eine gute Tragfähigkeit und Verformungssteifigkeit des Bauteils erreicht werden.
- Der Verzicht auf stabförmige Verbindungsmittel und eine punktuelle Halmwandbelastung verhinderte Schäden und Spannungsspitzen im Material.
- die Ausnutzung der Nodien als „natürliche Schubverdübelung“ wurde der Struktur der Bambuspflanze gerecht. Die im Bambus natürlich vorhandene Querversteifung war eine günstige Stelle zur Kraftübertragung.

Als Nachteile der Konstruktion können folgende Parameter benannt werden:

- Aus der relativ großen Abwicklung der Halmoberfläche resultiert ein ökonomisch und ökologisch bedenklicher Epoxid-Harzverbrauch von rund  $1 \text{ kg/m}^2$  bezogen auf die Deckenfläche.
- Gegenüber konventionell erstellten Stahlbetondecken wird kaum eine Reduktion des Betonverbrauchs erreicht, daher stellt die Konstruktion leider keine wirkliche Alternative zum Betonbau dar.

Bambus in der Zugzone konnte bei den Prüfkörpern dieser Testreihe sein Potenzial teilweise entwickeln. Das Versagen trat aber durch Scherversagen des Betons ein. Es stellt sich die Frage, weshalb Bambus nur in der Zugzone als Ersatz für Stahl verwendet wurde. Denn die hohe Druckfestigkeit von Bambus lässt das Material auch geeignet zum Einsatz in der Druckzone eines Trägers erscheinen. Dafür jedoch muss die schubsteife Verdübelung von Druck- und Zugzone ermöglicht werden.

(In Abschnitt 9 werden diese Tragwerke als „GHAVAMI-BTDG-HD“ und „GHAVAMI-BTDG-ED“ in der Vergleichswertung aufgeführt.)

### **6.2.2 Nachgiebig verbundene Bambus-Querschnitte**

Nachdem in Abschnitt 4 die Nachteile gestapelter und mit Dübeln verbundener Konstruktionen erörtert worden sind, soll an dieser Stelle der Blick von den Fügepunkten auf ein entsprechendes Tragwerk gerichtet werden, um die Eigenarten dieser Konstruktionsweise darzulegen und vorhandene Vorteile zu benennen. In konventionellen Bambusbauweisen werden Halme gestapelt und konstruktiv miteinander verbunden, um eine größere statische Höhe von Balken zu erlangen (Abb. 66 a – c). Üblicherweise geschieht dies mittels stabförmiger Verbindungsmittel (Dübel aus Bambus, Holz oder Stahl, Gewindestäbe etc.). Bei gering belasteten Knotenpunkten stellt dieses Fügeprinzip kaum ein Problem dar. Höher belastete Knotenpunkte hingegen benötigen eine Ausmörtelung der beteiligten Internodien, um die lokalen Spannungen zu reduzieren. Für die Verbindung mit Dübeln sollten nur besonders dickwandige Halme verwendet werden. Das Problem dieser Verbindungen ist ihre geringe Schubsteifigkeit, weshalb die Konstruktionen als Ganzes unter Nachgiebigkeit und Verformung leiden. Traditionell finden sie daher vornehmlich für Dächer von eingeschossigen Bauten Anwendung. Im Vergleich zu den geringen Lasten einer Dachkonstruktion benötigen Geschossdecken jedoch größere Steifigkeit und Stabilität.

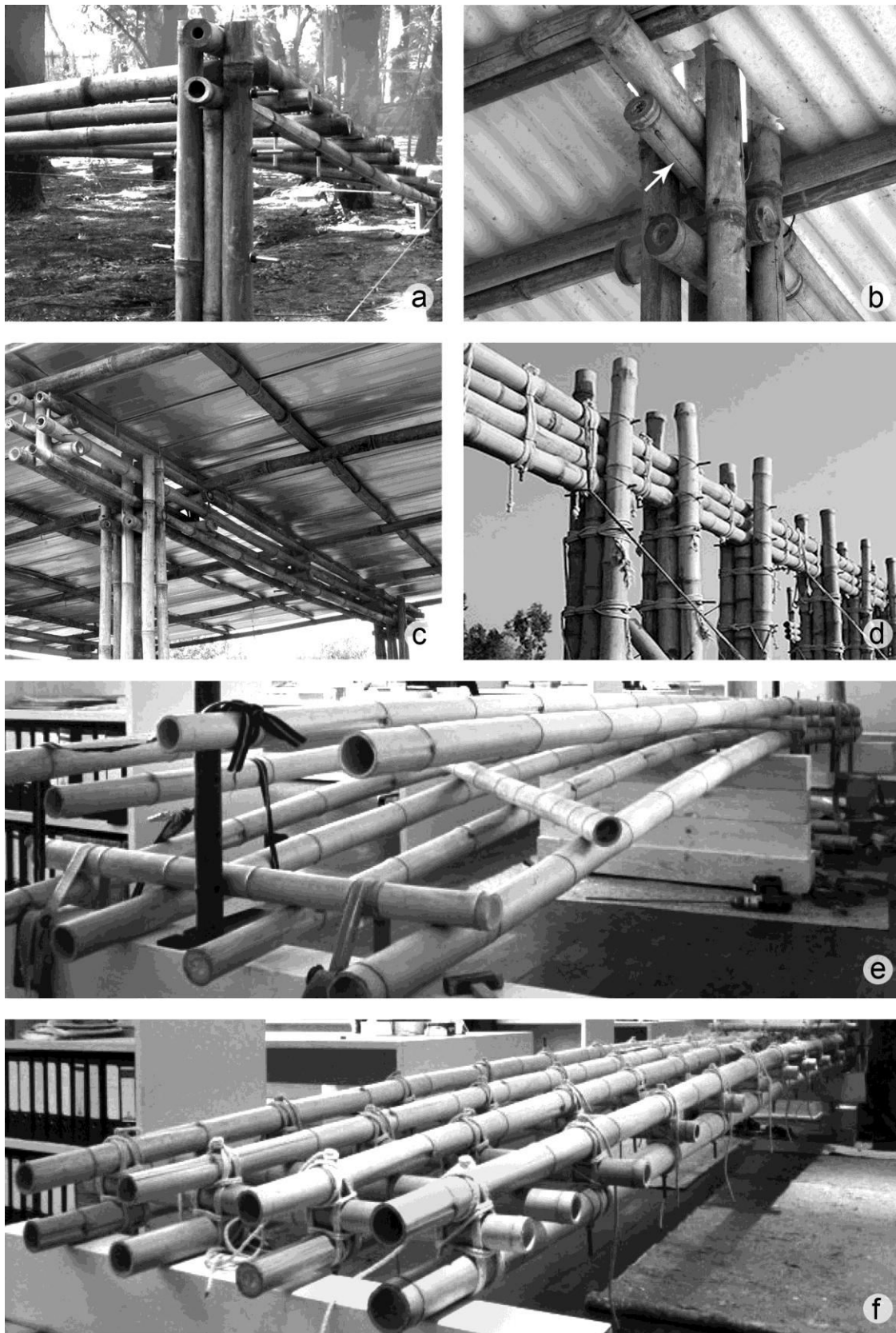


Abb. 66: Nachgiebig verbundene Bambushalme als Träger: a) Zwei Halme mit Abstand verbunden als Randträger. b) Zwei Halme ohne Abstand verbunden als Sparren. c) Sechs Halme mit Abstand verbunden. d) Vier Halme ohne Abstand verbunden als Hauptträger und Deckenaufleger. e) Montage des Bambus-Rost mit Überhöhung der Feldmitte. f) Fertige Trägerschar des Decken-Rosts. (Bilder d – f: © Ziegert-Roswag-Seiler Architekten und Ingenieure, Berlin.)

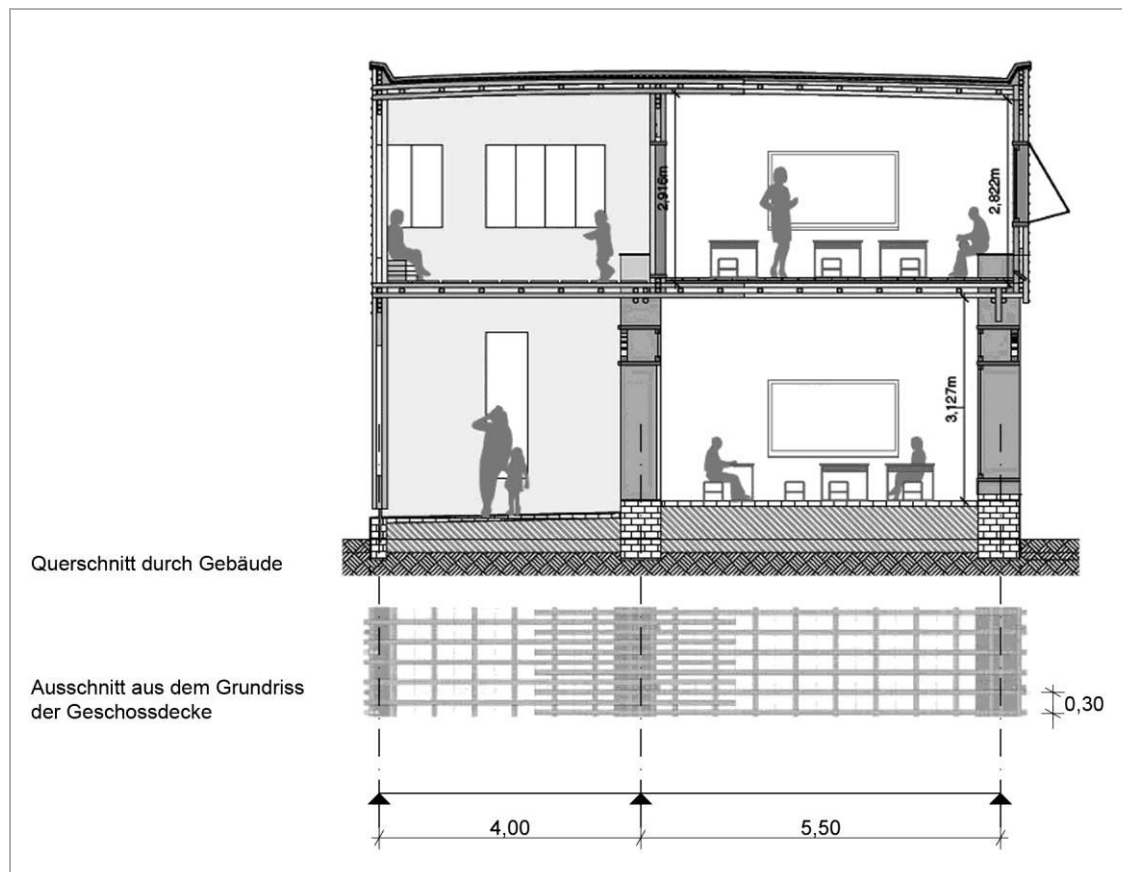


Abb. 67: Schulgebäude Tipu-Sultan-Merkez, Pakistan. Querschnitt durch das Gebäude und Grundriss-Ausschnitt des Deckentragwerks (© Ziegert-Roswag-Seiler Architekten und Ingenieure, Berlin).

### 6.2.2.1 Konstruktionsprinzip nach Ziegert-Roswag-Seiler

Die Deckenkonstruktion des zweigeschossigen Schulgebäudes *Tipu Sultan Merkez* (TSM) in Pakistan, erbaut im Jahr 2012 von *Ziegert-Roswag-Seiler Architekten* (ZRS) aus Berlin, soll an dieser Stelle als ein weiteres Beispiel möglicher Deckenkonstruktionen dienen:

Die Deckenkonstruktion besteht aus einer Schar gekoppelter Durchlaufträger über zwei Felder. Konstruktiv gliedert sich die Decke in drei Ebenen. Die obere und untere Ebene enthalten Halme in Längsrichtung, die mittlere Ebene Halme in Querrichtung.

Alle 30 cm sind die Halme der oberen und unteren Trägerebene miteinander verdübelt. Im Abstand von 30 cm liegen die Trägerpaare als Schar nebeneinander und sind durch die Querhalme der Mittelebene miteinander verbunden, sodass ein quadratisches Raster entsteht. Eine günstige Lastquerverteilung folgt aus dieser Verbindung. Die Querhalme sind gleichzeitig Nebenträger für den Fußbodenaufbau. Gespaltene Bambushalme dienen als Schalung und eine Lehmauffüllung zur Erlangung günstigerer Schallschutz- und Schwingungseigenschaften (Abb. 68).

Das Eigengewicht der Konstruktion beträgt insgesamt  $1,64 \text{ kN/m}^2$ , die Decke ist für eine Nutzlast von  $1,90 \text{ kN/m}^2$  ausgelegt. Aus der Gebäudenutzung folgen Spannweiten von 5,50 m für die Klassenräume und 4,00 m für den anschließenden Laubengang (Abb. 67). Die Halme beider Deckenfelder reichen jeweils über das mittlere Auflager hinaus und sind über den gesamten Bereich des Stützmoments überlappend und biegesteif miteinander verbunden.

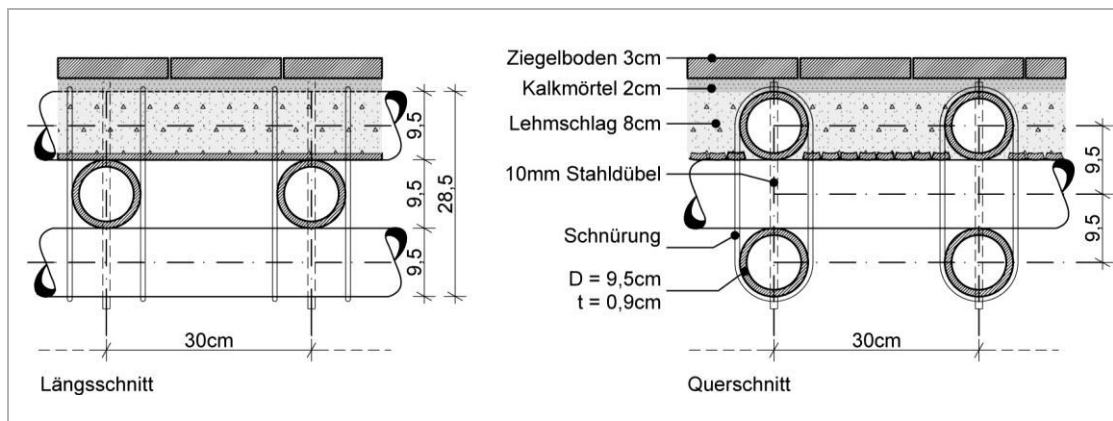


Abb. 68: Längs- und Querschnitt durch die Deckenkonstruktion des Schulgebäudes TSM.

Zwei konstruktive Maßnahmen zur Begrenzung der Verformung sind hervorzuheben:

1. Die Durchlaufwirkung reduziert die effektive Länge des Feldes (Abstand der Momenten-Nullpunkte) auf etwa 80 % der tatsächlichen Länge. Dies wirkt sich günstig auf die Verformung und den Biegemomentenbetrag aus.
2. Die Deckenkonstruktion wurde mit einer deutlichen Überhöhung montiert, um der unvermeidlichen Nachgiebigkeit der zahlreichen Dübelverbindungen zu begegnen.

Mithilfe der Verdübelung lässt sich das Flächenträgheitsmoment der verbundenen Querschnitte bedeutend steigern. Der Steinersche Anteil wird in dieser Konstruktion rechnerisch zu 40 % ausgenutzt. Ein effektives Flächenträgheitsmoment von  $I_{\text{eff}} = 2.431 \text{ cm}^4$  kann theoretisch durch ein Trägerpaar generiert werden (27). Für jedes Trägerpaar werden drei Halme benötigt: Je einen für die obere und untere Trägerebene und einen Halm für die Querlage in der Mitte. Jeder der Halme mit einem Querschnitt von 95/9 mm besitzt ein Flächenträgheitsmoment von  $I = 227 \text{ cm}^4$ . Durch die Verdübelung der Halme wird dieser Wert in der Verbundwirkung rechnerisch um den Faktor 3,75 gesteigert (27).

Vorteile der Konstruktion:

- + Ein herausragender Vorteil dieser Deckenkonstruktion liegt in der Montierbarkeit mit einfachen Mitteln. Benötigt werden nur Bohrmaschine, Säge, Dübel und Stricke.
- + Im Vergleich zu den eingesetzten Halmen wird durch die Verdübelung die Gesamtsteifigkeit deutlich gesteigert.
- + Die Halme der mittleren Ebene sorgen für günstige Lastquerverteilung und reduzieren gleichzeitig die Gesamthöhe des Deckenbauteils.

Nachteile der Konstruktion:

- Die statischen Annahmen entsprechen den Modellvorstellungen zylindrischer Rohre, welche eine stark idealisierte Halmgeometrie darstellen.
- Die Bambushalme erfahren an vielen Punkten ungünstige Halmquerpressungen.
- Der Kraftübertrag mittels Dübeln hat eine sehr hohe Scherbeanspruchung der Halmwand zur Folge. Dübellöcher sind, wie bereits in Abschnitt 4.2 dargestellt, stets Schwachpunkte in Bambuskonstruktionen.

(In Abschnitt 9 wird dieses Tragwerk als „ZRS-TSM-SCHOOL“ in der Vergleichswertung aufgeführt.)



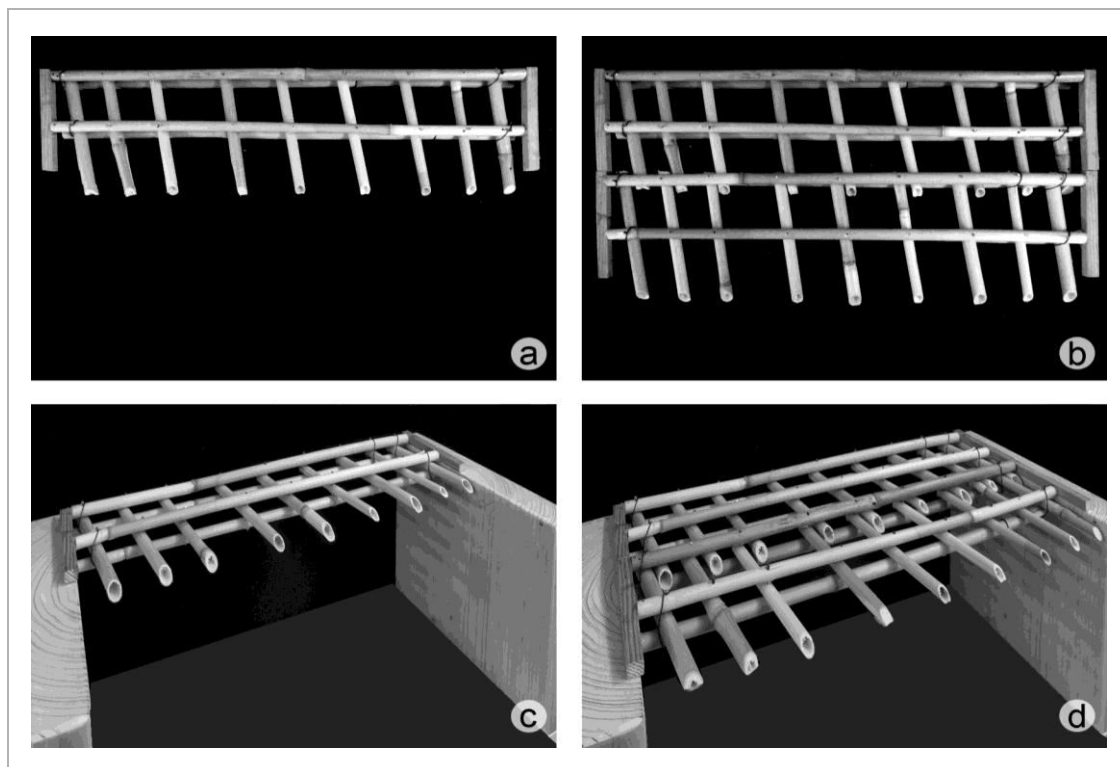


Abb. 69: Modellvorschlag aus Schilfrohr für das Fügen vorgefertigter Deckenelemente.

### 6.2.2.2 Potenzial für die Vorfertigung

Das vorgestellte Schulgebäude ist nicht mit dem Anspruch einer Massenfertigung entworfen worden. Ganz im Gegenteil: Unter dem Aspekt der technisch und finanziell eingeschränkten Mittel des Ortes wurde eine Konstruktion entwickelt, welche auf die lokal verfügbaren Ressourcen (Arbeitskraft, Material, Werkzeug) abgestimmt war. Die Behandlung und Montage der rohen Bambushalme fand am Einbauort statt, was die Transportwege und den Maschinenaufwand reduzierte und lokale Handwerker in die Abläufe einband. Diese Tatsachen spiegeln einen Anspruch wider, der über die reinen Belange des Tragwerks hinausreicht und kulturelle sowie soziale Aspekte einbezieht.

Angesichts der konstruktiven Vorteile stellt das Deckentragwerk aus nachgiebig verbundenen Halmen eine strukturell gelungene Lösung dar, weshalb Möglichkeiten einer Vorfertigung für breitere Anwendungen überlegenswert sind.

Abb. 69 zeigt ein Modell aus Schilfrohr, welches den Versuch darstellt, das Deckentragwerk in Teilen vorzufertigen. Am Einbauplatz könnten die einzelnen Elemente nach dem Nut-und-Feder-Prinzip zusammengesteckt werden. Eine leichte Schrägstellung der Querhalme sorgt dafür, dass diese nicht in räumliche Konflikte geraten. Es zeigt sich jedoch, dass der mehrschichtige Aufbau mit deutlichen Toleranzen umzugehen hat, welche aus den wechselnden Querschnittswerten der Halme folgen. Das Einführen der Mittelebene zwischen die äußeren Halmlagen gestaltet sich schwierig aufgrund der unterschiedlichen Halmdurchmesser. Die einzelnen Elemente könnten jedoch auch ohne die gemeinsame Kopplung funktionieren. Die Elementenden sind in diesem Modell als Kanthölzer dargestellt, was aus Gründen der Vereinheitlichung geschah und in den Abschnitten 7.3 und 8.3 eingehender erläutert wird.

### 6.2.3 Laminated Bamboo Lumber (LBL)

Durch Zerspanen, Zerfasern oder Parallelfraßen kann Bambus zerlegt und anschließend mit Bindemitteln zu Platten oder Kanteln industriell weiterverarbeitet werden. So wird aus dem natürlichen und unregelmäßigen Rohstoff ein kontrollierbarer und zumeist parallelrandiger Baustoff. In Anlehnung an die englische Bezeichnung für Brettschichtholz *Glued Laminated Timber* (kurz: „Glulam“), wird dieser verklebte Bambus auch „Glubam“ oder „LBL“ (*Laminated Bamboo Lumber*) genannt. Parkett, Dielen und auch Balken mit rechteckigem Vollquerschnitt lassen sich so aus einzelnen Bambus-Mantellamellen zusammenfügen (Abb. 71). Da im Gegensatz zum Holz die Mehrzahl der Bambusarten hohl ist, steht lediglich das Material der Halmwandung zur Verfügung. Die geringe Wanddicke ergibt allerdings Lamellen, welche nur etwa 20 x 4 mm messen. Dies erklärt den erheblich höheren Bearbeitungs- und Klebstoffaufwand bei LBL. In seiner konstruktiven Anwendung wurde LBL erprobt und ist in jüngerer Zeit umfangreich untersucht worden.<sup>32</sup>

#### 6.2.3.1 Vorteile von LBL

Vorteilhaft an LBL ist die regelmäßige und kontrollierbare Geometrie der orthogonalen Querschnitte, welche eine Anwendung ähnlich der von Massivholz erlaubt (Abb. 70). Die Problematik der Halmquerpressung ist bei Vollquerschnitten nicht mehr gegeben. Durch das Entfernen der Außenschichten ist die Festigkeit von LBL in Faserrichtung zwar geringer als die Festigkeit ganzer Bambushalme, aber höher als die Festigkeit von Nadelholzprofilen. Dies kann gegenüber Holzquerschnitten geringere Profilgrößen ermöglichen.

#### 6.2.3.2 Nachteile von LBL

So günstig die Möglichkeiten der Anwendung von LBL für serielle Konstruktionen erscheinen – die gravierenden Nachteile des zusammengeklebten Vollquerschnitts lassen sich nicht übersehen:

- Das System der Halmröhre, welche für Zug, Druck und Biegung natürlich optimiert ist, wird durch das Auftrennen in Lamellen zerstört.
- Das Ebener der Außenseite vernichtet die Bereiche mit der höchsten Faserdichte<sup>33</sup>.
- Vom vorhandenen Bambusmaterial wird nur etwa ein Drittel für die Lamellen verwendet. Durch Sägen und Fräsen gehen zwei Drittel des Bambusmaterials als Faserabfall verloren (Abb. 72). Der ökologische und ökonomische Vorteil des hohen Flächenertrags von Bambus gegenüber Nutzholzarten wird dadurch verspielt.
- Zur Herstellung von LBL werden neben dem hohen mechanischen Aufwand auch erhebliche Mengen Leim benötigt. Aufgrund der geringen Abmessungen der einzelnen Lamellen und der daraus resultierenden Steigerung der Leimfläche, beträgt der Leimanteil bei LBL<sup>34</sup> etwa 5 bis 8 %.
- Beim Einfeldträger unter Gleichstreckenlast wird der Balken-Vollquerschnitt nur zu einem Bruchteil tatsächlich ausgenutzt. (Abb. 73). Große Teile des LBL-Balkens bestehen somit aus hochaufbereitetem Material, welches völlig ungenutzt bleibt.
- Die Faserrichtung und die Hauptspannungslinien stimmen nicht überein.

<sup>32</sup> Xiao, 2008 (56); Rittironk, 2009 (28); Pereira, 2012 (55); Sharma, 2015 (32) u.a.

<sup>33</sup> Bei der Gegenüberstellung von LBL und einfachen Bambusspalten zeigt sich, dass durch die Bearbeitung die Zugfestigkeit erheblich reduziert wird: 90 MPa für LBL und 153 MPa für einfache Bambusspalten (32).

<sup>34</sup> Zum Vergleich: Bei Brettschichtholz beträgt der Leimanteil lediglich 1 bis 2 %

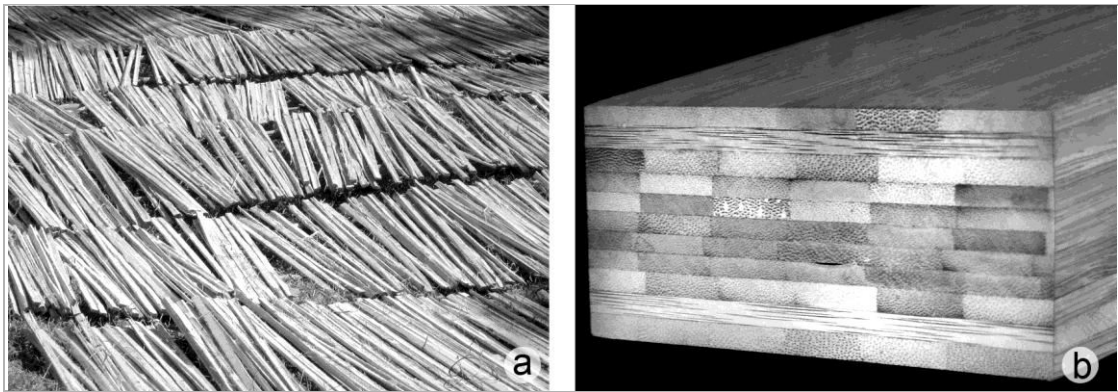


Abb. 70: a) Vor dem Verleimen werden die Lamellen zum Trocknen ausgebreitet. b) Blick auf die Stirnfläche eines LBL-Querschnitts (50 x 120 mm) zweite Schicht von außen um 90° gedreht.

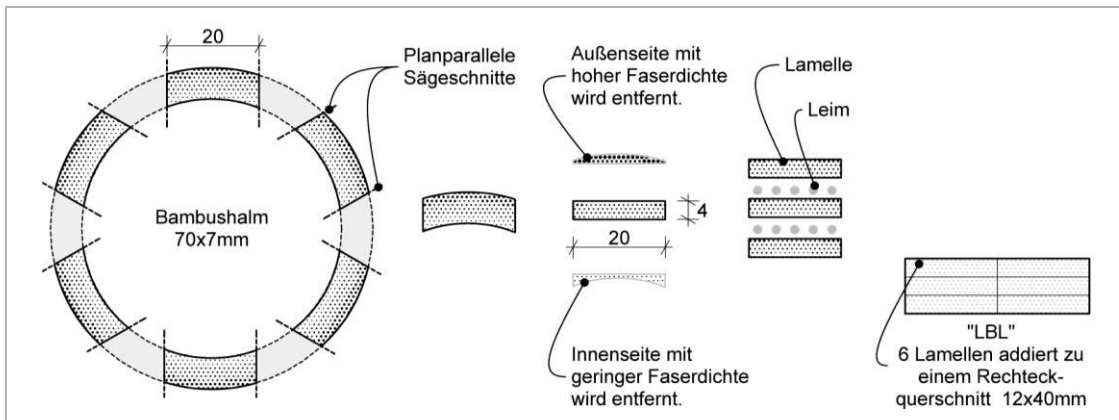


Abb. 71: Herstellung von Laminated Bamboo Lumber aus runden Bambushalmen.

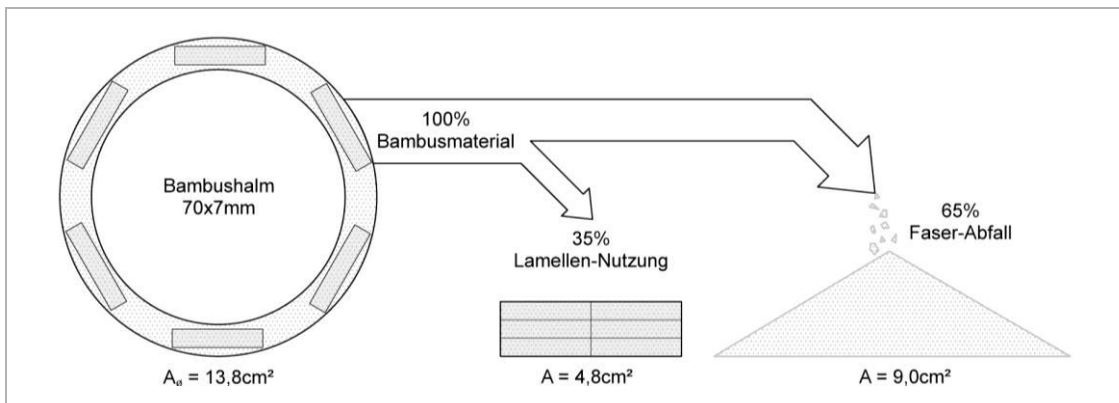


Abb. 72: Der Herstellungsprozess von LBL bringt einen enormen Materialverlusten mit sich.

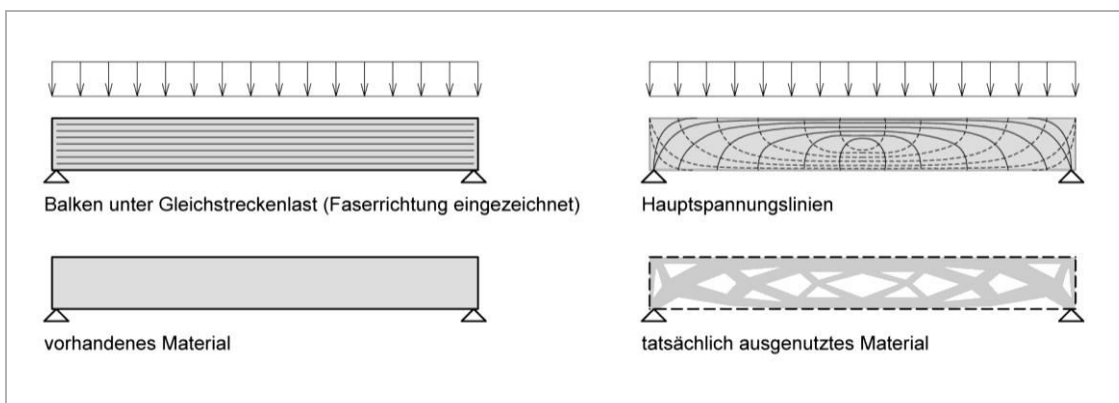


Abb. 73: Das Material eines Balkens unter Gleichstreckenlast wird nur zu einem Bruchteil tatsächlich ausgenutzt. Faserrichtung und Hauptspannungslinien stimmen nicht überein.

### 6.2.3.3 LBL als Material für Deckenbalken

Im Folgenden soll eine rechnerische Gegenüberstellung von Materialeinsatz und Flächenträgheitsmoment den Rohstoff- und Prozessaufwand der LBL-Herstellung verdeutlichen:

Zur Erfüllung der in der Zielsetzung formulierten Anforderungen sollen LBL-Träger eines Deckenelements betrachtet werden, die ein Flächenträgheitsmoment von  $I > 8.320 \text{ cm}^4$  je 1 m Deckenbreite besitzen. Folgende Annahmen bestehen:

- Die LBL-Profile haben Querschnitte mit einem Verhältnis von  $h = 3 \cdot b$ .
- Die Lamellen werden aus Bambushalmen mit  $D/t = 70/7 \text{ mm}$  gewonnen. Je Halm lassen sich sechs Lamellen mit den Abmessungen  $4 \times 20 \text{ mm}$  ausschneiden.
- Für  $4,8 \text{ cm}^2$  Trägerquerschnittsfläche wird folglich je 1 m Balkenlänge 1 m Bambushalm benötigt.

Es werden zwei Varianten betrachtet und den jeweiligen Aufwendungen an Bambushalmen gegenübergestellt (Abb. 74):

- 1 x LBL: ein großer Träger mit 1,00 m Achsabstand
- 2 x LBL: zwei kleinere Träger mit 0,50 m Achsabstand.

Der große und hohe Träger nutzt das Material zwar besser aus als die zwei kleinen Träger, doch ist auch ein stärkeres Sekundärtragwerk nötig, um die Flächenlasten auf dem Träger zu sammeln. In Tab. 5 sind die Aufwendungen für je 1 m Balkenlänge dargestellt:

Für die Herstellung eines Balkenquerschnitts von  $7,8 \times 23,4 \text{ cm}$ , müssen 38 m Bambushalme zu 228 Lamellen zerschnitten werden. Dafür müssen insgesamt 912 m Schnitt- bzw. Fräslänge getätigt werden. Zum anschließenden Verleimen, der  $10,9 \text{ m}^2$  Lamellenoberfläche, ist rund 1 kg Leim nötig. 27 kg Faserabfall entstehen als Nebenprodukt. Erhebliche Energieaufwendungen, Feinstaub- und Lösemittelmmissionen sind bei dieser intensiven Bearbeitung unvermeidbar (Abb. 72).

Deutlich wird an diesem Beispiel, dass bei der Herstellung von tragenden Balken aus LBL die Serialität zu Lasten der Materialeffizienz geht. Wenn überhaupt eine Anwendung als Träger erfolgen sollte, wären optimierte und aufgelöste Querschnitte in Form von Doppel-T-Profilen oder Gitterträgern anzustreben, bei denen das Material an beanspruchter Stelle zum Einsatz kommt. Die Faserrichtung und Hauptspannungslinien des Trägers sollten dabei möglichst übereinstimmen. Völlig verfehlt wäre es hingegen, Stützen aus LBL zu fertigen, da die Halmröhre bereits von Natur aus bestens geeignet ist, Druckkräfte zu übertragen. Die Erzeugung orthogonaler Körperflächen bei LBL bringt zwei gravierende Nachteile mit sich:

- *Die orthogonale Kubatur der Lamelle* kann die Festigkeitspotenziale des Baustoffs nicht auszunutzen. Die hochfesten Bereiche gehen verloren (Abb. 71).
- *Die orthogonale Kubatur des Balkens* verteilt das Material undifferenziert auf alle Zonen gleichermaßen. Material wird somit in unbelasteten Bereichen verschwendet (Abb. 73).

Es stellt sich die Frage, ob eine derartige „Veredelungsstufe“ überhaupt notwendig ist, um einfache Bauteile zu schaffen. So hergestellte Produkte aus Bambus, auch „Engineered-Bamboo“ genannt, sind kaum mehr als umweltfreundlich zu bezeichnen.

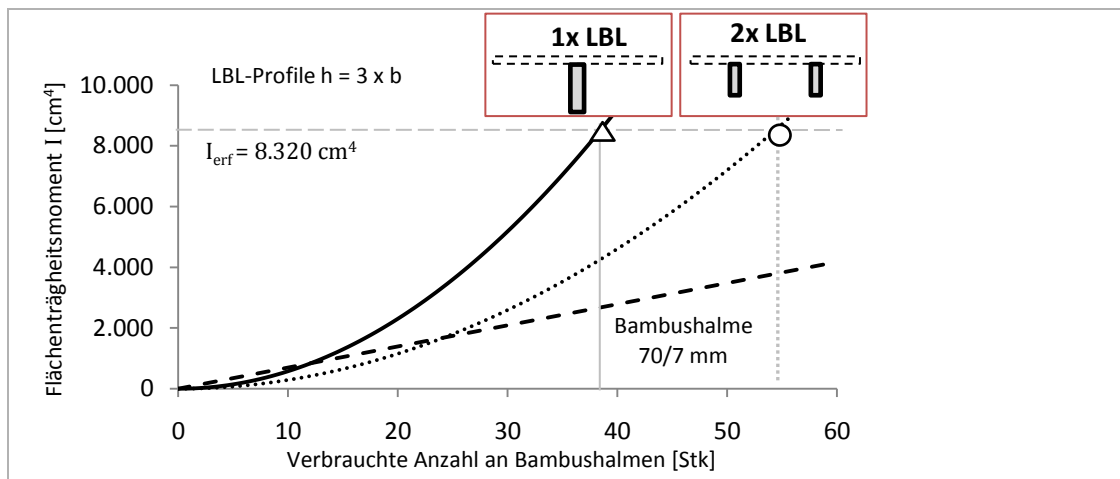


Abb. 74: Eine Gegenüberstellung von Bambusverbrauch und Flächenträgheitsmoment bei LBL-Profilen.

	Abstand e	Breite b	Höhe h	Fläche A	I	Aufwendungen je 1m			
						Bambus	Lamel- len	Schnitt- länge	Leim
						[m/m]	[Stk]	[m/m]	[g/m]
1 Profil LBL	1,00	7,8	23,4	182	8.328	38	228	912	1.050
2 Profile LBL	0,50	13,2 (:2)	19,7	259 (:2)	8.398 (:2)	54 (:2)	324 (:2)	1.296 (:2)	1.320 (:2)

Tab. 5: Der Erstellungsaufwand für LBL-Balken.

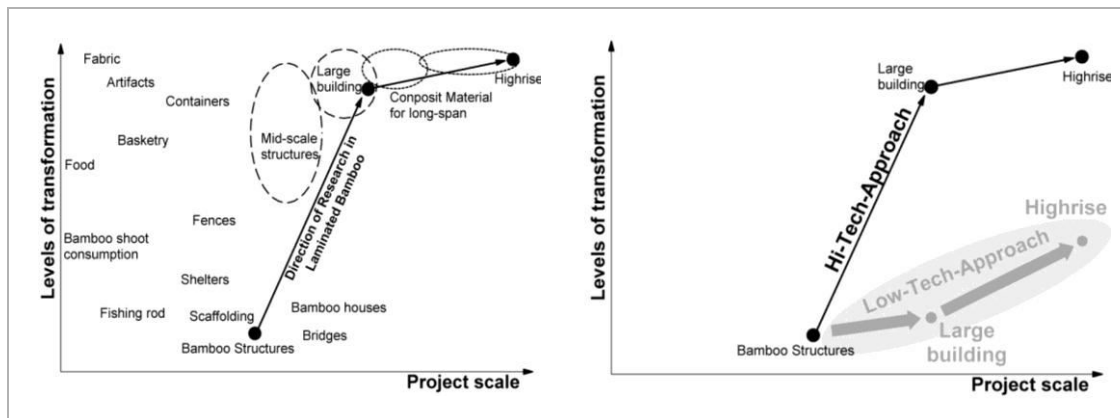


Abb. 75: Entwicklungstendenz für LBL nach Rittironk (28) (links). Abwandlung der Grafik und Darstellung eines alternativen „Low-Tech-Entwicklungswegs“ für Konstruktionen mit natürlich rundem Bambus (rechts).

#### 6.2.3.4 Mögliche Entwicklungstendenzen

LBL besitzt höhere Materialfestigkeiten als Holz, daher ist die Verwendung von LBL prinzipiell zu begrüßen. Die Erwartungen an das Material sollten jedoch stets vor dem Hintergrund des großen Produktionsaufwands gesehen werden. LBL ist in konstruktiver Hinsicht unter anderem von Rittironk untersucht worden (28). Rittironk nahm an, dass der Entwicklungsweg zu höherwertigen Materialverwendungen zunächst über eine massive Steigerung des Bearbeitungsaufwands („levels of transformation“) ginge, bevor größere Projektmaßstäbe erreichbar wären.

Entgegen der von Rittironk skizzierten High-Tech-Entwicklungstendenz verfolgt die vorliegende Arbeit einen Entwicklungsweg mit einem geringeren Transformations-Aufwand und einer näher am natürlichen Halm orientierten Bauweise. Das Spannungsfeld von Projektmaßstab und Bearbeitungsaufwand soll folglich in einem „Low-Tech-Ansatz“ durchmessen werden.

### 6.3 Bewertung der Referenz-Deckentragwerke

Die in Abb. 76 zusammengefasste Wertung der in Abschnitt 6.2 betrachteten Deckentragwerke soll vorhandene Potenziale benennen und mögliche Entwicklungsrichtungen der weiteren Ausarbeitung abschätzen. Abgesehen vom verleimten LBL zeigen die Beispiele, dass bei der Erstellung Schubsteifer Gesamtquerschnitte das Erreichen der Verbundwirkung die größte Herausforderung darstellt.


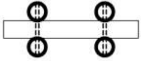
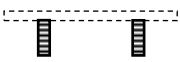
	<b>Bambus-Beton-Verbund (System nach Ghavami)</b>
	<p>Bewertung:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>+ Vorfertigung ist möglich</li><li>+ hohe Steifigkeit</li><li>+ Bambus wird als Stahl-Ersatz verwendet</li><li>+ günstiges Tragverhalten, wenn die Nodien erhalten bleiben</li><li>– der Betonanteil entspricht konventionellem Stahlbetonbau</li><li>– hoher Aufwand an Epoxidharz für die Beschichtung</li></ul> <p>Fazit:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ <i>keine wirkliche Alternative zum Stahlbetonbau</i></li><li>⇒ <i>die Schubsteife Verbindung von Beton und Bambus ist die größte Herausforderung</i></li></ul>
	<b>Nachgiebig verbundene Bambus-Querschnitte (System nach ZRS)</b>
	<p>Bewertung:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>+ sehr geringer technischer Aufwand</li><li>+ ausschließlich natürliche Baustoffe: Bambus, Lehm, Stroh</li><li>+ ein Durchlaufträger mit Überhöhung wirkt der Verformung entgegen</li><li>– ungünstige Füge-technik mit Halm-Stapelung und Dübel-Verwendung</li><li>– natürliche Halmvarianzen verhindern verlässliche Aussagen zu Steifigkeit und Tragfähigkeit der Querschnitte</li></ul> <p>Fazit:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ <i>die Schubsteife Verbindung von Ober- und Untergurt ist die größte Herausforderung</i></li><li>⇒ <i>es besteht Verbesserungspotenzial im Bereich Füge-technik und Vorfertigungsmöglichkeit</i></li><li>⇒ <i>Weiterentwicklung vergleichbarer Konzepte sollte angestrebt werden</i></li></ul>
	<b>Laminated Bamboo Lumber (LBL)</b>
	<p>Bewertung:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>+ ausgezeichnetes Vorfertigungs-Potenzial</li><li>+ die Füge-technik der Halbzeuge entspricht dem Holzbau</li><li>– hoher Maschinenaufwand</li><li>– Bambus- und Leimaufwand sind unverhältnismäßig hoch</li><li>– Faserrichtung im zusammengesetzten Querschnitt orientiert sich nicht an den Hauptspannungslinien</li><li>– Halmbereiche mit der höchsten Festigkeit werden entfernt, es resultiert eine geringere Materialfestigkeit als im runden Halm</li></ul> <p>Fazit:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>⇒ <i>Hochleistungsmaterial, das mit enormem Aufwand hergestellt wird</i></li><li>⇒ <i>Eine sparsame Verwendung des Materials kann gerechtfertigt erscheinen, wenn zusammengesetzte Träger gefertigt werden</i></li></ul>

Abb. 76: Bewertung der Referenz-Deckentragwerke.

## 7 Grundfragen der Vorfertigung von Bambus-Elementen

Der Gedanke, Gebäude vorzufertigen, ist nicht neu. Das Prinzip der Massenfertigung, welches als logische Folge der zunehmenden Industrialisierung Anwendung fand, hat auch den Bau-sektor nicht unberührt gelassen. Das Fließband steht als Sinnbild für eine synchronisierte Fabrikation, bei der nicht nur das Produkt nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen technisch perfektioniert ist, sondern auch der Fertigungsprozess selbst. Je mehr der Fertigungsprozess in die Fabrik verlagert wurde, desto größer wurden die vorgefertigten Elemente. Dieses Streben nach maximierten Elementgrößen, fand seine Schranken in den praktischen Grenzen des Transports. Holz, als relativ leichtes Baumaterial, gewann daher früh an Bedeutung für die Gebäudevorfertigung. Konrad Wachsmann schrieb im Jahr 1930 über den technologischen Entwicklungsschritt, den der Baustoff Holz zu jener Zeit vollzog:

*„Die alte hochentwickelte Handwerkskunst geht in die moderne Maschinenteknik über. Hier findet sie neue Möglichkeiten der Anwendung, neue Gestaltungen. Das Holz als Konstruktionselement in zimmermannsmäßiger Weise verarbeitet genügt nicht mehr allen Ansprüchen in fabrikatorischer und statischer Hinsicht. Aber als ein konsequent von Maschinen bearbeitetes Fabrikationsmaterial hat es technisch und wirtschaftlich dieselbe Bedeutung wie irgendein anderer Baustoff.“<sup>35</sup>*

Dieses Postulat rationalisierten Bauens mit Holz hat knapp 90 Jahre später für den Baustoff Bambus volle Gültigkeit. Die bisherige handwerkliche Bambusbauweise genügt nicht mehr allen Ansprüchen in fabrikatorischer und statischer Hinsicht. Vorfertigung und Mehrgeschos-sigkeit sind der traditionellen Bambusbauweise fremd. Trotz Jahrtausende menschlicher Erfahrung mit diesem Material ist die Industrialisierung des Bauwesens an diesem Stoff bis ins 21. Jahrhundert hinein vorbeigezogen. Erst seit wenigen Jahren werden Spanplatten (OSB) und Leimprofile aus Bambuslamellen in großmaßstäblichen Fabrikanlagen hergestellt. Der runde, unbearbeitete Bambushalm jedoch konnte bis auf den heutigen Tag die Forderung des rationellen Bauens nach standardisierten Massenprodukten nicht erfüllen. Zu groß sind die natürlichen Streuungen der mechanischen und geometrischen Kennwerte, um exakt definierten Anforderungen zu genügen und in Normen erfasst zu werden. Wie aber lässt sich die Industrialisierung des Baustoffes Holz erklären, bei dem es sich doch ebenfalls um ein pflanzliches Naturprodukt handelt? Es lohnt sich also, einen Blick auf den modernen Holzbau zu richten als Vorbild für zukünftige Bambuskonstruktionen. Dieses Kapitel soll Antworten auf folgende Fragen liefern:

- Inwieweit lassen sich Holz und Bambus vergleichen?
- Welche Merkmale zeichnen die vorgefertigte Bauweise im modernen Holzbau aus?
- Welche Füge-technik prägt das vorgefertigte Bauen mit Holz?
- Welche Schlüsse lassen sich daraus für eine vorgefertigte Bambus-Bauweise ableiten?

---

<sup>35</sup> Wachsmann: *Holzhausbau Technik und Anwendung*, 1930 (53)

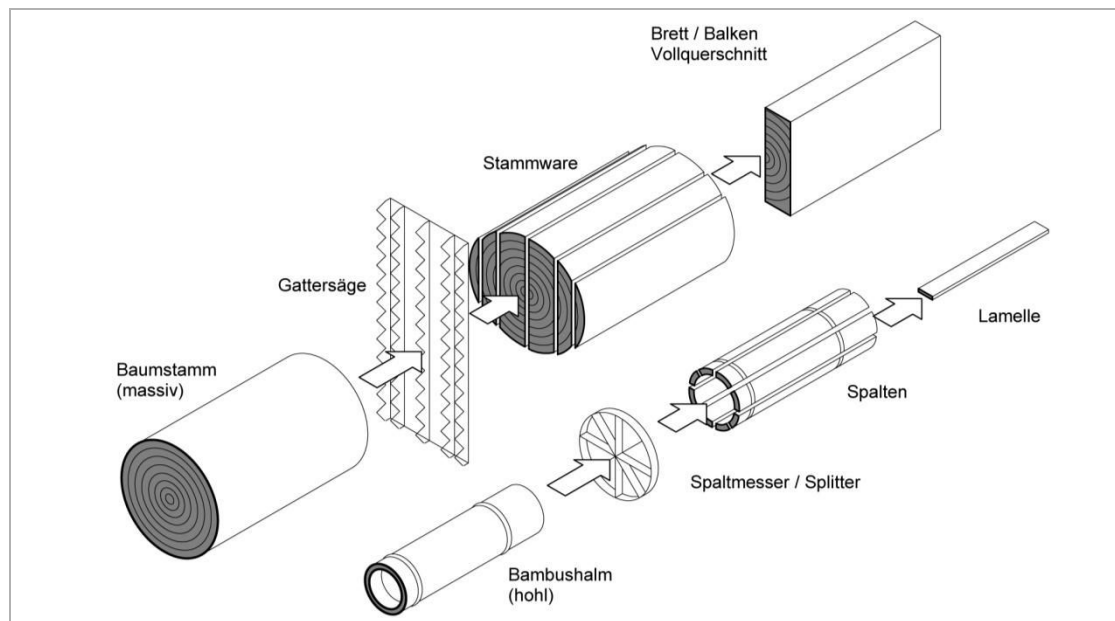


Abb. 77: Die Verarbeitung von Rundholz und Bambushalmen zu rechteckigen Balken bzw. Lamellen. Zu beachten sind die Unterschiede im resultierenden Querschnitt.

## 7.1 Analogie zum Holzbau

### 7.1.1 Pflanzliches Material

Bambus wird in der Biologie den Gräsern zugeordnet, während Holz aus Bäumen geschnitten wird. Hölzer verschiedener Baumarten unterscheiden sich in ihren Eigenschaften zum Teil stark voneinander und ebenso ist es bei den verschiedenen Bambusarten. Es gibt nicht *das* Holz oder *den* Bambus, sondern jeweils fein ausdifferenzierte Unterschiede zwischen den einzelnen Unterklassen. Dennoch gibt es Gemeinsamkeiten, die allen Hölzern und Bambusarten eigen sind und sie von anderen Baustoffen deutlich unterscheiden:

- die Hauptbestandteile sind Zellulose und Lignin
- sie sind brennbar
- sie sind anfällig gegenüber Schadorganismen (Insekten und Pilze)
- sie besitzen eine ausgeprägte und gerichtete Faserstruktur, aus welcher
  - ein anisotropes mechanisches Verhalten und
  - ein anisotropes Quell- und Schwindverhalten bei Feuchteänderung folgt.

Diese stofflichen Eigenschaften bestimmen die Einsatzmöglichkeiten von Bambus und Holz zu Bauzwecken grundlegend und haben entsprechende Folgen für die Ausführung von Konstruktionen. Trotz der Ähnlichkeiten von Bambus und Bauholz auf stofflicher Ebene sind die Unterschiede auf makro- und mikrostruktureller Ebene stark. Der wichtigste Unterschied ist wohl dieser:

⇒ *Ein Baumstamm ist massiv, ein Bambushalm ist hohl.*

Dieser vielleicht trivial erscheinende strukturelle Unterschied hat Auswirkungen auf alle weiteren Vergleiche, die zwischen der Bambus- und der Holzbauweise gezogen werden können. Er wirkt sich entscheidend auf die Weiterverarbeitung, die Belastbarkeit und die Fertigung möglicher Fügeprinzipien aus.



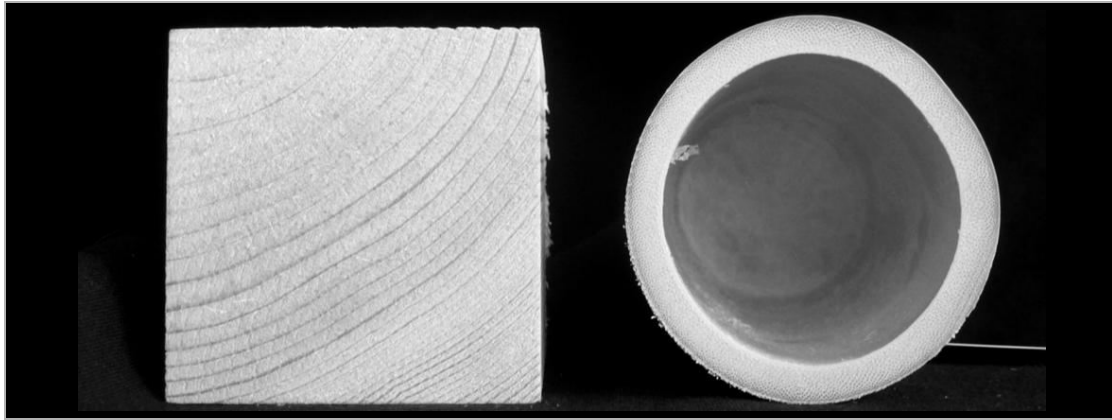


Abb. 78: Der massive Holzbalken und der hohle Bambushalm. Im Querschnitt offenbart sich der grundlegende Unterschied dieser zum Bauen verwendeten stabförmigen Pflanzenmaterialien.

### 7.1.2 Verarbeitung zum Baumaterial

Entsprechend ihres strukturellen Unterschieds unterscheidet sich auch die Weiterverarbeitung von Bambushalmen und Baumstämmen zu Baumaterial. Massive Baumstämmen können im Sägewerk durch ein Sägegatter geführt werden, bei Bambus sind diese Parallelschnitte aufgrund der Röhrenform nicht zielführend. Bambus wird daher durch Messer in radialer Anordnung, dem so genannten „Splitter“ aufgeteilt (Abb. 77). Bambusspalten können je nach Bedarf weiterverarbeitet werden: Die Prozesse sind zum Teil der Holzverarbeitung verwandt und umfassen unter anderem:

#### Werkstoffplatten

- in Harz getränkte Gewebematten („BMB“ – Bamoo Mat Board)
- Dreischichtplatten („BSB“ – Bamboo Strip Board)
- Zerspanung zu OSB-Platten
- Sperrholz, Stäbchenparkett etc.

#### Balken / Vollquerschnitte

- *LBL* (vgl. Abschnitt 6.2.3), ein Verfahren, bei dem der Halm gespalten, parallelgefräst und anschließend zu größeren Rechteckquerschnitten zusammengeleimt wird (Leimanteil etwa 5 bis 8 %).
- *Bamboo-Scrimber*. Beim „Scrimber“-Verfahren wird der Halm zwischen zwei Walzen zerquetscht. Anschließend werden die aufgeschlossenen Fasern unter Zugabe von Klebstoff (etwa 12 %) <sup>36</sup>, in die gewünschte Balken-Form gepresst.

Die Verfahren zur Herstellung von Bambus-Vollquerschnittbalken stellen jedoch durch die geringen Lamellenquerschnitte und den damit verbundenen großen Prozessaufwand eine Veredelungsstufe dar, die mit gewöhnlichem Schnittholz für Bauzwecke wirtschaftlich nicht konkurrieren kann (vgl. 6.2.3). Ein Anwendungsbereich besteht daher aktuell lediglich in der Substitution von Edelhölzern. Verleimte Bambusbalken sollen deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden, wenn nach Möglichkeiten für Deckenkonstruktionen aus Bambus gesucht wird. Neben den oben genannten Werkstoffplatten bleibt nur der natürlich runde Bambushalm als Baumaterial für tragende Anwendungen.

<sup>36</sup> Nach Auskunft der Firma *African Bamboo*: Urea-Formaldehyd-Klebstoffgehalt in Bamboo-Scrimber: 12 %.

### 7.1.3 Modularer Holztafelbau für Wohnbauten

Der Wandel vom handwerklich erstellten Fachwerkhaus zum vorgefertigten Holztafelbau stellt in etwa den Entwicklungsschritt dar, den Bambus noch zu vollziehen hat. Die Handwerkstradition vom Bauen mit Bambus hat sich zwar in vielen Kulturen unabhängig voneinander auf höchste Stände entwickelt, hat aber dadurch nicht den Weg für die industrialisierte Nutzung des Materials zu Bauzwecken ebnen können. Denn Handwerk und Massenproduktion stellen an das Arbeitsmaterial grundsätzlich verschiedene Anforderungen. Konrad Wachsmann schrieb 1959 dazu:

*„Zum Unterschied von handwerklich hergestellten Objekten, muss das Massenprodukt abstrakten modularen Koordinationssystemen entsprechen, um in fast unbegrenzten Kombinationsmöglichkeiten, in denen die Elemente und Teile eines Bauwerks an jedem Punkt sich harmonisch zusammenfügen, in einer Verfeinerung zu resultieren, die bisher unbekannt und unmöglich zu erreichen war.“<sup>37</sup>*

Aber nicht nur am Bauplatz ist eine große Exaktheit gefordert, auch der geplante Fertigungsprozess ist in noch stärkerem Maße auf exakt wiederkehrende Halbzeuge angewiesen.

Die Anforderung an Wohnbauten geht über den reinen Regenschutz hinaus. Prägendes Element ist die Wand<sup>38</sup>, welche den Wohnraum umgibt und weiteren Witterungsschutz, Sicherheit und Privatsphäre spendet. Dies gilt sowohl für die Abgrenzung zum Außenbereich, als auch zu benachbarten Wohneinheiten. Blickt man auf die Geschichte des Holzbaus zurück, finden sich in nahezu allen Baukulturen zunächst die Prinzipien der Fachwerkbauweise. Hier wirkt das Holz als lineares Tragelement und bildet in der Summe das Gerüst für weitere Ausfachungen, welche das bloße Tragwerk zur geschlossenen Fläche – der Wand – vervollständigen.

Durch das Bestreben, einen höheren Vorfertigungsgrad zu erhalten, ist in neuerer Zeit beim Holzbau ein tendenzieller Übergang von linienförmigen zu flächenförmigen Bauteilen zu beobachten. Die auf der Baustelle angelieferten Elemente sind nicht mehr lediglich Stützen und Träger, sondern geschosshohe Wandtafeln und Deckenplatten. Das eigentlich flächenhafte Wesen der raumbildenden Elemente wird hier unmittelbar deutlich und erlaubt eine beschleunigte Montage auf der Baustelle. Die Voraussetzung hierfür ist die exakte Vorfertigung in einer Werkstatt und entsprechende Transport- und Montagegeräte, um die Elemente in die endgültige Position zu bringen.

Die bislang wichtigste Art des Holztafelbaus stellt der Holzrahmenbau dar. Im Grunde entspricht der Holzrahmenbau mit seiner Vielzahl von vertikalen Ständern zwischen unterer Schwelle und oberem Rähm dem aufgelösten Prinzip des Fachwerkbaus. Die horizontale Aussteifung erfolgt allerdings nicht über Diagonalen, sondern über die Scheibenwirkung der Beplankung. Brettstapel- und Brettsperrholzelemente sind die jüngsten Entwicklungen in der Holztafelbauweise, welche in den Deckenplatten ihre Entsprechungen finden.

---

<sup>37</sup> Wachsmann: *Wendepunkt des Bauens*, 1959 (46)

<sup>38</sup> Etymologisch geht das Wort „Wand“ auf „winden“ also auf den Erstellungsprozess des ausfachenden Flechtwerks zurück, ähnlich dem „Gewand“, welches ein Gewebe bezeichnet. Nicht das Tragwerk, sondern der raumabschließende Charakter des Gefaches stellt somit das Wesensmerkmal der Wand dar.

Als Grundprinzipien erscheinen:

- ein hoher Vorfertigungsgrad für eine schnelle Montage
- geschosshohe Wandelemente bilden linienförmige Auflager
- einachsiger Lastabtrag der Geschossdeckenelemente (z.B. Brettstapeldecke)
- die horizontale Aussteifung erfolgt über Scheibenwirkung der Wand- und Deckentafeln
- ein streng orthogonales Konstruktionsraster, dem alle Elemente folgen

So unterschiedlich die Typologien des Wohnens in den verschiedenen Kulturen und Epochen der Welt auch sind, sie folgen einem gemeinsamen Muster: Wohnen bedeutet Rückzug, Rekreation, Sicherheit, Schlaf. Diese Bedürfnisse finden ihren räumlichen Ausdruck in der Abgeschlossenheit des Innen als Gegenpol zur Offenheit und Ungeschütztheit des Außen. Dem Wohnbau als Rückzugsort entspricht die Zell-Typologie einzelner Zimmer, nicht die aufgelöste Struktur der Halle. Das Vorhandensein von Wänden ist somit schon aus Gründen des Raumabschlusses erforderlich. Diese sollten konsequenterweise für strukturelle Aufgaben herangezogen werden. Bei der Konzeptfindung dieser Arbeit werden daher Wände gegenüber Stützen favorisiert. Statt einer Skelett-Struktur wird eine Ordnung von Wand-Schotten bzw. eine Zellenstruktur von Räumen angestrebt. Hierdurch kann eine Lastbündelung und damit extreme Materialbeanspruchung in Stützen und Hauptträgern vermieden werden. Der Anschlussbereich von Träger und Stütze stellt eine ungünstige punktuelle Lastkonzentration dar, während Wände als Deckenaufleger einen kontinuierlichen Lastabtrag ermöglichen.

## 7.2 Serialität

### 7.2.1 Exakte Reproduzierbarkeit

Für den rationellen Montageablauf ist es von Vorteil, wenn Maßabweichungen der verwendeten Bauteile nicht dazu zwingen, aufwendige Ausgleichsmaßnahmen zu ergreifen. Bei der seriellen Vorfertigung und Massenproduktion wird daher die Maßhaltigkeit zu einer der Hauptforderungen. Die große Anzahl der Variationen in der Bambusgeometrie führt jedoch zu unvermeidlichen Toleranzen bei der Ausführung. Improvisierte Ausgleichsmaßnahmen sind in der traditionellen Bauweise unumgänglich. Angesichts dieser Toleranzen wird die exakte und reproduzierbare Planung und Ausführung von Fügepunkten, wie sie für eine Vorfertigung von modularen Bauteilen Voraussetzung ist, unmöglich. Es stellt sich folglich die Frage, wie mit der Vielzahl der gegebenen Maßabweichungen umzugehen sei. Die Mantelfläche des Halmes besitzt keine exakt definierbaren geometrischen Parameter.

Daraus folgt:

- ⇒ *Die Mantelfläche als Maßreferenz ist für die Verwendung in vorgefertigten Elementen untauglich.*
- ⇒ *Einzig die Länge und Endpunkte eines Halmes können exakt bestimmt werden.*

Um die Problematik zu verdeutlichen, soll das anschauliche Beispiel einer hinderlichen Topographie gewählt werden, welche auf dem Weg zwischen einem bekannten Anfangs- (A) und Endpunkt (B) liegt. Die Topographie steht stellvertretend für die natürlichen Geometrieabweichungen von der Bambushalm-Mantelfläche. In der Auseinandersetzung mit diesem Hindernis ergeben sich folgende Alternativen (Abb. 79):



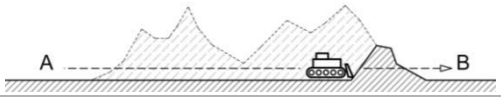

Bewältigung des Hindernisses		Anfang  Ende
<p><b>1 Das Hindernis wird akzeptiert.</b> Da in diesem Bereich kein Streckenabschnitt dem anderen gleicht, muss auf jede Situation mühsam individuell reagiert werden.</p>		
<p><b>2 Das Hindernis wird nivelliert.</b> Nach dem aufwendigen, maschinellen Eingriff ist der Weg nivelliert und jeder Streckenabschnitt gleicht dem anderen.</p>		
<p><b>3 Das Hindernis wird umgangen.</b> Bekannter Start- und Zielpunkt werden, unter Auslassung des Hindernisses, miteinander verbunden. Minimierter Eingriff und Aufwand.</p>		

Abb. 79: Die Art und Weise, in der ein Hindernis bewältigt wird, hat Auswirkungen auf den Aufwand.

Die Vorgehensweisen sollen Aufwand und Nutzen gegenüberstellen und beziehen sich auf:

1. **die traditionelle Bambus-Bauweise** mit enormen Toleranzen, welche mit handwerklichem Aufwand ausgeglichen werden müssen.
2. **die industriell aufbereiteten Bambusprodukte** wie LBL und Scrimber, welche mit enormem Maschinenaufwand eine hohe Serialität erzeugen.
3. **eine neue, modulare Bambus-Bauweise**, welche sich nur auf einfach zu kontrollierende Parameter bezieht.

Sollen vorgefertigte Elemente in den drei Raumrichtungen exakt gefügt werden, kommt eine Stapelung der Halme nicht infrage. Neben der Problematik der Halm-Querpressung widerspricht auch die Forderung nach vorhersehbaren und exakten Elementdimensionen den undefinierbaren Außenabmessungen natürlich gewachsener Bambushalme. Hieraus folgt:

⇒ *Nur eine Konstruktionsweise, die sich auf die Stirnflächen der Halme bezieht, ist frei von der geometrischen Unschärfe der Mantelfläche.*

### 7.2.2 Der Modulabschluss

Modulares Bauen stellt das passgenaue Fügen einer Anzahl verschiedener Teilmodule dar. Neben dem Modul-Maß sind die Fügepunkte in besonderer Weise charakteristisch für das jeweilige Modulsystem. An jedem Fügepunkt sind mindestens zwei Module mit ihren Modulabschlüssen beteiligt, welche entsprechend auf die Fügepunktsituation abgestimmt sind. Maßgebend für die Fügepunkte sind:

- räumliche Geometrie, Winkel der anschließenden Bauteile zueinander
- die Größe der zu übertragenden Kräfte
- raumabschließende und/oder dichtende Funktion
- Modulabmessungen

⇒ *Modulares Bauen setzt entsprechende Modulränder voraus, die einen Anschluss der einzelnen Elemente untereinander passgenau erlauben.*

Im Geometriepertoire der pseudo-zylindrischen Bambusstäbe finden sich keine geeigneten Konstanten, an welche sich ein regelmäßiges Fügeprinzip in drei Dimensionen anknüpfen ließe. Als Referenz können die modulare Ordnung und Struktur von Containern dienen, denn hier ergibt sich für das rationale Stapeln eine ganz ähnliche Herausforderung:

Die zu transportierenden Güter können unterschiedlichster Art und Form sein und Außenabmessungen aufweisen. Manche Güter lassen sich als Kisten in den vorgegebenen quaderförmigen Volumen unterbringen, andere sind flüssig und benötigen zylindrische Tanks, oder sind Aggregate, welche vollkommen individuelle Konturen besitzen (Abb. 80). Um diese verschiedenen Volumenformen dennoch in einer modularen Ordnung zusammenzufügen, besitzen alle Container genormte Abmessungen und Eckpunkte, durch die sämtliche Kräfte übertragen werden. Im Containerbau werden diese als „Corner Fittings“ bezeichnet (Abb. 81). Sie sind unentbehrlich für den strukturellen und modularen Aufbau von Containerstapeln. Die Füllung der einzelnen Container ist vollkommen individuell und muss sich lediglich innerhalb der definierten Außenkontur befinden. Die Eckpunkte sind einheitlich standardisiert.

⇒ *Aus dem Prinzip der „Corner Fittings“, lässt sich ein modulares Konzept für vorgefertigte Bambuselemente ableiten.*

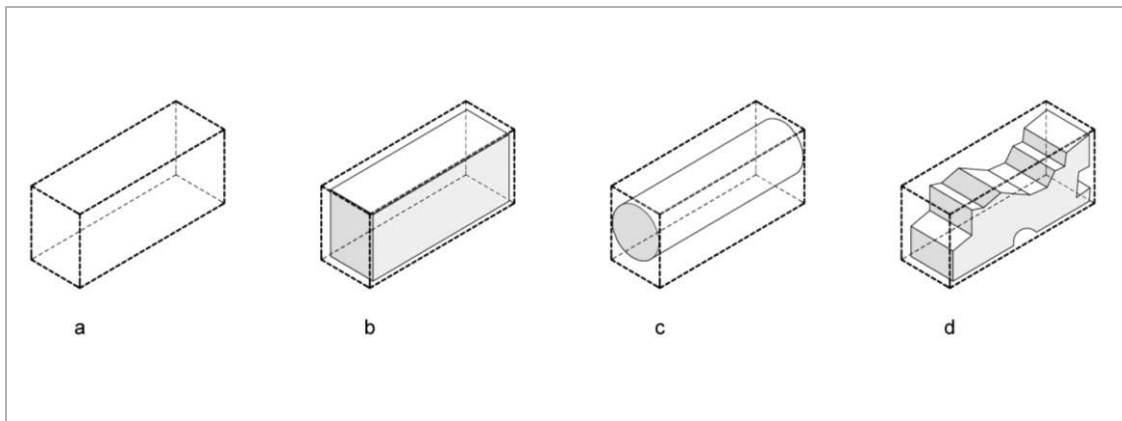


Abb. 80: Die Geometrie des Inhalts ist für die Stapelung von Containern unbedeutend. a) Das Raum-Modul des Containers gibt die maximale Kubatur vor. b) Güter in Kisten können das Volumen füllen. c) Zylindrische Tanks können enthalten sein. d) Aggregate oder sonstige Freiformen können enthalten sein.

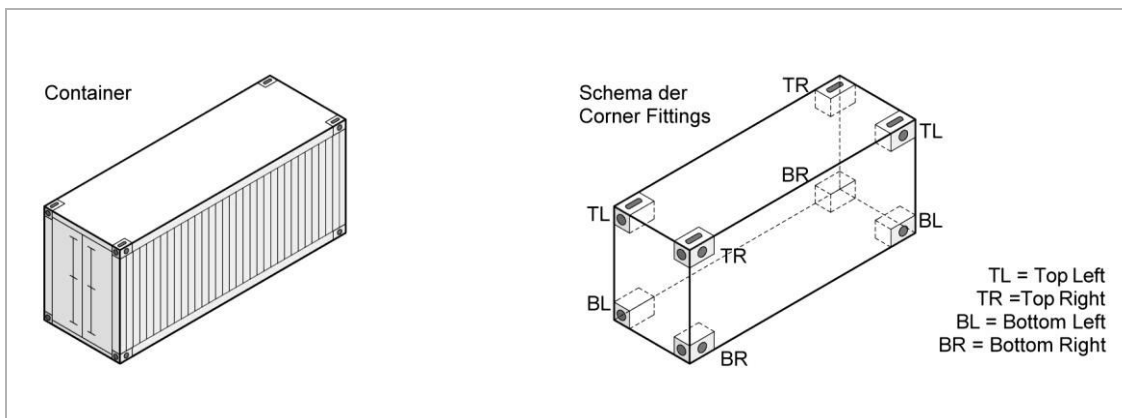


Abb. 81: Der Container – ein universelles Raum-Modul. Corner-Fittings sind standardisierte Verbindungspunkte, über welche die Container untereinander in strukturelle und modulare Beziehung treten.

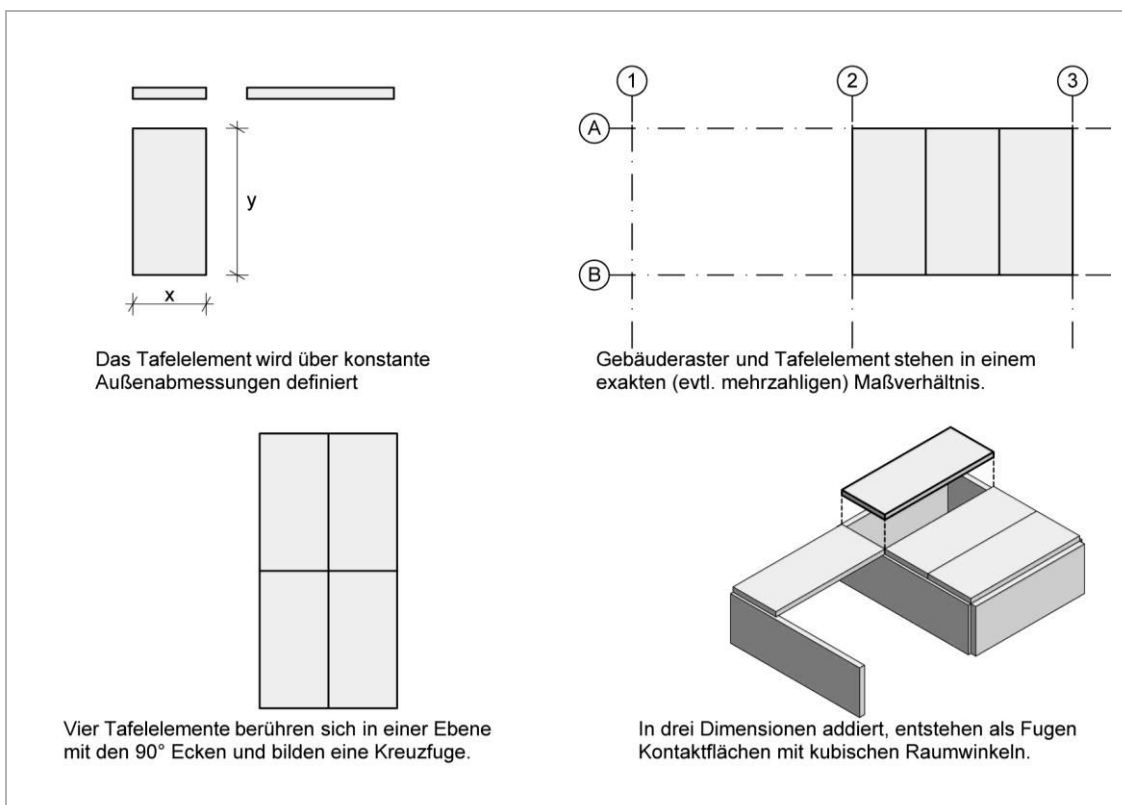


Abb. 82: In einem räumlich orthogonalen Raster können entsprechende Module in ein, zwei oder drei Dimensionen exakt gefügt werden.

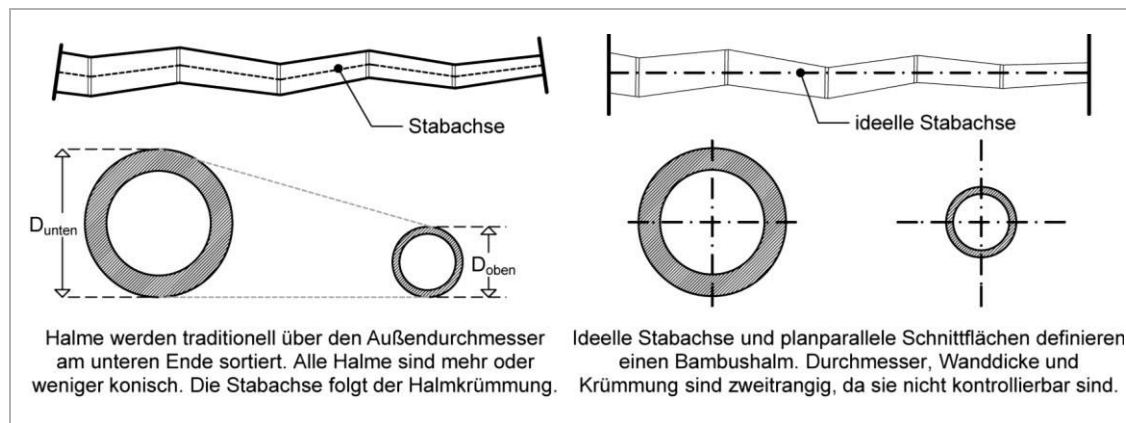


Abb. 83: Definition der „Stabachse“ und Abgrenzung gegenüber der „ideellen Stabachse“.

### 7.3 Orthogonalität

Im Bauwesen besitzt der  $90^\circ$ -Winkel eine herausragende Bedeutung<sup>39</sup>. Geht man beim Begriff „Geschossbau“ davon aus, dass es sich um die vertikale Addition horizontaler Geschossflächen handelt, so wird die Besonderheit dieses Winkels deutlich. Die Gravitation wirkt ständig gleichermaßen auf Nutzer und Tragwerk. Geschossebenen, die von der Horizontalen abweichen, führen bei der Nutzung zu unerwünschtem Gefälle und Abtrieb. Aufgehende tragende Elemente wie Wände oder Stützen erfahren durch die Abweichung von der Lotrechten eine zusätzliche Horizontalkraft, welche die tatsächlich zu übertragende Kraft aus der Vertikallast unnötig steigert. Die Gravitation als physikalische Grundgegebenheit erklärt somit die Vorherrschaft des  $90^\circ$ -Winkels am Bau. Bei üblichen modularen Bauteilen und Bauhalbzügen findet sich diese Orthogonalität der Körperflächen wieder: Quaderförmige Mauerziegel, orthogonale Balkenquerschnitte, Holzwerkstoffplatten, Glasscheiben, Fenster, Türen, Bleche, Wandtafeln, Deckenelemente etc. folgen dieser kubischen Orthogonalität.

Abgesehen von der Gravitation spielen die Möglichkeiten der Addition und Teilung einzelner Elemente eine Rolle bei der Formgebung entsprechender Baumodule (Abb. 82). Parallelrandigkeit und Rechtwinkligkeit erlauben ein beliebiges Drehen, Spiegeln und Wenden der Elemente, was die Montage und modulare Ordnung enorm vereinfacht.<sup>40</sup>

⇒ Für die Stapelung von vorgefertigten Wandscheiben und Deckenelementen, gibt die Holztafelbauweise das Vorbild für eine vorzufertigende Bambusbauweise.

#### 7.3.1 Stabachse

Bei der Verwendung von natürlich rundem Bambus, findet sich zunächst keine Orthogonalität der Körperflächen. Ein rechter Winkel lässt sich beim Halm erst durch einen gesägten Querschnitt senkrecht zur Stabachse herstellen, während die Mantelfläche weiterhin einer unvollkommenen Rotationssymmetrie (mit wechselnden Radien) um die Stabachse folgt. Per Definition stellt die Stabachse die Verbindungslinie aller Querschnitts-Schwerpunkte eines Stabes dar. Bei Bambus folgt sie damit grundsätzlich dem natürlichen Halmwachstum. Zwei Schnittflächen, welche jeweils orthogonal von der Stabachse durchdrungen werden, sind daher nicht parallel zueinander, wenn der Stab selbst gekrümmt ist.

<sup>39</sup> Auch die Sprache zeugt von dieser Gesetzmäßigkeit etwa mit dem Wort „rechter Winkel“. „Orthogonalität“ bildet sich aus der Vorsilbe „ortho“ (griechisch: orthós), welche „richtig, gerecht“ bedeutet.

<sup>40</sup> Als ein Gegenbeispiel zur modularen Ordnung kann traditionelles Bruchsteinmauerwerk dienen.

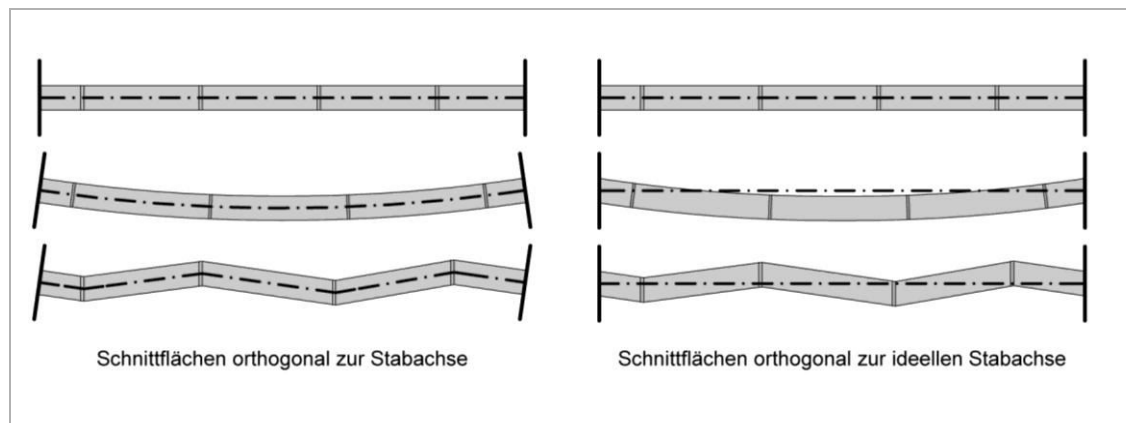


Abb. 84: Im Gegensatz zur Stabachse ist die ideelle Stabachse unabhängig von der Halmgeometrie.

Finden sich an den Enden eines Stabes solche nicht parallelen Schnittflächen, ist die eindeutige Länge des Stabes allein über die Endpunkte der Stabachse bestimmbar. Die Sehnenlängen der Innen- bzw. Außenkurve stellen bereits Abweichungen dar (Abb. 83).

Die Orthogonalität in Bezug auf die Stabachse ist der Form des Stabes, also der natürlichen Varianz der Halm-Morphologie, unterworfen und somit nicht hinreichend exakt für ein übergeordnetes kubisches Ordnungsraster. Aus der natürlichen Form eines Bambushalmes folgt, dass bei Krümmung, Abflachung und wechselnden Abmessungen des Halmquerschnitts, die Stabachse nur im Sonderfall eine Gerade bildet. Zur statischen Betrachtung von Schnittgrößen und Exzentrizitäten eines Bambushalmes hat sie ihre Berechtigung. Zur Erfassung und Anordnung natürlich gewachsener Bambushalme in einem orthogonalen Konstruktionsraster hilft der Begriff der Stabachse jedoch nicht weiter. Hier bedarf es einer anderen Referenz.

### 7.3.2 Ideelle Stabachse

Eine Gerade, die durch beide Endpunkte der Stabachse gelegt wird, ist unabhängig vom jeweiligen Wuchs des Halmes. Diese Gerade wird im Folgenden „ideelle Stabachse“ genannt. Schnittflächen, die orthogonal von der ideellen Stabachse durchdrungen werden, sind folglich planparallel zueinander, ihr Abstand – die *ideelle Stablänge* – lässt sich exakt definieren. Schnittflächen, welche orthogonal zur Stabachse sind, sind dagegen nur ausnahmsweise planparallel (Abb. 84). Die lineare Abstraktion der undefinierten Halmgeometrie gelingt mithilfe der *ideellen Stabachse*.



### 7.3.3 Vom runden Halm zum orthogonalen Tafелеlement

Wird der geschnittene Bambushalm in ein räumliches Koordinatensystem eingeordnet, so kann die ideelle Stabachse als Vektor die erste Dimension darstellen. Schnittflächen, welche von der ideellen Stabachse orthogonal durchdrungen werden, dehnen sich entsprechend in zweiter und dritter Dimension aus (Abb. 85).

Die Orthogonalität einer Fläche zur ideellen Stabachse reicht jedoch nicht aus, um Elemente in den drei Raumachsen exakt zu fügen. Hierzu bedarf es zweier zueinander orthogonal stehender Körperflächen oder vermittelnder Zusatzelemente. Die eingangs formulierte allgemeine Hauptforderung nach einem orthogonalen Modulabschluss kann von natürlich rundem Bambus allein nicht eingelöst werden, da die Mantelflächen des Halmes weiterhin undefiniert bleiben. Folglich soll an dieser Stelle die Verwendung kubischer Verbindungselemente betrachtet werden (Abb. 86).

Mithilfe des kubischen Stababschlusses, können Halme an ihren Enden präzise gefügt und wie das gezeigte Beispiel der Container geometrisch als Raummodul von klar definierten Außenabmessungen behandelt werden (Abb. 87).

Aus der parallelen Addition mehrerer Halme gleicher Länge mit kubischem Stababschluss, ergeben sich tafelförmige Elemente mit exakten Außenabmessungen und orthogonalem Modulabschluss: Wände, Decken (Abb. 88).

Dabei leiten sich folgende Forderungen aus der Bambusgeometrie und der Positionierung der kubischen Zusatzelemente an den Stabenden ab:

- ⇒ *Bambushalme mit natürlich wechselnder Geometrie können mithilfe kubischer Zusatzelemente in orthogonal erfassbare Raumelemente transformiert werden.*
- ⇒ *Der Kraftübertrag sollte idealerweise nur an den Stabenden/Zusatzelementen durch Normalkräfte stattfinden.*
- ⇒ *Eine geschossweise Stapelung von Wand- und Deckenelementen wie beim Holztafelbau ist anzustreben.*
- ⇒ *Das Maß des Moduls wird über die Außenkanten der Zusatzelemente definiert (ähnlich wie bei den Corner Fittings von Containern)*

Diese Leitprinzipien sollen im nächsten Abschnitt bei der Suche nach einem optimierten Deckentragwerk berücksichtigt werden.

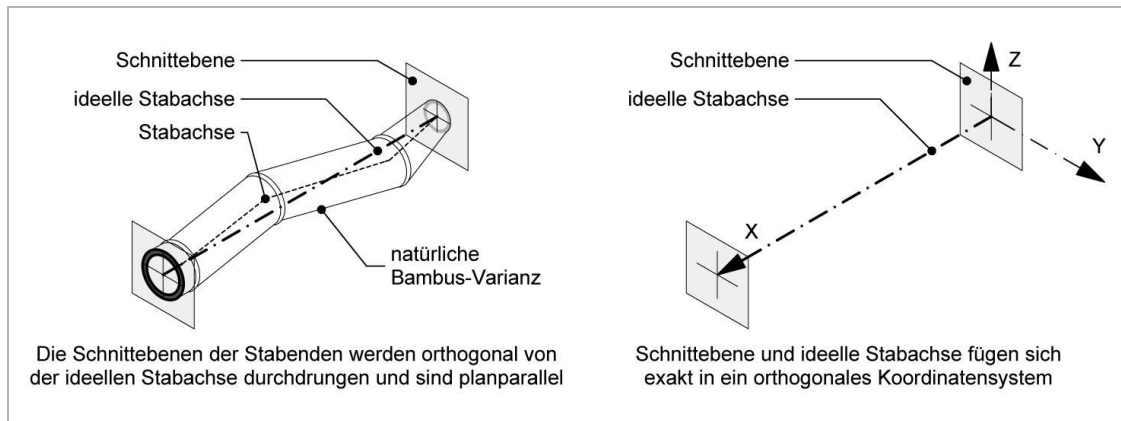


Abb. 85: Die tatsächliche Halmkubatur und ihre kubische Abstraktion: Schnittebene und ideelle Stabachse.

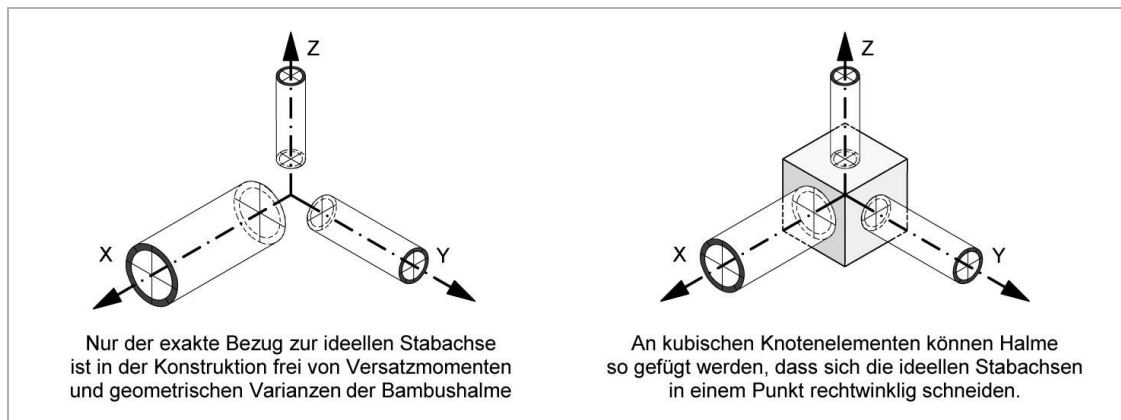


Abb. 86: Halme richten sich mit ihren ideellen Stabachsen an einem orthogonalen Raumraster aus.

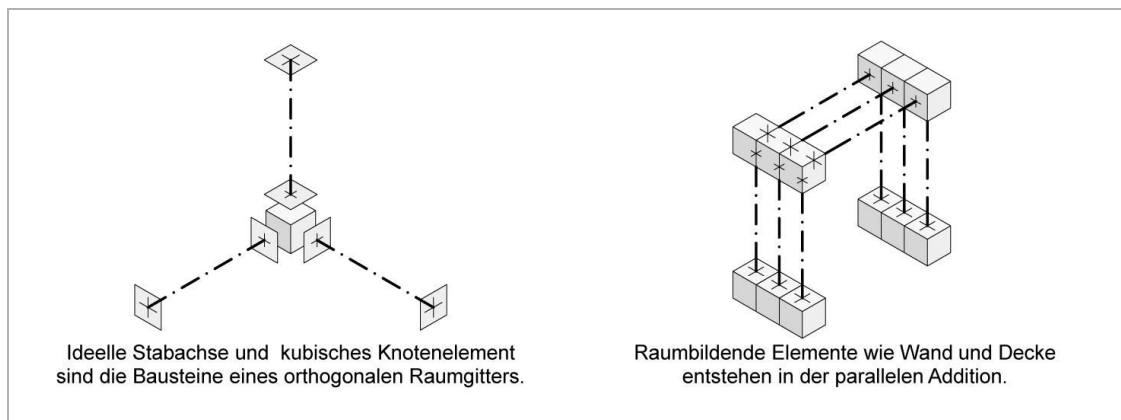


Abb. 87: Abstraktion der Halme als kubische Bausteine eines orthogonalen Raumrasters.

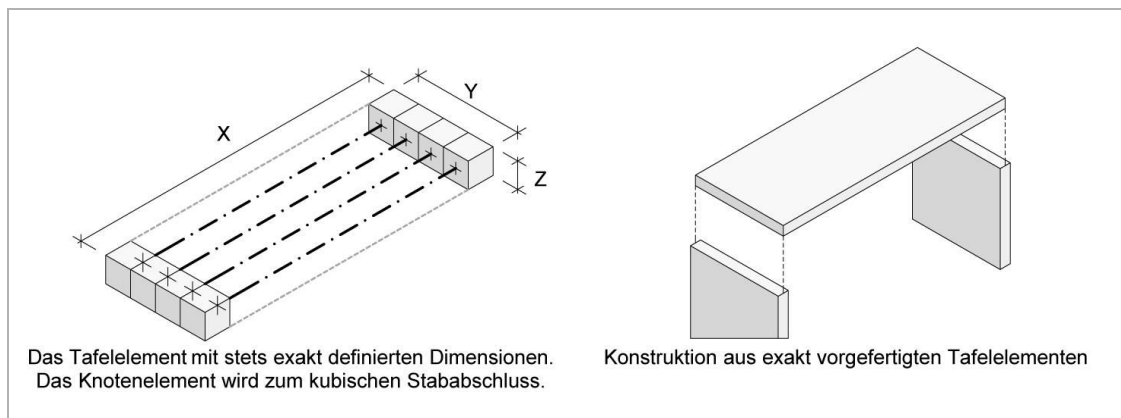


Abb. 88: Der Schritt zum Tafелеlement mit exakt definierten Abmessungen.

## 7.4 Entwicklung eines bambusgerechten Tragwerkmodells

Aus den in Kapitel 4 geschilderten Eigenschaften von Bambus folgt, dass für einen dem Bambus angepassten Tragwerksentwurf möglichst die folgenden Belastungs- und Einbausituationen vermieden werden sollten:

- Biegung
- Schub
- Zugspannungen quer zur Faser
- Querkraft
- Stapelung von Halmen
- punktuelle Querpressung
- Halmdurchdringungen
- stabförmige Verbindungsmittel
- Mörtelkontakt

Folglich sind in Konstruktionen allein Normalkräfte für Bambus zu empfehlen. Druck lässt sich ohne Probleme über einen vollständigen Querschnittskontakt in die Halme einleiten. Die Einleitung von Zugkräften sollte mittels einer Leimverbindung angestrebt werden (vgl. 5.1.2). Bei Deckenplatten wirken die Lasten jedoch grundsätzlich orthogonal zur Plattenebene, hierbei entstehen als Schnittgrößen: Querkraft, Schubkraft und Biegemoment. Diese Schnittgrößen sind dem Biegebalken eigen. Abgesehen vom Biegebalken gibt es jedoch auch Tragwerks-Typologien, die Lasten senkrecht zur Hauptausdehnungsrichtung allein über Normalkräfte übertragen. Aus Gründen der Einfachheit sollen zunächst nur die grundsätzlichen Tragwerksprinzipien in ihrer einachsigen Ausbildung genannt werden, welche jedoch auch in zweiachsiger Art und Kombination miteinander denkbar sind. Die jeweilige Eignung für Konstruktionen aus Bambus soll aus der Betrachtung folgender Tragwerksprinzipien abgeleitet werden:

1. Fachwerkträger
2. Bogen
3. Linsenträger
4. Seil
5. unterspannte Träger

### 7.4.1 Fachwerkträger

Im idealisierten Prinzip folgt ein Fachwerkträger zwar der Regel, dass alle Stäbe ausschließlich Normalkräfte erfahren, in realer Konstruktion ergeben sich aber folgende Probleme: Bei einer linienförmigen Last entstehen zwischen den Knotenpunkten des Obergurts zwangsläufig Biegemomente. Zusätzliche Nebenträger wären nötig, um die Lasten nur an den Knotenpunkten einzuleiten. Die große Anzahl der Knotenpunkte bedeutet zudem eine Vervielfachung der Fügepunktproblematik, bei der die einzelnen Stäbe in unterschiedlichen (nicht orthogonalen) Winkeln zusammentreffen. Die geringen Höhenabmessungen einer Geschossdecke verbieten diese Dichte an Fügepunkten. Bei hohen Trägern (zum Beispiel für Hallendächer) mag dieser Gedanke weiterverfolgt werden.

⇒ *Fachwerkträger sollen daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.*

## 7.4.2 Bogen

Im Bogen herrschen theoretisch ausschließlich Druckspannungen. Dafür muss der Bogen eine der Laststellung entsprechende Form haben. Obwohl angreifende Lasten im Scheitelpunkt des Bogens senkrecht zur Stabachse wirken, entstehen keine Querkräfte. Doch es entstehen Biegemomente, wenn Bogenform und Laststellung nicht korrespondieren. Ein Bogen erzeugt an den Auflagern horizontal auseinanderstrebende Druckkräfte (Auflager-Schub). Diese Kräfte muss das Auflager aufnehmen können oder sie müssen miteinander kurzgeschlossen werden. Eine Bogensehne als Zugstab zwischen den Auflagern ist die einfachste Art, um dies zu realisieren. Eine Biegesteifigkeit wird vorausgesetzt, da der druckbelastete Bogen grundsätzlich knickgefährdet ist. Um als Bogen wirken zu können, muss jedoch zunächst ein ursprünglich gerader Bambusstab in eine planmäßige Vorkrümmung gebracht werden. Diese Verformung gelingt umso leichter, je biegeweicher der Stab ist, was jedoch eine größere Knickgefahr mit sich bringt. Je biegesteifer der Stab aber ist, desto größer sind die benötigten Kräfte zur Vorverformung.

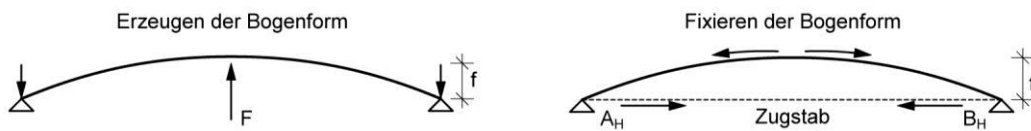


Abb. 89: Benötigte Kräfte, um den Stab in die Bogenform zu bringen und zu halten.

Soll aus einem geraden Bambushalm ein Bogen von vier Metern Spannweite und einem mittigen Stich von 40 cm ( $\frac{1}{10}$ ) geformt werden, sind dafür je nach Steifigkeit des Halmes verschieden große Kräfte nötig. Für einen gedachten Halmquerschnitt von 70/7 mit einem Flächenträgheitsmoment von 69,6 cm<sup>4</sup> braucht es dafür ein Biegemoment<sup>41</sup> von:

$$M = \frac{I \cdot f}{l^2 \cdot n} = \frac{69,6 \cdot 40}{4^2 \cdot 55,5} = 3,16 \text{ kNm}$$

Als mittig wirkende Punktlast sind dafür 3,16 kN nötig ( $F = \frac{M \cdot 4}{l}$ ).

Dies bedeutet eine erhebliche Vorbelastung des Halmes quer zur Faser, was dringend vermieden werden sollte. Weiterhin stellt sich die Frage, wie diese Vorverformung fixiert werden kann. Aus einem Kurzschluss der horizontalen Auflagerkräfte mittels Zugband würden noch bedeutend größere Kräfte resultieren:

$$A_H = B_H = \frac{M}{f} = \frac{3,16 \text{ kNm}}{0,40 \text{ m}} = 7,90 \text{ kN}$$

Jegliche vertikale Auflast auf den Bogen müsste diese horizontale Auflagerkraft noch zusätzlich steigern. Bögen eignen sich aufgrund der geringen Krümmungsradien nicht für kurze Spannweiten. Für Spannweiten bis 40 m sind Bögen dagegen vorzüglich geeignet, wie die Beispiele der Bambusbrücken von *Jörg Stamm* beweisen.

⇒ *Bogentragwerke für Decken-Spannweiten von nur vier Metern sollen daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.*

<sup>41</sup> Umgeformte Formel:  $\max f = \frac{n \cdot M \cdot l^2}{I}$ ; Wert für mittige Punktlast:  $n = 55,5$  vgl. Tab. 21

### 7.4.3 Linsenträger

Ein Linsenträger kann als kombiniertes Seil-Bogen-Tragwerk angesehen werden. Die angreifenden Vertikallasten werden zu gleichen Teilen von Bogen und Seil zu den Auflagern übertragen, wobei sich die entgegengesetzt wirkenden Horizontalkräfte am Auflager neutralisieren.



Abb. 90: Benötigte Kräfte zur Erzeugung eines Linsenträgers aus geraden Stäben.

Der Stich von Ober- und Untergurt gleicht in Summe dem des Bogens. Jede Krümmung ist für sich betrachtet somit nur halb so groß, wie es im vorherigen Beispiel dargelegt wurde (vgl. 7.4.2). Zur Formgebung wird eine entsprechend kleinere Kraft benötigt. Die zusammenhaltende Kraft am Auflager wirkt quer zur Faser, wie auch alle Spreizen quer zur Halmfaser Druck ausüben. Dies widerspricht dem zuvor formulierten Grundsatz, keine Kräfte punktuell quer zur Halmrichtung angreifen zu lassen (Abb. 90).

Für Träger in leichten Dachkonstruktionen sind Linsenträger eine gute Wahl, da sie auch mit sehr einfachen Mitteln hergestellt werden können. Linsenträger sind Fachwerkträgern an Einfachheit der Fügepunkte deutlich überlegen. Sie können damit nicht nur konstruktiv, sondern auch ästhetisch überzeugen, wie zahlreiche Projekte von *Jörg Stamm* beweisen. Weil die Kraftzerlegung am Auflager stattfindet, sind bei Verwendung von Dübeln besonders große Scherflächen am Ende des Untergurts nötig. Wenn die Kraftzerlegung am Auflagerpunkt stattfinden soll, müssen diese „Vorholzlängen“ zwangsläufig weit über die Auflagerachse hinausragen. Aufgrund der beschränkten Bauteilhöhe bei Deckenkonstruktionen, erscheinen Linsenträger mit einzelnen Spreizen jedoch sehr aufwendig. Probleme können sich aus folgenden Gründen ergeben:

- Halmquerpressung im Kontaktbereich der Spreizen
- Querkraftbeanspruchung durch Formgebung
- viele Fügepunkte
- Bezug auf die Halmaußenkante ist niemals seriell
- Vorholzlänge muss weit über den Punkt der Kraftzerlegung am Auflager hinausragen

⇒ Aufgrund der unvermeidlichen Halmquerpressungen soll diese Konstruktionsweise im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt werden.

### 7.4.4 Seil

Bambushalme können durch einfaches Längsspalten zu Bambusstreifen bzw. „Seilen“ aufgetrennt werden. Das Seil als formaktives Tragwerksprinzip setzt keinerlei Biegesteifigkeit voraus. Momente können folglich nicht aufgenommen werden. Im Seil werden angreifende Lasten in Zugkräfte zerlegt. Bei Seilkonstruktionen müssen die horizontalen Zugkräfte am Auflager aufgenommen oder miteinander kurzgeschlossen werden. Auf alle Lasten, die auf ein Seil einwirken, reagiert das Seil mit einer entsprechend angepassten Seillinie. Ein Seil

allein würde bei wechselnden Lasten starke Verformungen erfahren. Für eine Geschoßdecke ist es somit nicht geeignet. Eine Versteifung der Seilkonstruktion kann aber durch folgende Maßnahmen gelingen:

- Vorspannung durch gegensinnig gespannte Seile
- Ballast (ein großer Ballast mindert zwar die Verformung, doch werden die Gesamtlasten der Konstruktion gesteigert)
- ein Versteifungsbalken in der Ebene der Auflager, um gleichzeitig die Auflagerreaktionen kurzzuschließen (der Versteifungsbalken erfährt dadurch zusätzlich axialen Druck). Eine solche Konstruktion wirkt zwar vom primären Lastabtrag wie ein Seil, wird aber als „unterspannter Träger“ bezeichnet.

⇒ *Weil horizontale Auflagerreaktionen kurzgeschlossen und Verformungen aus wechselnden Laststellungen begrenzt werden müssen, sollen Seiltragwerke nicht weiter betrachtet werden.*

#### **7.4.5 Unterspannter Träger**

Unterspannte Träger sind zwar Biegeträger – die Biegebelastung im Obergurt richtet sich dabei aber nach den Abständen der Spreizen. Je geringer die Abstände der Spreizen untereinander sind, desto geringer sind die im Obergurt auftauchenden Biegebeanspruchungen bei Gleichstreckenlast. Bei Belastungssituationen, die von der geplanten Laststellung abweichen, erfährt der Obergurt als versteifendes Element Biegemomente. Die auftretenden Biegemomente sind umso geringer, je größer das Eigengewicht im Verhältnis zu den einwirkenden Nutzlasten ist.

Weiterhin erfährt der Obergurt eine Druckbeanspruchung aus den Horizontalkräften der Unterspannung. In der Unterspannung herrscht ausschließlich Zugspannung (vgl. 7.4.4). Die Normalkräfte in Ober- und Untergurt stellen für Bambus kein Problem dar. Biegung im Obergurt sollte jedoch soweit es geht vermieden werden. Anzustreben ist daher eine kontinuierliche Stützung des Obergurts und ein möglichst großes Eigengewicht der Konstruktion. Beides könnte durch eine Schüttung ermöglicht werden, welche auf der Unterspannung aufgebracht würde. Eine solche Schüttung könnte folgende Vorteile bringen:

- eine einfache Lastdurchleitung
- keine Ansammlung von Querkräften im Obergurt
- eine Minimierung der Fügepunktanzahl
- einen Toleranzausgleich abweichender Halmgeometrie
- ein vollflächiges Auflager für den Druckstab
- eine kontinuierliche Lasteinleitung erzeugt eine harmonisch gekrümmte Seillinie
- einen verbesserten Schallschutz
- eine erhöhte Bauteilmasse und dadurch ein günstigeres Schwingverhalten
- eine reduziert Biegebeanspruchung des Obergurts aus wechselnden Nutzlasten

⇒ *Für eine vorgefertigte Geschossdecke aus Bambus erscheint folglich das Konstruktionsprinzip einer unterspannten Trägerschar mit kontinuierlicher Stützung des Obergurts am besten geeignet. Das Auflager sollte sowohl Modulabschluss als auch Schnittpunkt der Kraftvektoren sein.*

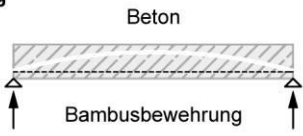
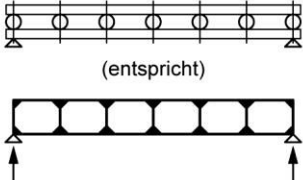
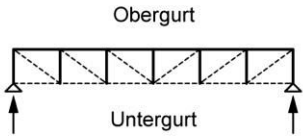
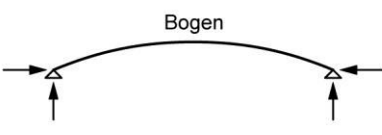
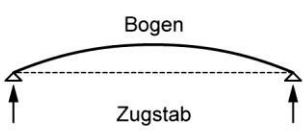
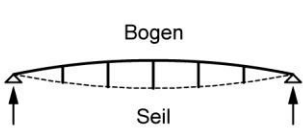

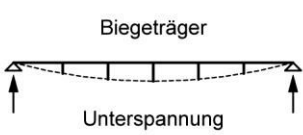
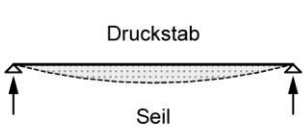
Tragwerksart	— Druck - - - - - Zug	Statisches System mit Auflagerreaktionen	Bewertung der Eignung für eine Bambus-Geschossdecke (+/-)
<b>1) Beton &amp; Bambusbewehrung</b> (als Biegeträger)			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gerade Oberseite</li> <li>+ Bambus mit Zugkraft belastet</li> <li>- schlechter Verbund</li> <li>- Bambus &amp; Beton gegenseitige Schädigung</li> <li>- Beschichtung aufwendig</li> <li>- Hauptbestandteil Beton</li> </ul>
<b>2) Vierendeelträger</b> (Verdübelung, schubsteif)			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gerade Oberseite</li> <li>- keine Normalkräfte</li> <li>- viele Fügepunkte (Dübel)</li> <li>- Stäbe sämtlich mit Biegemoment</li> <li>- Stapelung von Halmen/Querpressung</li> </ul>
<b>3) Fachwerkträger</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gerade Oberseite</li> <li>- sehr viele Fügepunkte</li> <li>- Stapelung von Halmen</li> <li>- Stäbe nur theoretisch ohne Biegung</li> <li>- Bauhöhe nicht für Decken angemessen</li> </ul>
<b>4) Bogen</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ausschließlich Druckkräfte</li> <li>+ wenige Fügepunkte</li> <li>- Vorkrümmung des Bogens nötig</li> <li>- große horizontale Auflagerreaktionen</li> <li>- Verformung bei ungleichmäßiger Last</li> <li>- Oberseite ungerade</li> </ul>
<b>5) Bogen mit Zugstab</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ausschließlich Normalkräfte</li> <li>+ wenige Fügepunkte</li> <li>- Vorkrümmung des Bogens nötig</li> <li>- Verformung bei ungleichmäßiger Last</li> <li>- Oberseite ungerade</li> </ul>
<b>6) Linsenträger</b> (Bogen, Seil, Spreizen)			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ausschließlich Normalkräfte</li> <li>- Vorkrümmung des Bogens nötig</li> <li>- Oberseite ungerade</li> <li>- viele Fügepunkte</li> </ul>
<b>7) Seil</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ausschließlich Zugkräfte</li> <li>+ wenige Fügepunkte</li> <li>- große horizontale Auflagerreaktionen</li> <li>- Verformung bei ungleichmäßiger Last</li> <li>- Oberseite ungerade</li> </ul>
<b>8) Unterspannter Träger</b> (Balken, Seil, Spreizen)			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Biegeträger bietet Versteifung</li> <li>+ Oberseite gerade</li> <li>- Biegemomente im Träger</li> <li>- viele Fügepunkte</li> </ul>
<b>9) Seil mit Druckstab und gefülltem Zwischenraum</b> (unendlich viele Spreizen)			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Druckstab bietet Versteifung</li> <li>+ Druckstab kontinuierlich gelagert</li> <li>+ ausschließlich Normalkräfte</li> <li>+ wenige Fügepunkte</li> <li>+ Oberseite gerade</li> <li>+ Füllkörper nur gering belastet</li> </ul>

Abb. 91: Bewertung statischer Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für eine Bambus-Geschossdecke.

## 8 Experimentelle Untersuchungen

In Abschnitt 4 und 5 wurden Bambus-Fügeprinzipien bewertet. Die sich daraus ergebenden Folgerungen für etwaige Konstruktionen sind in Abschnitt 6 und 7 dargelegt und parallel durch eine Anzahl experimenteller Untersuchungen überprüft worden, welche in diesem Kapitel dargestellt sind. Die Experimente und ihre Auswertungen dokumentieren den Entwicklungsweg hin zu einem optimierten Vorschlag für vorgefertigte Geschossdecken aus Bambus. Nicht alle Untersuchungen erbringen die erhofften quantitativen Messergebnisse, doch ergeben sich auch hier stets weiterführende Einsichten. Diese qualitativen Erkenntnisse beziehen sich auf Fügeprinzipien, Fertigungsweisen und mögliche Arten der Bambusbearbeitung.

In den Versuchen sind die Prüfkörper („PK“) zur genaueren Bezeichnung mit Abkürzungen versehen worden, die im Folgenden erläutert werden:

Kapitel	Bezeichnung	Anzahl	Spezifizierung
8.1	PK230-4x1	1	Decken-Prüfkörper, $l = 230$ cm, vier Einzelhalme
8.2	PK230-D	1	Decken-Prüfkörper, $l = 230$ cm, Dübel verbinden gestapelte Halmlagen
8.4	Keilzinken liegend	6	Bambus-Holz-Keilzinkung, Kraft wirkt orthogonal zu Zinken
	Keilzinken stehend	6	Bambus-Holz-Keilzinkung, Kraft wirkt parallel zu Zinken
8.3	PK230-U	1	Decken-Prüfkörper, $l = 230$ cm, Unterspannung mit Sandschüttung
8.5	PK-GL2 <sub>22</sub>	10	Leim-Prüfkörper, zweiseitig, Winkel Holz-und Bambusfaser = 22°
	PK-GL2 <sub>90</sub>	10	Leim-Prüfkörper, zweiseitig, Winkel Holz-und Bambusfaser = 90°
8.6	PK-GL1 <sub>16</sub>	10	Leim-Prüfkörper, einseitig, Winkel Holz-und Bambusfaser = 16°
	PK-GL1 <sub>90</sub>	10	Leim-Prüfkörper, einseitig, Winkel Holz-und Bambusfaser = 90°
8.7	PK375-U	1	Decken-Prüfkörper, $l = 375$ cm, Unterspannung, Sandsackfüllung
8.8	PK400-U1	1	Decken-Prüfkörper, $l = 400$ cm, Unterspannung, Leichtlehmfüllung, Hirnholz
	PK400-U2	1	Decken-Prüfkörper, $l = 400$ cm, Unterspannung, Leichtlehmfüllung, Hirnholz
	PK400-U3	1	Decken-Prüfkörper, $l = 400$ cm, Unterspannung, Leichtlehmfüllung
10	Wand-Typ 1	1	Wand-Prüfkörper, $h = 275$ cm, parallele Stabanordnung, verdübelt
	Wand-Typ 2	1	Wand-Prüfkörper, $h = 275$ cm, linsenförmige Stabanordnung, gebunden

Tab. 6: Übersicht der untersuchten Prüfkörper mit jeweiliger Spezifizierung.



## 8.1 Deckenprüfkörper PK230-4x1

### 8.1.1 Zielsetzung

Die einfachste Bambus-Deckenkonstruktion könnte aus einer Aneinanderreihung von Halmen bestehen, die zusammen die erforderliche Tragfähigkeit und Steifigkeit besitzen, um als Tragwerk zu genügen. Um diesen Gedanken zu prüfen, sollte zunächst in einem Versuch eine Schar von Bambushalmen hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens unter Last erprobt und mit den theoretisch zu ermittelnden Verformungen verglichen werden. Aus den Erkenntnissen des verkleinerten Maßstabs sollte anschließend das Potenzial dieser Konstruktionsweise erörtert werden.

### 8.1.2 Beschreibung

Es wurden vier Bambushalme von 260 cm Länge dicht nebeneinander auf zwei Auflager gelegt und gegen Abrutschen gesichert. Die Halme hatten Querschnitte etwa gleicher Größenordnung, welche sich jedoch durch natürliche Geometriestreungen am dicken und dünnen Halmende und untereinander unvermeidlich unterschieden. Als Mittelwert aller Halme ergab sich ein Flächenwiderstandsmoment<sup>42</sup> von  $I = 173,7 \text{ cm}^4$  (Tab. 7).

### 8.1.3 Belastungstest

Die lichte Spannweite betrug 230 cm. Es sollte eine mittige Last wirken. Die Verformung wurde mit einem Wegaufnehmer aufgezeichnet (Abb. 92). Der Lastaufbau erfolgte kontinuierlich bis 6,2 kN und wurde dann wieder langsam abgebaut. Die Verformung war linear-elastisch und zeigte auch bei  $f = 71 \text{ mm}$  (entsprechend  $1/32$  der Spannweite) noch keine Abweichung (Abb. 94). Alle Halme verformten sich gleichmäßig unter der einwirkenden Kraft und zeigten keine Schäden.

An diesen einfachen Versuch schlossen sich zwei Fragen an:

1. Welches Flächenträgheitsmoment darf für solch ein Tragwerk angenommen werden?
2. Welche Konsequenzen ergeben sich für die Konstruktion möglicher Geschossdecken?

#### 8.1.3.1 Flächenträgheitsmoment

Bei einer Last von 6,2 kN herrschte in Feldmitte ein Biegemoment von:

$$M_{\max} = \frac{F \cdot l}{4} = \frac{6,2 \text{ kN} \cdot 2,3 \text{ m}}{4} = 3,6 \text{ kNm}$$

Die Feldmitte hatte sich dabei um 7,1 cm gesenkt. Die Formel<sup>43</sup> zur Berechnung der maximalen Durchbiegung wird umgeformt nach dem Flächenträgheitsmoment:

$$I = \frac{n \cdot M \cdot l^2}{f} = \frac{55,5 \cdot 3,6 \cdot 2,3^2}{7,1} = 148,8 \text{ cm}^4$$

---

<sup>42</sup> Flächenträgheitsmoment für Rohre:  $I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - (D - 2t)^4)$

<sup>43</sup> Für Holz gilt der Wert  $n = 83,3$  (E-Modul = 10.000 MPa). Dementsprechend kann bei Bambus mit dem Wert  $n = 55,5$  gerechnet werden (E-Modul 15.000 MPa) vgl. Tab. 21

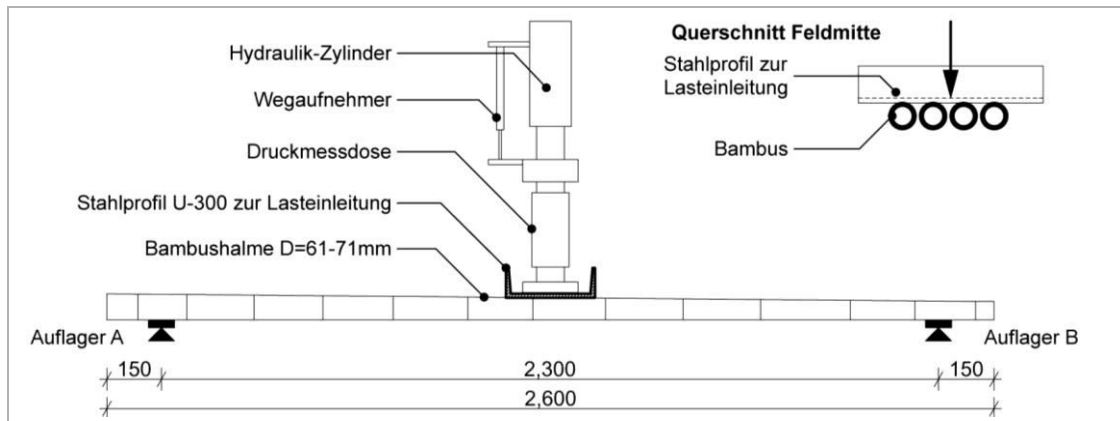


Abb. 92: Aufbau des PK230-4x1. Vier Halme als Trägerschar mit mittiger Lasteinleitung.

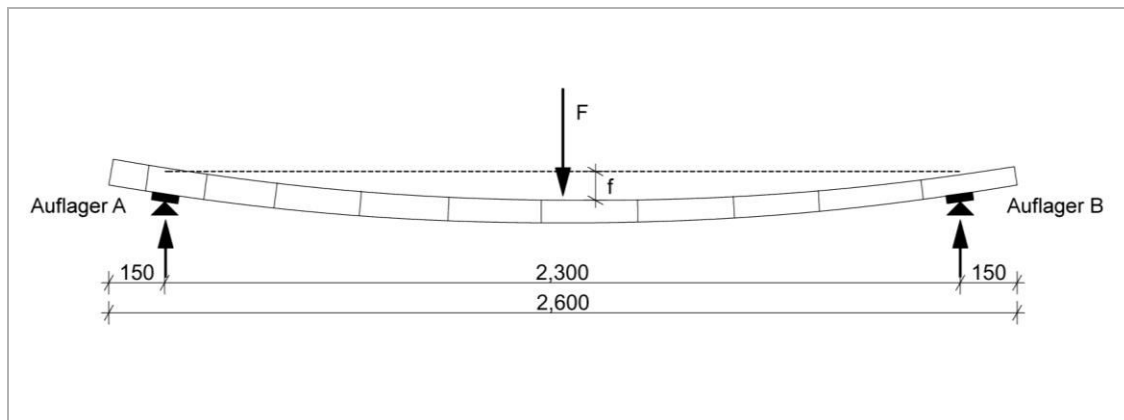


Abb. 93: PK230-4x1 Verformung unter mittiger Punktlast.

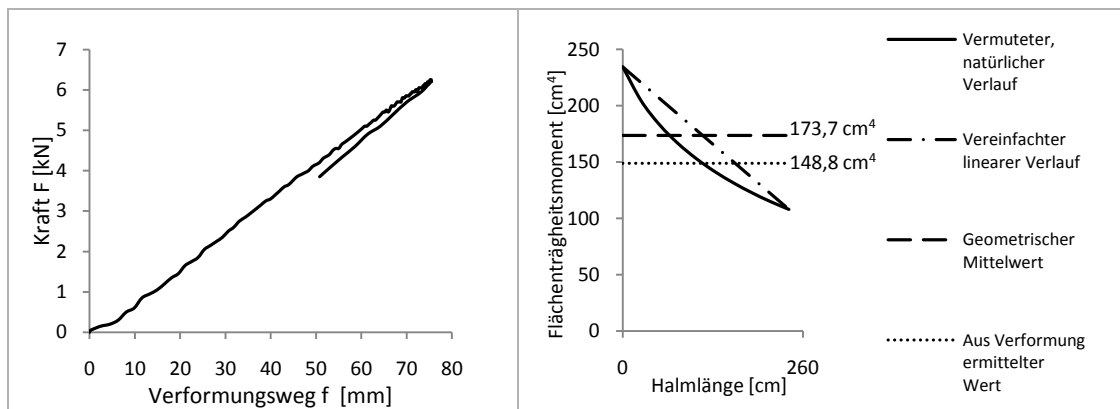


Abb. 94: Kraft-Weg-Diagramm des PK230-4x1 (links). Entwicklung des Flächenträgheitsmoments entlang der Halmlänge, Abweichung von Mittelwert und aus Verformung ermitteltem Flächenträgheitsmoment (rechts).

Halm	dickes Halmende			dünnere Halmende			Mittelwert
	D	t	I	D	t	I	
	[mm]	[mm]	[cm <sup>4</sup> ]	[mm]	[mm]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]
1	62	9	56	62	5	37	62,2
2	61	5	35	49	4	14	24,6
3	71	11	96	59	6	36	66,0
4	63	7	49	55	5	25	36,9
Summe			<b>236</b>			<b>112</b>	<b>173,7</b>

Tab. 7: Werte der verwendeten Halmquerschnitte.

Stellt man diesen Wert dem aus der Geometrie abgeleiteten Mittelwert gegenüber, zeigt sich, dass im Versuch nur 85 % des geometrisch gemittelten Flächenträgheitsmoments wirken:

$$\frac{148,8 \text{ cm}^4}{173,7 \text{ cm}^4} = 0,85$$

Diese Differenz kann auf folgende Weise erklärt werden: Die Abnahme des Flächenträgheitsmoments im Halmverlauf ist nicht linear (vgl. 2.5.6). Es ist daher über die gesamte Halm-länge ein kleineres tatsächliches Flächenträgheitsmoment vorhanden, als es die gemittelte Geometrie der Stabenden vermuten lässt (Abb. 94 rechts). Besonders in der Mitte des Hal-mes ist diese Differenz bedeutend, da hier das größte Biegemoment herrscht. Vergleicht man das Flächenträgheitsmoment der dicken Halmenden mit dem aus der Verformung errechneten Wert, wird deutlich, dass lediglich 63 % wirksam sind.

$$\frac{148,8 \text{ cm}^4}{236,0 \text{ cm}^4} = 0,63$$

Dieser Quotient muss umso geringer werden, je länger der betrachtete Halmabschnitt ist und je näher das dicke Halmende am Rhizomhals liegt. Für Halmlängen von vier Meter könnte daher das wirksame Flächenträgheitsmoment bereits weniger als 50 % des am dicken Hal-mende gemessenen Wertes betragen. Jedoch hängt dies auch von Bambusart und Gesamt-länge des Halmes ab. Einem Halm ist dieses Verhältnis von außen leider nicht anzusehen.

### 8.1.3.2 Konsequenzen für die Konstruktion möglicher Geschossdecken

Wird eine einlagige Bambus-Schar ohne Zwischenraum (Halm an Halm) gebildet, so sind bei konstanter Breite des Betrachtungsstreifens (1 m) umso weniger Halme enthalten, je größer die einzelnen Halmquerschnitte sind. Allerdings wächst auch die statische Höhe und Wanddi-cke jedes einzelnen Halmes. Bei einer Verdopplung des Halmaußendurchmessers, wächst das Flächenträgheitsmoment pro Meter Deckenstreifen um den Faktor 8. Unter der vereinfach-ten Annahme, dass die Wanddicke etwa ein Zehntel des Außendurchmessers beträgt, können bei konstant röhrenförmigen Querschnitten grob folgende Flächenträgheitsmomente gebil-det werden (Tab. 8):

Um ein Flächenträgheitsmoment von  $I_{\text{erf}} = 8.320 \text{ cm}^4$  zu erreichen, wären somit 6 Halme mit konstantem Querschnitt von 150/15 nötig ( $I_{\text{vorh.}} = 8.802 \text{ cm}^4 > I_{\text{erf}} = 8.320 \text{ cm}^4$ ).

Da sich aber bei allen Halmen der Querschnitt rasch verjüngt, müsste ein stärkerer Halm-querschnitt gewählt werden, der am dicken Halmende<sup>44</sup> etwa das Doppelte des erforderli-chen Flächenträgheitsmoments hätte. Infrage kämen fünf Halme 190/19 mit:

$$\frac{I_{\text{vorh}} = 18.883 \text{ cm}^4}{2} > I_{\text{erf}} = 8.320 \text{ cm}^4$$

<sup>44</sup> Halme werden stets nach den Querschnitten am dickeren Halmende sortiert und gehandelt

Außendurchmesser Halm	Wanddicke Halm	Flächenträgheitsmoment je Halm	Halmanzahl je 1 m Deckenstreifen	Flächenträgheitsmoment je 1 m Deckenstreifen
D	t	I	1000 mm/D	I
[mm]	[mm]	[cm <sup>4</sup> ]		[cm <sup>4</sup> ]
70	7	70	14	974
100	10	290	10	2.898
150	15	1.467	6	<b>8.802</b>
190	19	3.777	5	<b>18.883</b>

Tab. 8: Flächenträgheitsmomente gedachter Scharen von Halmen.

Diese besonders starken Halme sind aber in weiten Teilen der Welt nur schwer zu bekommen, da nur bestimmte Bambusarten überhaupt so dicke Halme ausbilden. Die weit verbreiteten und damit leicht verfügbaren Arten haben oft Halmdicken von weniger als 120 mm. *Dendrocalamus strictus*<sup>45</sup> zum Beispiel, die in Indien am weitesten verbreitete Art, hat Halmdicken von lediglich 50 bis 80 mm.

### 8.1.3.3 Fazit

Die nicht lineare Abnahme des Flächenträgheitsmoments im Halmverlauf führt zu Abweichungen zwischen dem einfach gemittelten Durchschnittswert und dem tatsächlich wirksamen Flächenträgheitsmoment. Eine Geschossdecke, wie sie in der Zielsetzung formuliert wurde, kann theoretisch aus einer einfachen Schar von Halmen erzeugt werden und dabei den Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit genügen. Die Voraussetzung dafür ist jedoch die Verwendung besonders großer Halmquerschnitte von fast 20 cm Durchmesser, welche nicht ohne weiteres verfügbar sind.

⇒ *Das Ziel der Entwicklung einer Bambus-Geschossdecke muss folglich die konstruktive Kombination von Halmen zur Steigerung der Gesamtsteifigkeit sein, um sowohl materialeffizient zu arbeiten als auch lokal verfügbare Ressourcen zu nutzen.*

<sup>45</sup> Information von NMBA (National Mission on Bamboo Applications, Department of Science and Technology, Government of India)

## 8.2 Deckenprüfkörper PK230-D

### 8.2.1 Zielsetzung

Zur experimentellen Überprüfung des in Abschnitt 6.2.2 angeführten Referenz-Tragwerks der Schule in Pakistan wurde das Prinzip der nachgiebig verbundenen Querschnitte mit reduzierten Abmessungen nachgebaut. Durch die Verdübelung der in drei Ebenen gestapelten Halme sollte die statisch wirksame Höhe gesteigert werden. Statt der Einzelwiderstände der Halme sollte aus der Verbundwirkung ein Gesamtwiderstand der Konstruktion resultieren. Um die Vor- und Nachteile der Konstruktionsart und ihr spezifisches Versagen unter Last genauer zu untersuchen, wurde ein entsprechender Prüfkörper gebaut und belastet. Die folgenden vier Fragestellungen sollten dabei untersucht werden:

1. Wie gestaltet sich der Prozess des Fügens?
2. Welches Verformungsverhalten zeigt der Prüfkörper unter Last?
3. Bei welcher Last tritt ein Versagen ein?
4. Was sind die Ursachen des Versagens?

### 8.2.2 Beschreibung

Der Prüfkörper bestand aus vier Längshalmen von je 2,60 m Länge, von denen zwei in der unteren Ebene und zwei in der Oberen Ebene angeordnet waren. Zwischen der oberen und unteren Ebene waren fünf Querhalme von 50 cm Länge angeordnet. Die vier Längshalme waren dieselben, welche schon im vorhergehenden Versuch PK230-4x1 zum Einsatz kamen. Es sollte die Veränderung der Bauteilsteifigkeit im direkten Vergleich beobachtet werden, um die Wirksamkeit der Verdübelung zu beurteilen.

Die Durchmesser der Halme lagen im Bereich von 70 – 50 mm. Der durchschnittliche Querschnittswert betrug  $D = 62 \text{ mm}$ ;  $t = 6 \text{ mm}$ ;  $A_{\varnothing} = 10,6 \text{ cm}^2$ . Das experimentell ermittelte Flächenträgheitsmoment der vier Halme betrug:  $I = 148,8 \text{ cm}^4$ . Der horizontale Achsabstand der Längshalme zueinander betrug 25 cm, in vertikaler Richtung etwa 12 – 14 cm. Als Dübel wurden glattschaftige Rundstahlabschnitte mit 12 mm Durchmesser und 25 cm Länge verwendet, welche in passende Dübellöcher eingesetzt wurden. Um an den Enden der Längshalme eine gewisse Mindestvorholzlänge zu behalten, wurden die äußeren Dübel 15 cm entfernt von den Enden der Längshalme angeordnet. Zu den Enden der Querhalme betrug der Abstand 12,5 cm (Abb. 95).

#### 8.2.2.1 Montage

Die Halme der unteren, mittleren und oberen Ebene wurden in Position gebracht und anschließend Dübellöcher an den Kreuzungspunkten senkrecht durch je drei Halme hindurch gebohrt. Nach jeder Bohrung wurde ein Dübel eingetrieben, um ein späteres Verrutschen der Dübellöcher zueinander zu verhindern. Bei minimalem Versatz der Dübellöcher bestand die Gefahr, dass das Eintreiben mit dem Hammer zur Beschädigung des Halmmantels führen konnte, da die gefaste Dübelspitze beim Stoß auf die Halmwand radiale Druckbeanspruchung ausüben musste. Nach dem Setzen der Dübel wurden die drei Halmebenen mittels Spannband an jedem Dübel zusammengezurt und fixiert. Der Fügeprozess war aufgrund der variierenden Halmdimensionen von Improvisation gekennzeichnet: Die Querhalme waren 50 cm Abschnitte eines 250 cm Halmes, welcher eine natürliche Differenz des Außendurchmessers zwischen dünnem und dickem Ende aufwies.

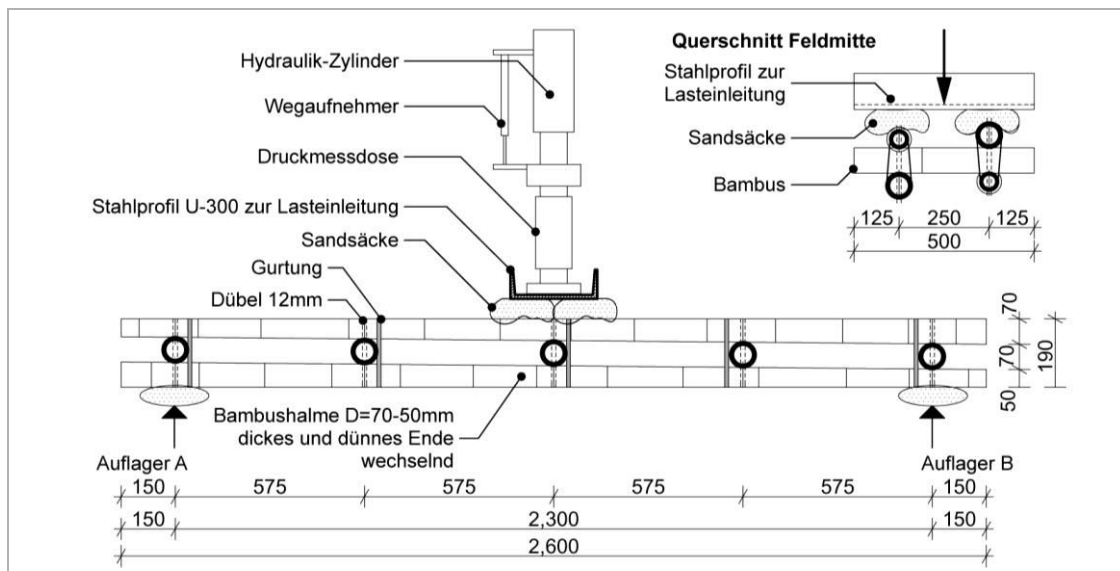


Abb. 95: Aufbau des PK230-D. Die Verdübelung soll einen Gesamtwiderstand durch Verbundwirkung erzeugen.

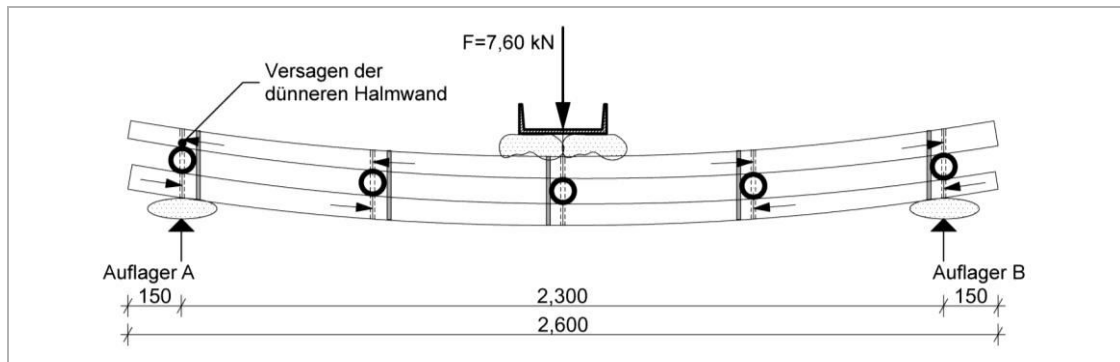


Abb. 96: Verformung und Versagen des PK230-D.

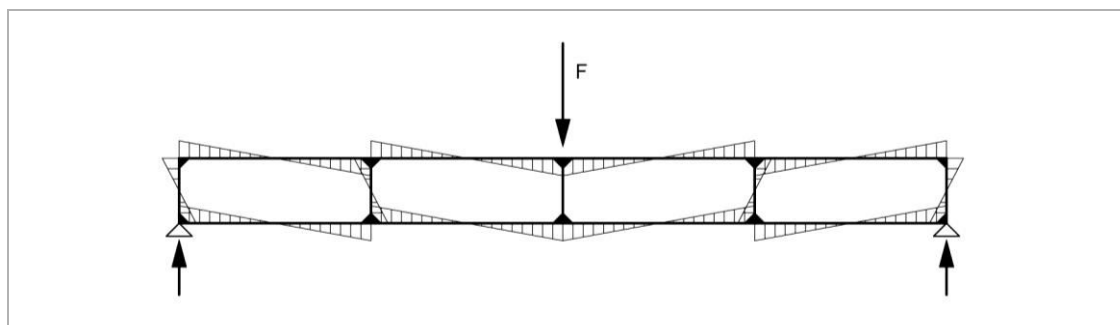


Abb. 97: Deutung des Tragwerks als Vierendeel-Träger. Alle Teile erfahren eine Biegebelastung.

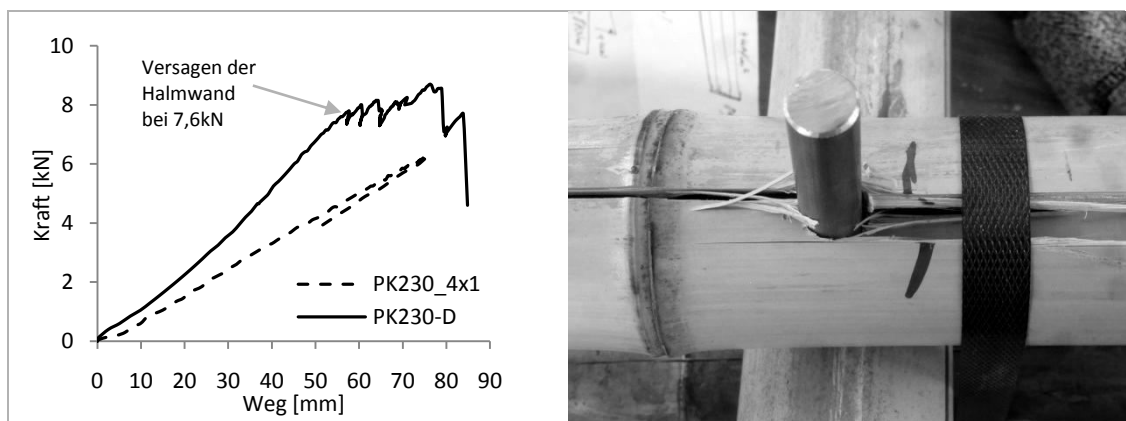


Abb. 98: Gegenüberstellung der Verformung von PK230-D und PK230-4x1 (links). Versagen der Halmwand im Bereich des Dübels (rechts).

In der Folge ergaben sich Schwierigkeiten beim Fügen, da kleinere Querhalme den Raum zwischen den oberen und unteren Längshalmen teilweise nicht voll ausfüllen konnten.

Um der Konstruktion eine möglichst gleichmäßige Stabilität zu geben, wurden entsprechend der gängigen Bambusbauweise, die Längshalme mit ihren dicken und dünnen Halmenden in wechselnder Reihenfolge angeordnet. So befanden sich an jedem Auflager sowohl in der oberen als auch in der unteren Ebene je ein dünnes und ein dickes Halmende. Die Unterkante der unteren Längshalmebene hatte Kontakt mit den Auflagern. Als Konsequenz aus den Durchmesserunterschieden der Längshalme am Auflager stellte sich die Mittelebene mit den Querhalmen schräg. Für etwaige Deckenelemente mit längeren Querhalmen, welche mehr als nur zwei Längshalmachsen verbinden, wäre nicht die Unterkante der unteren Halme, sondern die den Querhalmen zugewandte Oberkante der unteren Halme maßgeblich. Hieraus folgt jedoch auch, dass alle Maßtoleranzen nach unten hin durch die Auflager ausgeglichen werden müssen. Die Maßabweichungen der Halme machten es schwierig, bei den dreifach gestapelten Halmlagen horizontale Ebenen zu definieren. In diesem Versuch wurden die geometrischen Probleme zweischnittiger Verbindungen deutlich (vgl. 4.4).

### **8.2.3 Belastungstest**

Zur gleichmäßigen Lasteinleitung wurde auf beide Längshalme der oberen Ebene ein U-Profil mit Sandsack-Bettung in der Feldmitte aufgelegt (Abb. 95). Bis zu einer Last von 7,60 kN zeigte sich zunächst ein lineares Verformungsverhalten. Die Feldmitte hatte sich bei dieser Last um 57 mm gesenkt. Abrupt versagte bei dieser Last die erste Dübelverbindung zwischen der oberen und unteren Längshalmlage aufgrund zu hoher Schubkräfte (Abb. 98). Betroffen war die Lochleibung und Scherfläche des Dübellochs am dünnsten Halmende (Abb. 96). Die durch Schub- und Querkraft erzeugte Verschiebung der Längshalme zueinander führte dazu, dass die Lochleibung nachgab und die ehemals orthogonale Stellung von Dübeln und Halmen, eine Rautenform annahm. Bei anschließendem Wiederanstieg der Last, versagten auch die angrenzenden Dübelverbindungen. Der vollständige Verlust des Widerstands trat bei einer Verformung von 82 mm ein, die Kraft betrug hier noch 7,50 kN. Das Versagen der Lochleibung führte zum Verlust der nachgiebigen Verbundwirkung. Die einzelnen Halme waren beschädigt, der Länge nach aufgerissen und funktionierten nunmehr weder als Gesamt- noch als Einzeltragwerk.

#### **8.2.3.1 Lochleibungskräfte**

Das Tragwerk kann als Vierendeel-Träger gedeutet werden, bei dem Ober- und Untergurt durch biegesteif angeschlossene Dübel verbunden sind (Abb. 97). Die Einspannung der Dübel wird im konkreten Fall durch die Fixierung in den gegenüberliegenden Wänden eines Halmes realisiert. Durch diese Verdübelung wirken Kräfte auf die Lochleibung, die im Folgenden qualitativ betrachtet werden sollen (Abb. 99). Während der obere Halm durch die Schubkraft zum Auflager hingedrückt wird, wird der untere Halm vom Auflager weggezogen. Dieses Kräftepaar wirkt mit einem Hebel, der dem Achsabstand der oberen und unteren Halmebene entspricht. Aus der Schubkraft resultiert folgendes Moment:

$$M = -(F_S \cdot 2D)$$

Da in der Stabachse der Längshalme keine Kraftübertragung stattfinden kann, müssen je Halm zwei Lochleibungen die Schubkraft in den Dübel einleiten.

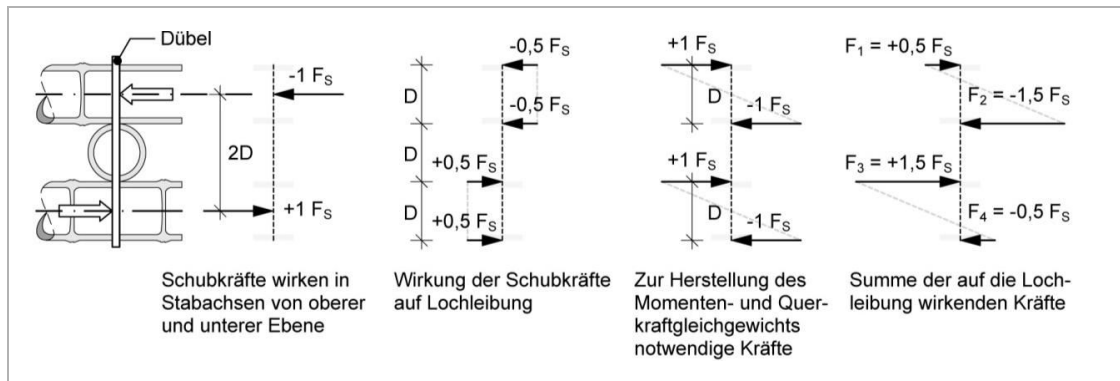


Abb. 99: Qualitative Herleitung der wirksamen Lochleibungskräfte.

Es wirken aus Schubkraft also je Lochleibung:

$$0,5 \cdot F_S$$

In diesem Zustand ist zwar die Summe aller Querkräfte am Dübel gleich Null, doch herrscht kein Momentengleichgewicht. Dazu bedarf es zusätzlicher Kräfte, die ein entsprechendes Gegenmoment bilden, welches der Einspannung der Dübel entspricht:

$$\sum M = 0 \rightarrow -(F_S \cdot 2D) + 2 \cdot (F_S \cdot D) = 0$$

Zusätzlich zu den Schubkräften wirken also Kräfte aus dem Gegenmoment in abwechselnder Richtung auf die Lochleibungsflächen. Jedes Kräftepaar hat den Betrag von:

$$1,0 \cdot F_S$$

Werden die angreifenden Schubkräfte und die zum Ausgleich der Momente nötigen Kräfte kombiniert, zeigt sich, dass die Lochleibungen mit unterschiedlichem Betrag und Richtung belastet werden (Abb. 99).

$$F_1 = -0,5 \cdot F_S + 1,0 \cdot F_S = +0,5 \cdot F_S$$

$$F_2 = -0,5 \cdot F_S - 1,0 \cdot F_S = -1,5 \cdot F_S$$

$$F_3 = +0,5 \cdot F_S + 1,0 \cdot F_S = +1,5 \cdot F_S$$

$$F_4 = +0,5 \cdot F_S - 1,0 \cdot F_S = -0,5 \cdot F_S$$

Diesen Kräften hat ein Halm mit dünner Halmwand nur eine geringe Lochleibungsfläche entgegenzusetzen. Als Konsequenz sind die Spannungen der Lochleibung und der Scherflächen hier entsprechend hoch, weshalb an diesem Punkt das Versagen besonders wahrscheinlich ist.



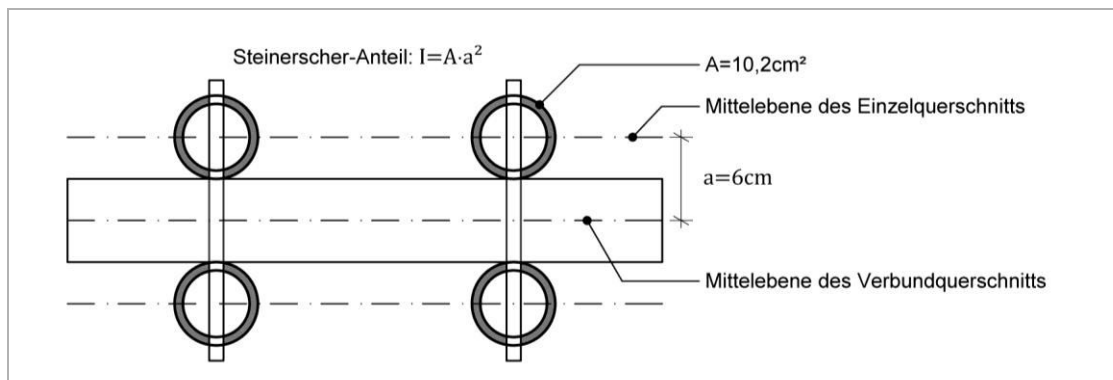


Abb. 100: Querschnitt durch den nachgiebig verbundenen Träger mit Einzelfaktoren des Steinerschen-Anteils.

### 8.2.3.2 Bewertung der Verbundwirkung

Neben der Deutung als Vierendeel-Träger kann das Tragwerk aber auch als vier zusammengesetzte Biegestäbe mit nachgiebigem Verbund betrachtet werden. Von Interesse ist dabei der Wirkungsgrad des Verbunds. Ohne Verbundwirkung würden die vier Längshalme nur ihren jeweiligen Einzelanteil zum Gesamt-Flächenträgheitsmoment beitragen, wie im vorangegangenen Versuch (PK230-4x1) ermittelt. Bei vorhandener Verbundwirkung wirkt jedoch zusätzlich der zusammengesetzte Querschnitt als ein Ganzes. Der Steinersche-Anteil ( $A \cdot a^2$ ) kann entsprechend der Verbundwirkung genutzt werden (Abb. 100). Der Grad der Verbundwirkung wird nach Eurocode 5 mit dem Faktor  $\gamma$  beschrieben, welcher zwischen  $\gamma = 0$  (keine Verbundwirkung) und  $\gamma = 1$  (volle Verbundwirkung) liegt<sup>46</sup>.

Das effektive Flächenträgheitsmoment  $I_{\text{eff}}$  kann folglich als Ergebnis der beiden Summanden (Einzelstäbe + Verbundwirkung aus Steinerschem-Anteil) ausgedrückt werden. Weil die Einzelstäbe dieselben sind, wie im vorhergehenden Versuch (PK230-4x1), ist das Widerstandsmoment dieser Halme bereits bekannt: Es beträgt  $148,8 \text{ cm}^4$ . Hinzu kommt nun der Steinersche-Anteil. Eingesetzt für den PK230-D ergibt sich:

$$I_{\text{eff}} = 148,8 \text{ cm}^4 + (4 \cdot \gamma \cdot 10,2 \text{ cm}^2 \cdot (6 \text{ cm})^2)$$

Wie sehr die Verbundwirkung das Flächenträgheitsmoment steigern kann, wird aus folgender Gegenüberstellung ersichtlich:

$$\gamma = 0 \rightarrow I_{\text{eff}} = 148,8 \text{ cm}^4$$

$$\gamma = 1 \rightarrow I_{\text{eff}} = 1.613 \text{ cm}^4$$

Die Verbundwirkung wird unter anderem durch folgende Faktoren günstig beeinflusst:

- geringe Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel
- geringer Abstand der Verbindungsmittel untereinander
- große Spannweite
- geringe Verformung des Materials

In Anbetracht der vorhandenen Material- und Geometriestreungen der Bambushalme können die einzelnen Faktoren nicht exakt aufgeschlüsselt werden. Stattdessen soll in umgekehrter Reihenfolge der Grad der Verdübelungswirkung aus dem Vergleich des bekannten

<sup>46</sup> DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5

Flächenträgheitsmoments der vorhandenen vier Einzelquerschnitte mit dem wirksamen Flächenträgheitsmoment des verbundenen Trägers verglichen werden. Zunächst wird das maximale Biegemoment errechnet:

$$M_{\max} = \frac{F \cdot l}{4} = \frac{7,6 \text{ kN} \cdot 2,30 \text{ m}}{4} = 4,37 \text{ kNm}$$

Aus der Verformung und der Biegebelastung lässt sich auf das effektive Flächenträgheitsmoment schließen:

$$I_{\text{eff}} = \frac{n \cdot M_{\max} \cdot l^2}{f_{\max}} = \frac{55,5 \cdot 4,37 \text{ kNm} \cdot (2,30 \text{ m})^2}{5,7 \text{ cm}} = 225 \text{ cm}^4$$

Das Flächenträgheitsmoment als Summe der vier einzelnen Halme ohne Verbundwirkung wurde bereits im vorhergehenden Versuch PK230-4x1 ermittelt:  $I_{\text{vorh}} = 148,8 \text{ cm}^4$ . Wird die Differenz dieser beiden Werte gebildet und mit dem maximal möglichen Steinerschen-Anteil verglichen, kann auf den Grad der Verbundwirkung  $\gamma$  rückgeschlossen werden:

$$\gamma = \frac{I_{\text{eff}} - I_{\text{vorh}}}{4 \cdot (A \cdot a^2)} = \frac{225 \text{ cm}^4 - 148,8 \text{ cm}^4}{4 \cdot 10,2 \text{ cm}^2 \cdot (6 \text{ cm})^2} = 0,05$$

Die Verbundwirkung ist mit  $\gamma = 0,05$  äußerst gering. Die Biegesteifigkeit wird somit nur unwesentlich gesteigert. Die schädigende Auswirkung der Dübel kommt hingegen voll zur Geltung. Die quer zur Spannrichtung verlaufenden Halme der Mittelebene leisten keinen direkten Beitrag zum Widerstand des Trägers, sondern wirken lediglich als Platzhalter zur Vergrößerung der statischen Gesamthöhe. Durch die in den Kontaktfugen der Halmebenen wirkenden Schubkräfte werden die Halme der mittleren Ebene um ihre eigene Längsachse gedreht (quer zur Spannrichtung). Der durch alle Ebenen geführte Dübel findet in der mittleren Ebene keinen Halt, was die Verformung begünstigt. Diese Art von „Walzenlager“ muss zwangsläufig zu einer höheren Nachgiebigkeit der Konstruktion führen.

### 8.2.3.3 Fazit

Während des Fügeprozesses galt es viele Toleranzen auszugleichen. Vor allem an den Auflagern machten sich die Varianzen der Durchmesser nachteilig bemerkbar, da sie zu einer Schiefstellung der Mittelebene führten. Ein serieller Abschluss des Elements wäre anzustreben, um die Auflagerdimensionen exakt kontrollieren zu können. Das Tragwerk wirkt in Form von vier zusammengesetzten Biegestäben mit nachgiebigem Verbund, in einem gewissen Grad aber auch als Rahmenträger, was zur Biegebeanspruchung aller Teile führt. Das für die Dübelverankerung nötige Kräftepaar überstieg die Festigkeit der Halmwand. Dies führte zum Versagen der Konstruktion. Eine Reduktion der Verbindungsmittelabstände hätte zwar für eine höhere Verbundwirkung und geringere Lochleibungskräfte gesorgt, wäre aber aufgrund der geringeren Scherflächen und der allgemein zerstörenden Wirkung von Dübelverbindungen bei Bambus nicht ratsam.

Der Versuch, das Deckentragwerk der Schule aus Kapitel 6.2.2 mit geringeren Halmdimensionen, kleinerer Spannweite und größeren Dübelabständen nachzubilden, erzeugte eine deutlich geringere Verbundwirkung. Während die statischen Berechnungen des Deckentragwerks einen Grad der Verbundwirkung von 0,40 erbrachten, betrug der experimentell nachgewiesene Grad der Verbundwirkung nur 0,05 beim PK230-D.

## 8.3 Leimverbindung mit Keilzinken

### 8.3.1 Zielsetzung

Beim Prüfkörper PK230-D (vgl. 8.2) hatte sich die variierende Bambusgeometrie nachteilig bemerkbar gemacht, da es zur Schiefstellung des Elements am Auflager gekommen war. Gestapelte Konstruktionen aus Bambus können keine klar definierten Außenabmessungen garantieren. Um diesem Problem zu begegnen, sollten die Halmenden im Folgenden durch orthogonale Abschlusshölzer gebildet werden, was gleich mehrere Vorteile versprach:

- Vermeidung der Halm-Querpressung am Auflager
- Stabilisierung der Röhrenform am Halmende
- einheitlich orthogonale Auflagergeometrie
- Verwendung der Auflagerklötze als Unterlage für eine darauf stehende Wandscheibe, ähnlich der geschossweisen Stapelung im Holztafelbau

Dieser zunächst aus der Halmgeometrie entwickelte Ansatz bedurfte jedoch noch eines Fügeprinzips, welches in der Lage sein würde, die am Auflager auftretenden Schnittgrößen zu übertragen. Gleichzeitig sollten alle nur erdenklichen Geometrieabweichungen durch das Fügeprinzip ausgeglichen werden. Die Wahl fiel auf Keilzinkenverbindungen, wie sie vom Konstruktionsvollholz bekannt sind. Die längsgerichtete Kammstruktur der Zinken kann allen Querschnittsformen gleichermaßen aufgeprägt werden. Insofern spielt die Halmgeometrie keine Rolle mehr, lediglich die Forderung nach planparallelen Schnittflächen der Stabenden war zu erfüllen. Der Halm konnte in der weiteren geometrischen Betrachtung vereinfacht auf die ideale Stabachse reduziert werden.

Keilzinkenverbindungen sind beim Fügen von Holzquerschnitten und lamellierten Bambusquerschnitten (LBL) seit längerem erprobt. Die hier untersuchte Kombination von Holz und runden Bambusrohren mittels Keilzinken stellt jedoch eine Neuheit dar. Folgende Fragestellungen galt es zu klären:

- Wie hoch sind die Keilzinkenverbindungen belastbar?
- Können Keilzinkenverbindungen zur Verbesserung der Zugkrafteinleitung dienen?
- Welche Möglichkeiten der Standardisierung von Elementabschlüssen bieten sich an?

### 8.3.2 Beschreibung

In Keilzinkenverbindungen findet der Kraftübertrag mittels Scherspannung über die verleimten Flanken der Keile statt. Für Konstruktionsvollholz wird ein Flankenverhältnis gewählt, welches dem Verhältnis von Zug- und Scherfestigkeit des Materials entspricht. Für Holz beträgt dieses Verhältnis etwa 10 : 1, Bambus hat ein noch größeres Verhältnis von Zugfestigkeit zu Scherfestigkeit, es liegt etwa bei 13 : 1. Für die volle Ausnutzung der Materialfestigkeiten von Bambus sollten die Zinken entsprechend dieses Verhältnisses spitzer zulaufen. In der Kombination von Holz und Bambus spielt die hohe Zugfestigkeit von Bambus aber keine Rolle, da zu erwarten ist, dass das Holz früher versagt. Weil zur Herstellung der Keilzinkenverbindungen keine anderen Werkzeuge verfügbar waren, wurde eine Fräse verwendet, die eine Zinkenlänge von 10 mm und eine Zinkenbreite von 1,3 mm hatte (Abb. 102). Das Flankenverhältnis betrug damit lediglich 7,6 : 1.

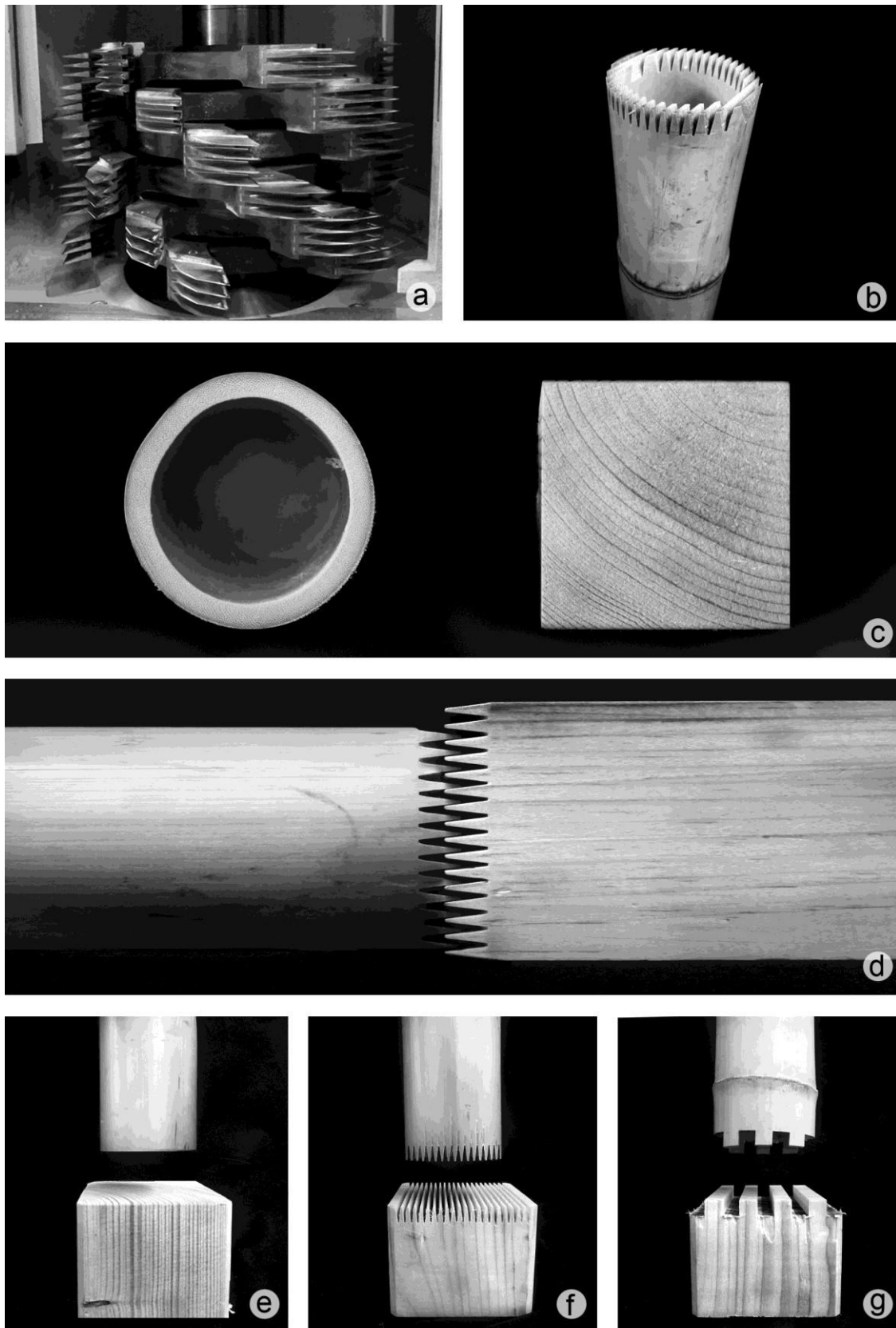


Abb. 101: Kubischer Stab-Abschluss. a) Die Keilzinken-Fräse prägt den verschiedensten Stabenden die immer gleiche Form auf. b) Bambushalm mit Keilzinkung. c) Bambushalm und hölzerner Vollquerschnitt können ihre Vorteile kombinieren. d) Bambushalm und Kantholz mit Keilzinkung passen trotz unterschiedlicher Querschnitte problemlos zusammen. e) Bambushalm und Kantholz, Hirnholzflächen *stumpf gestoßen*. f) Bambushalm und Kantholz mit vollflächiger *Keilzinkung*. g) Bambushalm und Kantholz mit *Fingerzinken*.

### 8.3.3 Belastungstest

Um die Leistungsfähigkeit dieser neuartigen Verbindungsweise von Bambus und Holz zu testen, wurden kurze Einfeldträger von 50 cm gefertigt, welche links und rechts jeweils eine Keilzinkenverbindung mit Nadelholz-Abschlusshölzern besaßen (Abb. 102).

Die Abschlusshölzer waren auf den Auflagern positioniert. Die Keilzinkenverbindungen waren jeweils 3 cm vor den Auflagern angeordnet. Mit einem Gurt wurde eine Punktlast 10 cm rechts des Auflagers A aufgebracht. Diese Laststellung sollte sicherstellen, dass nur die linke Keilzinkenverbindung an die Lastgrenze gebracht würde. Unter Auflager A wurde die vertikale Auflagerreaktion  $A_V$  mit einer Kraftmessdose gemessen und entsprechend die Querkraft- und Momenten-Beanspruchung der betreffenden Keilzinkenverbindung ( $M_k$ ) ermittelt:

$$M_k = A_V \cdot 0,03 \text{ m}$$

Die Querkraft  $V$  entsprach der Auflagerkraft  $A_V$ . Die wirksame Holz-Querschnittsfläche im Bereich der Keilzinkung glich der Bambus-Querschnittsfläche  $A_\emptyset$ . Das Widerstandsmoment der Verbindung war demzufolge ebenso groß wie das des röhrenförmigen Bambushalmes ( $W_b$ ). Es galt hier:

$$W_b = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D}$$

Die Biegespannung im Bereich der Keilzinken ergab sich aus:

$$\sigma = \frac{M_k}{W_b}$$

#### 8.3.3.1 Ausrichtung der Keilzinken

Es wurden zwei unterschiedliche Ausrichtungen der Keilzinken untersucht (Abb. 104):

- Keilzinken liegend (Kraft wirkte orthogonal zu den Keilzinken-Linien)
- Keilzinken stehend (Kraft wirkte parallel zu den Keilzinken-Linien)

Je Ausrichtung wurden sechs Prüfkörper getestet. Es wurden Halmquerschnitte zwischen 49/4 und 61/5 verwendet. Die maximal wirksame Querkraft betrug zwischen 4,3 kN und 9,9 kN. Es zeigte sich bei den Versuchen, dass das Nadelholz aufgrund von Biegezugspannung im unteren Bereich der Keilzinkenverbindung versagte: Die angeleimten Holzzinken hafteten weiterhin am Bambus und rissen am Zinkenansatz aus dem umgebenden Holz heraus. Auch die Wirkung der Querkraft zeigte sich an den hölzernen Zinken, welche nach dem Versagen der Zugzone entsprechend nach unten verschoben wurden. Dieses vertikale Verschieben trat vor allem bei der liegenden Anordnung der Keilzinken auf, da in dieser Position die einzelnen Zinken wie kleine Auskragungen wirkten und das Holz sich nicht auf darunterliegendem Holz abstützen konnte. Die Betrachtung der Versagensbilder liefert die Erklärung für die geringere Tragfähigkeit der liegenden Keilzinken (Abb. 108).

Eine weitere Schwächung der liegenden Zinken ausrichtung musste aus der ungenügenden Leimbindung der äußersten Zinken resultieren. Durch das Zusammendrücken des Keilzinkenbereichs pressen sich die Flanken der Zinken aneinander. Endet jedoch der Bambushalm auf einem halben Zinken, so fehlt diesem die gegenüberliegende Flanke.

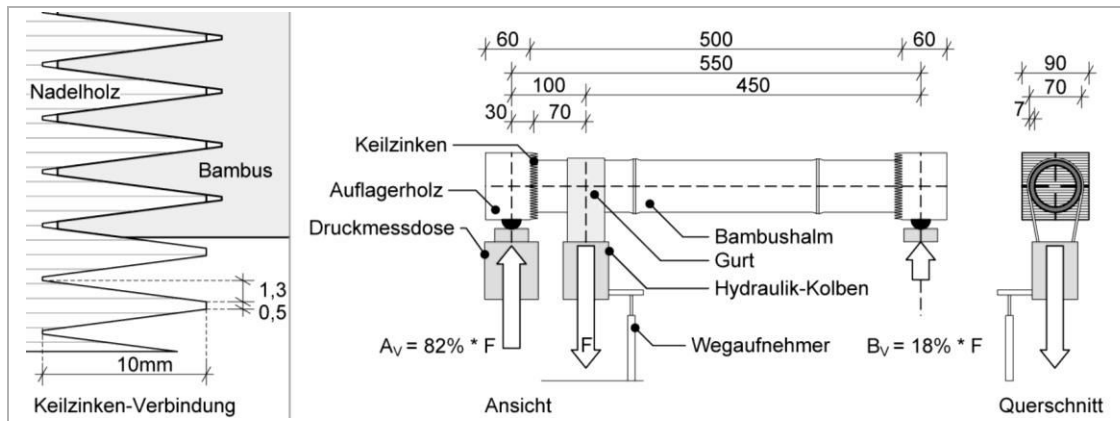


Abb. 102: Aufbau für den Keilzinken-Belastungstest.

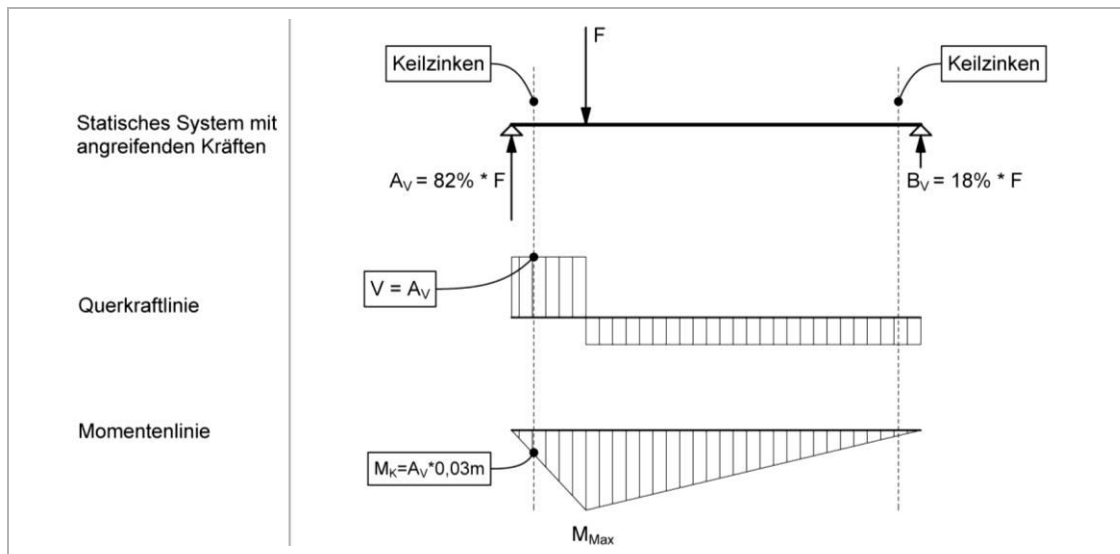


Abb. 103: Schnittgrößen im Bereich der Keilzinken-Verbindung.

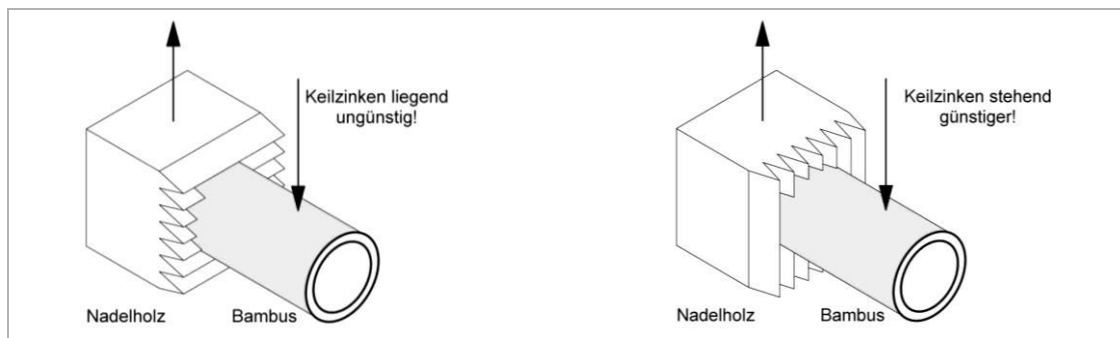


Abb. 104: Zwei Arten der Keilzinkenausrichtung – liegend (links) und stehend (rechts).

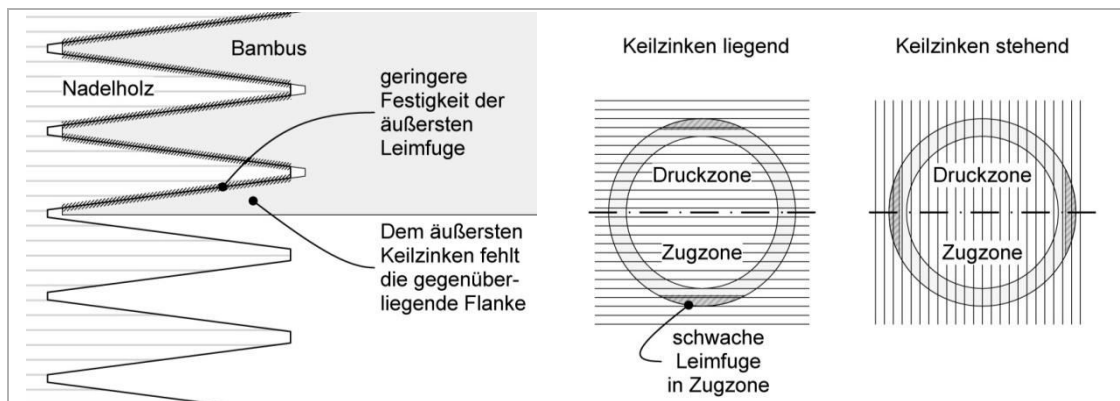


Abb. 105: Ein geringerer Anpressdruck an den Außenzinken führt zu geringeren Festigkeiten der Leimfuge.

Daher ist der effektive Anpressdruck der Leimfläche hier zwangsläufig geringer, was zu einer minderwertigen Bindung des Randzinkens führen muss. In der liegenden Anordnung befanden sich diese Randzinken an den am stärksten belasteten Stellen der Druck- bzw. Zugzone (Abb. 105). Die schlechtere Leimbindung führte zum verfrühten Ablösen der Randzinken, was die Tragfähigkeit entscheidend reduzierte. In der stehenden Ausrichtung der Keilzinken waren die Randzinken an den Seiten des Halmes und somit weniger stark durch Biegezug beansprucht. Die stehende Anordnung konnte in der Folge durchschnittlich 30 % höhere Biegezugspannungen bzw. 38 % höhere Querkräfte pro Flächeneinheit übertragen. Die Verformung bzw. Verschiebung war bei der stehenden Anordnung deutlich geringer und regelmäßiger (Abb. 106). Auch waren die Bruchspannungen zwischen liegender und stehender Keilzinkung verschieden (Abb. 107). Die ermittelten maximalen Biegezugspannungen lagen jeweils über der zulässigen Spannung für Nadelholz, was das Versagen auf Seiten des Holzes erklärt.

### 8.3.3.2 Fazit

Der geometrische Versuch, röhrenförmige Bambushalme mit kubischen Kanthölzern zu kombinieren war erfolgreich. Die stehenden Keilzinken waren bzgl. Biegespannung etwa 30% stärker belastbar als liegende Keilzinken. Mittels Keilzinken lassen sich Kräfte direkt in die Faserenden einleiten, was im Vergleich zu anderen Füge-techniken zu einer höheren Ausnutzung der vorhandenen Festigkeiten führen kann. Die Biegezugfestigkeit des Nadelholzes stellte allerdings die begrenzende Größe dar. Die Bambusfestigkeit wurde nicht überschritten.

Das Potenzial von Bambus-Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichen Materialien sollte weiter untersucht werden. Infrage kommen neben Nadelholz auch verleimte Bambuslamellen „LBL“ (Laminated Bamboo Lumber). Für Hochleistungsverbindungen wäre darüber hinaus ein direktes Kleben von Bambus-Keilzinken an entsprechende Stahl- oder Aluminium-Endstücke denkbar. Dies würde die Festigkeit erheblich erhöhen und einfachere Knotenpunkte ermöglichen.

### 8.3.3.3 Zugfestigkeitspotenzial

Mit den bekannten Festigkeiten von Holz könnten Keilzinkenverbindungen auch auf größere Bambushalme extrapoliert werden. In einem Forschungsbericht<sup>47</sup> aus dem Jahr 2010 wird der Versuch beschrieben, die in Bambushalme einleitbaren Zugkräfte zu maximieren. Der Kraftübertrag geschah über eine neuartige PU-Haftbrücke und Kammerbeton mittels Scherspannung auf der Halminnenseite (vgl. 3.2). Die maximal einleitbare Zugkraft betrug im Mittel 110,8 kN. Verwendet wurden große Bambushalme mit einem durchschnittlichen Durchmesser von  $D = 16,9$  cm. Setzt man für diese Halme ein Verhältnis von  $D/t = 10$  voraus, folgt aus den angegebenen Werten eine Wanddicke von  $t = 1,7$  cm und Halmquerschnittsfläche von  $A_0 = 81,2$  cm<sup>2</sup>. Über diese große Stirnfläche könnte mittels Nadelholz-Keilzinken (vorausgesetzt eine Bruchspannung von 28,3 MPa) theoretisch eine Zugkraft von 230 kN eingeleitet werden<sup>48</sup>. Diese Kraft wäre mehr als doppelt so groß wie die mittels PU-Haftbrücke und Kammerbeton eingeleiteten 110,8 kN.

---

<sup>47</sup> „Steigerung der Tragfähigkeit der Knotenanschlüsse der Bambusrohre für das Deutsch-Chinesische Haus der Expo 2010 durch Optimierung des Bambus-Beton-Verbundes“. Garrecht, 2010 (16)

<sup>48</sup> Der von der Randzinken-Problematik betroffene Anteil der Querschnittsfläche muss mit steigendem Halmquerschnitt abnehmen, da die Wanddicke zunimmt und der Fläche somit anteilig weniger Rand gegenübersteht.

### 8.3.3.4 Auflageroptimierung:

Für die weitere Auflageroptimierung lassen sich folgende Punkte festhalten:

- ⇒ Zugkräfte sollten mithilfe von Leim stets lateral in die Fasern von Bambus eingeleitet werden, dazu sollte die Leimfläche besonders groß sein, um die Scherfestigkeit von Holz und Bambus nicht zu übersteigen.
- ⇒ Versatzmomente am Auflager sollten vermieden werden. Stattdessen sollte die Vertikale Kraft (Querkraft) direkt in die Auflagerachse eingeleitet werden.
- ⇒ Für die Übertragung von Druckkräften ist der stumpfe Stoß der Stirnflächen von Holz und Bambus anzustreben.

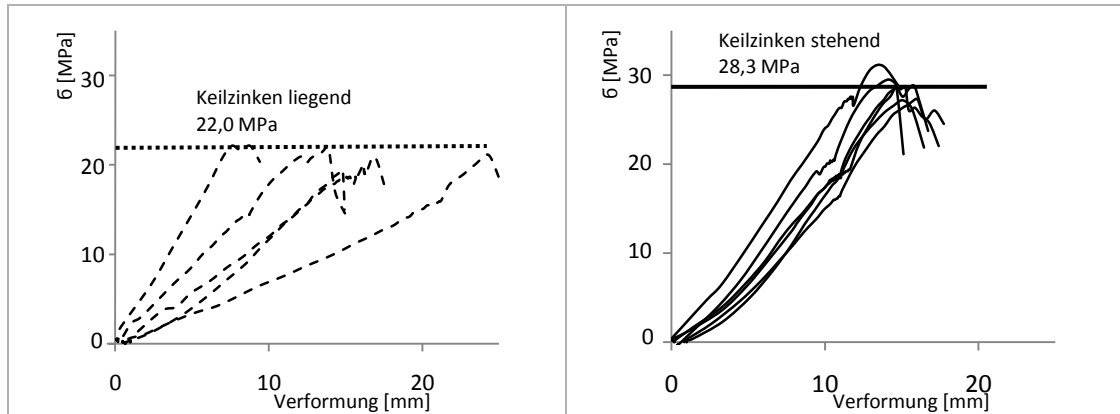


Abb. 106: Nachgiebigkeit und Bruchspannung der Keilzinkenverbindung – liegend (links) und stehend (rechts).

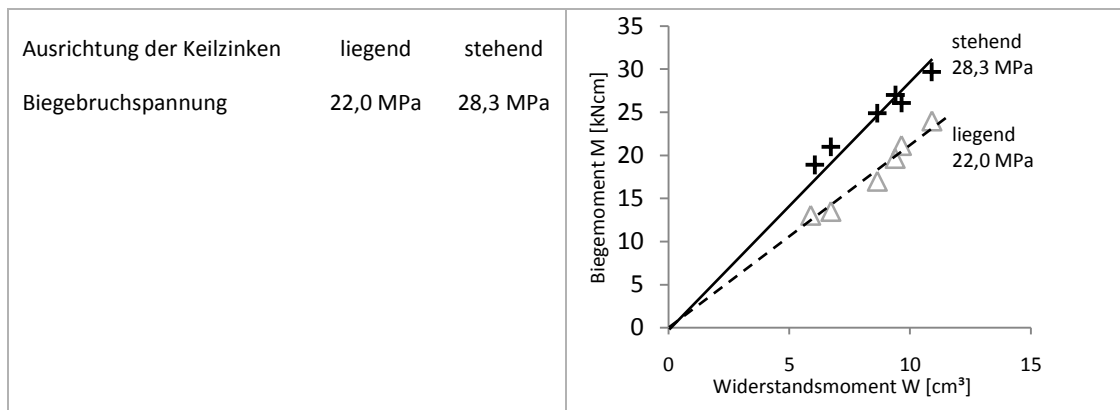


Abb. 107: Auswirkung der Keilzinkenrichtung auf die Bruchspannung.

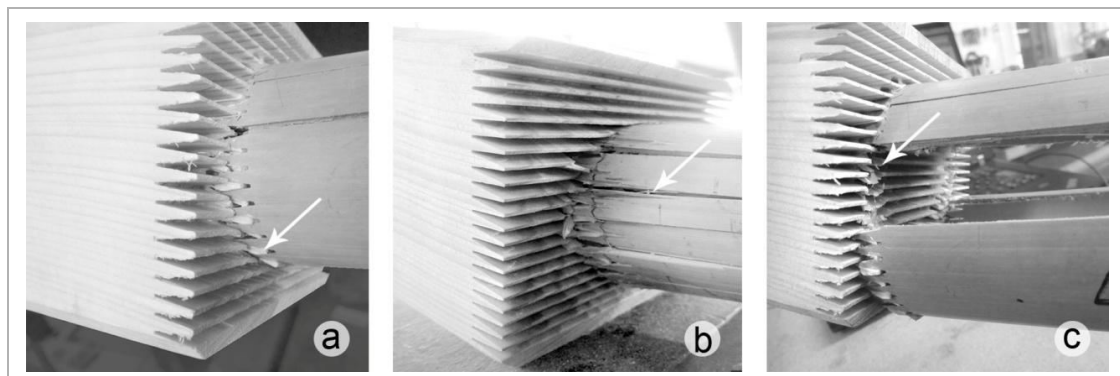


Abb. 108: Versagen der liegenden Keilzinkenverbindung unter Momenten- und Querkraftbeanspruchung:  
 a) Biegezugversagen: Holzfasern in der Zugzone haften im Leim und werden aus dem Holz herausgerissen.  
 b) Das Versagen in der Zugzone nimmt den Bambusfasern im unteren Halbbereich das Auflager, sie sacken nacheinander ab, der Halm spaltet sich in der Folge. c) Problem der liegenden Keilzinken wird sichtbar: die Holzzinken können sich nicht auf darunterliegendem Holz abstützen und brechen ab.



## 8.4 Deckenprüfkörper PK230-U

### 8.4.1 Zielsetzung

Die Auswertung des Versuchs PK230-D hatte gezeigt, dass die Verwendung von Dübeln zwar eine geringfügige Steigerung der Steifigkeit bewirken konnte, jedoch das schubsteife Verbinden von Ober- und Untergurt nicht zufriedenstellend mit Dübeln in der dünnen Halmwand zu lösen war. Es wurde daher für den nächsten Versuch das Prinzip eines unterspannten Trägers gewählt, bei dem sich Unterspannung und horizontaler Druckstab im Auflagerpunkt treffen, im Feld also keine Schubkräfte wirken. Am Beispiel von Stahlbeton beschreibt der Ingenieur Pólonyi im Grunde dieselbe Problematik:

*„Legt man die Hauptbewehrung entlang der Zugtrajektorien, dann entstehen keine Schubspannungen, die mit Bügeln aufgenommen werden müssen. Es gibt keinen Schub, sondern nur eine falsch geführte Hauptbewehrung.“<sup>49</sup>*

Das Prinzip der Verwendung von Auflagerhölzern aus dem vorhergehenden Keilzinken-Versuch erschien vielversprechend. Um jedoch das Auftreten von Versatzmomenten kurz vor dem Auflager zu vermeiden, sollten bei diesem experimentellen Aufbau alle vertikalen Kraftanteile direkt in die Auflagerachse übertragen werden. Die Verankerung der Seilkraft sollte in tangentialer Richtung über eine großflächige Leimfuge mit dem Auflagerholz stattfinden, während sich der horizontale Druckstab mit seinen Stirnflächen am Auflagerholz abstützen sollte. Auf Keilzinkung wurde verzichtet.

### 8.4.2 Beschreibung

Der Deckenprüfkörper PK230-U hatte eine Gesamtlänge von 234 cm bei einer effektiven Spannweite von  $l = 230$  cm und besaß einen mittigen Stich von etwa  $\frac{1}{10} \cdot l = 23$  cm. Die Breite betrug lediglich 30 cm. Mit diesen Abmessungen entsprach der Prüfkörper PK230-U eher einem Balken als einem flächenhaften Deckenstreifen, was jedoch stellvertretend für den einachsigen Lastabtrag gelten kann. Der Deckenprüfkörper wurde entsprechend Abb. 109 ausgeführt. Die Einzelkomponenten waren:

- 2 Auflagerhölzer 10 x 10 x 30 cm mit schrägem Sägeschnitt
- 10 Bambusstreifen  $l = 236$  cm
- 4 Bambus-Druckstäbe  $l = 214$  cm
- 0,10 m<sup>3</sup> Sandfüllung (Grobsand)

#### 8.4.2.1 Auflagerhölzer

Als schubfeste Verbindung der Druck- und Zugelemente diente im Bereich der beiden Auflager jeweils ein Kantholz mit einem Querschnitt von 10 x 10 cm, die Länge betrug 30 cm. Diese Rechteckprofile aus Nadelholz wurden der Länge nach gesägt, so dass der Querschnitt in einem Winkel von 21,8° in zwei ungleiche Trapeze unterteilt wurde. Dieser Winkel entsprach der Tangentensteigung der Seillinie am Auflager bei einem Stich von  $1/10 \cdot l$ . Der schräge Sägeschnitt diente zur Aufnahme der Bambusstreifen. Die seitliche Fläche war als Kontaktfläche und Widerlager für die Bambusdruckstäbe vorgesehen. Der Schnittpunkt der Druck- und Zugachsen markierte das Auflager des Deckenelements (Abb. 110).

---

<sup>49</sup> Pólonyi, 2014 (49)

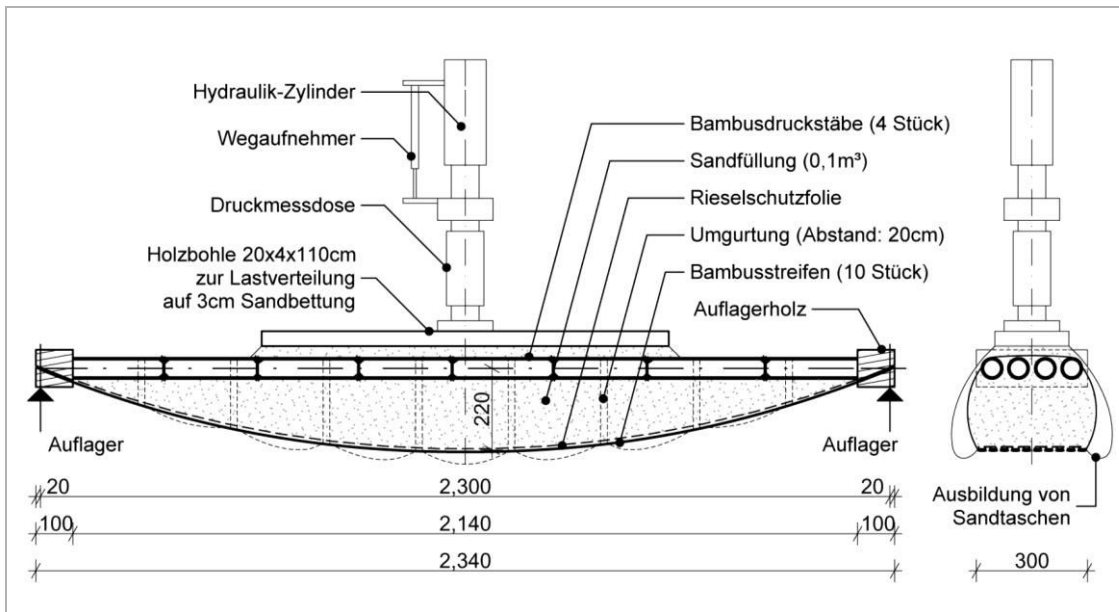


Abb. 109: Aufbau des PK230-U mit Längs- und Querschnitt durch den Prüfkörper.

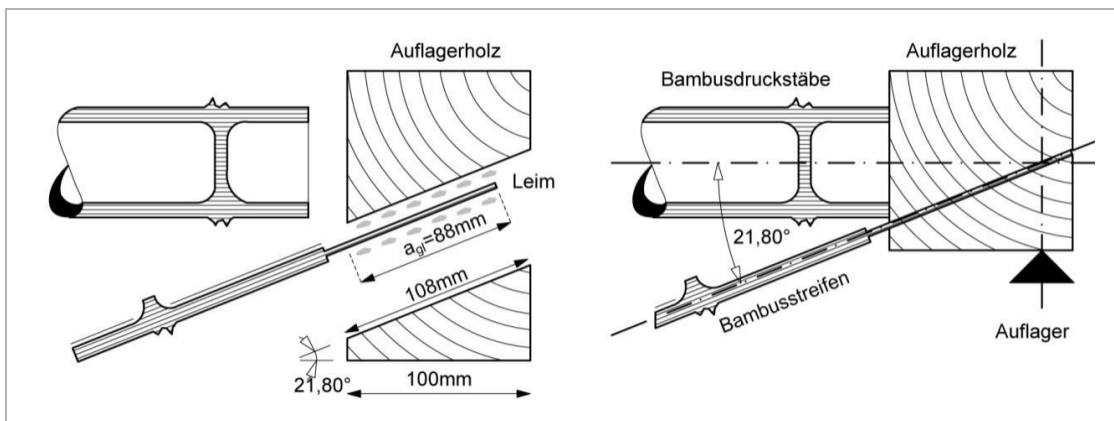


Abb. 110: Geometrie und Fügeprinzip am Auflager.

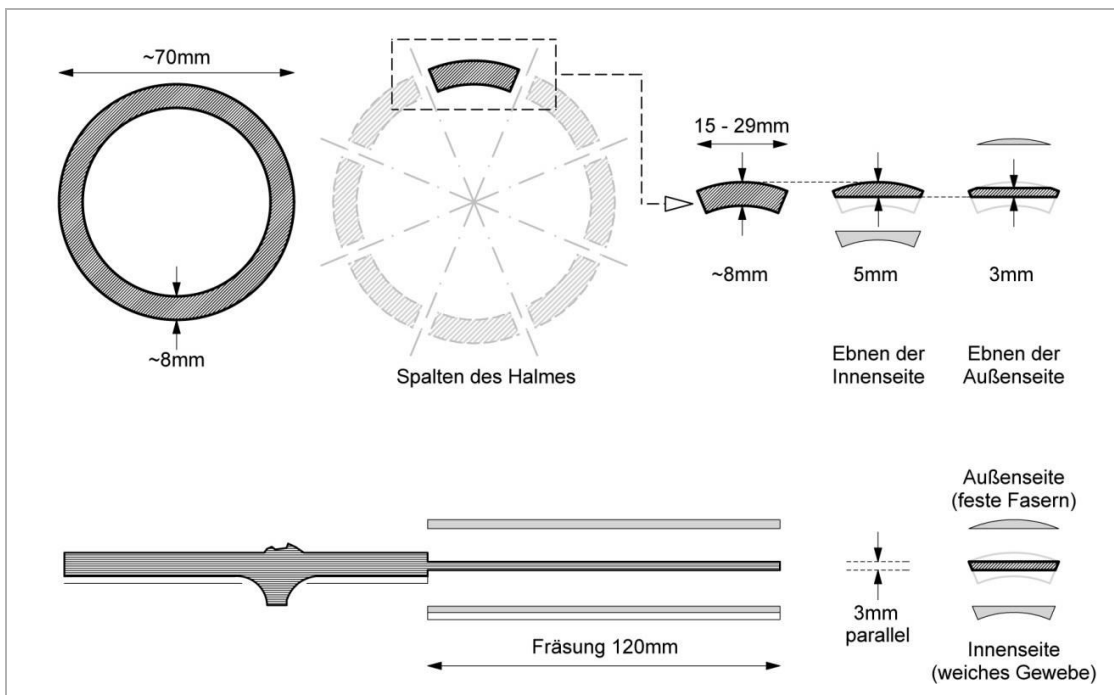


Abb. 111: Spalten und Ebenen der Bambusstreifen für den PK230-U.

#### 8.4.2.2 Bambusstreifen

Das Herstellen der Bambusstreifen erfolgte in zwei Schritten, dem Spalten und dem Ebnen.

Zum Spalten wurden zwei Bambushalme von 2,36 m Länge, etwa 70 mm Durchmesser und 7 – 9 mm Wanddicke mithilfe eines Messers in je acht Längsstreifen aufgetrennt, welche anschließend eine Breite von 15 – 29 mm besaßen. Durch den Spaltvorgang wurden die parallellaufenden Bambusfasern nur unwesentlich beschädigt. Beim Auftrennen mit einer Säge, hätte es, durch den S-förmigen Wuchs der Bambushalme (Abb. 32), zum Durchtrennen des Faserverlaufs kommen können. Von den resultierenden 16 Bambusstreifen wurden anschließend zehn Stück ausgewählt, die an den Enden jeweils auf 12 cm Länge, mithilfe einer Oberfräse geebnet wurden.

Da die natürliche Wandstärke je nach Halm und Position oben oder unten variiert (Abb. 34), ergab sich für das Ebnen folgende Vorgehensweise: Die Bambusstreifen wurden zunächst mit der Außenseite nach unten unter einer Oberfräse hindurchgeführt, sodass die Fräse die weiche Innenrundung des Halms bis auf eine Restdicke von 5 mm abtrug. So konnte – im Gegensatz zu den unregelmäßig überstehenden Spaltflanken der Innenseite – die definierte Halm-außenkante als maßhaltige Anschlagseite dienen. In einem zweiten Frässchritt wurden die innenseitig geebneten Spalten gewendet und erneut unter der Oberfräse hindurchgeführt. Die zuvor definierte Dicke von 5 mm wurde nun auf der Außenseite um weitere 2 mm reduziert, sodass sich an allen Bambusstreifen zwei beidseitig geebnete Streifenenden mit einer einheitlichen Restdicke von 3 mm ergaben (Abb. 111).

Das Ebnen der Streifenenden war die Voraussetzung für die Verleimung mit den Auflagerhölzern, da nur so die folgenden Anforderungen erfüllt werden konnten:

- **ebene und planparallele Flächen**  
Erst durch das Ebnen der Innen- und Außenrundung der Bambusstreifen entstanden planparallele Flächen, welche mit der Schnittfläche der Kanthölzer in leimfähigen und vollflächigen Kontakt gebracht werden konnten.
- **leimfähige Oberflächen**  
Durch das Entfernen der äußeren, hydrophoben Halmrinde (Cortex) sowie des feinen Häutchens auf der Halminnenseite, welche eine Leimanhaftung verhinderten, konnte erst der Leimverbund sichergestellt werden.
- **einheitliche Streifendicke**  
Um die Streifenenden nebeneinander einleimen zu können, mussten diese eine einheitliche Höhe aufweisen. Bei unregelmäßigen Streifendicken hätten die dünneren Streifen beim Verleimen nicht den nötigen Pressdruck erfahren.

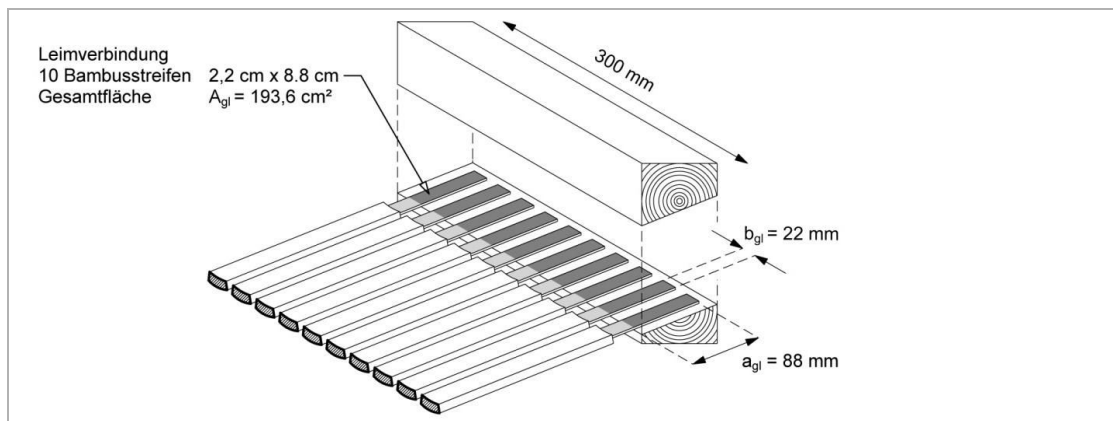


Abb. 112: Wirksame Leimfläche zwischen Auflagerholz und Bambusstreifen am PK230-U.

#### 8.4.2.3 Leimverbindung

Die zur Verleimung vorgesehenen, diagonalen Schnittflächen in den Auflagerhölzern hatten eine Breite von 30 cm und eine Tiefe von 10,8 cm, welche für die Verleimung jedoch nicht voll ausgenutzt wurde (Abb. 110). Die tatsächlich zur Befestigung der Bambusstreifen genutzte Einleimtiefe betrug:  $a_{gl} = 8,8 \text{ cm}$ . Die gespaltenen und an den Enden gefrästen Bambusstreifen besaßen aufgrund der natürlichen Varianz und ungenauer Spalttechnik unterschiedliche Breiten von 1,5 cm bis 2,9 cm. Die zehn Bambusstreifen wurden in regelmäßigen Abständen angeordnet und hatten in der Summe eine Netto-Gesamtbreite von:  $b_{gl} = 22 \text{ cm}$ . Die Gesamtgröße der Leimfläche entsprach folglich:  $A_{gl} = 8,8 \text{ cm} \cdot 22 \text{ cm} = 193,6 \text{ cm}^2$ . Zum Verleimen wurde ein Weißleim auf PVA-Basis verwendet. Nach dem Aushärten des Leims wurde die Streifenschar mit den nun fixierten Auflagerhölzern auf die vorbereiteten Auflager des Prüfstands gelegt, wo die weitere Montage stattfand.

#### 8.4.2.4 Bambusdruckstäbe

Die vier verwendeten Bambusdruckstäbe hatten eine Länge von 2,14 m und von Natur aus unterschiedliche Querschnitte, welche von 50/6 bis 80/9 reichten. Es ergab sich an den Enden eine Gesamtquerschnittsfläche im Kontakt zu den Auflagerhölzern von  $58 \text{ cm}^2$  (Tab. 9). Die Bambusdruckstäbe wurden in Abständen von etwa 7 cm zwischen die beiden 30 cm langen Auflagerhölzer gelegt und sicherten so die Auflagerhölzer gegen ein Abrutschen nach innen (Abb. 113 d, e). Gleichzeitig markierten die Bambusdruckstäbe die Bauteiloberkante des Deckenprüfkörpers und den oberen Schütthorizont der Sandfüllung.

Druckstab	D [mm]	t [mm]	$A_{\phi}$ [cm <sup>2</sup> ]
1	80	9	20,1
2	50	6	8,3
3	55	6	9,2
4	75	10	20,4
<b>Summe</b>			<b>58,0</b>

Tab. 9: Querschnittswerte der verwendeten Druckstäbe.

#### 8.4.2.5 Sandfüllung

Auf die Seilschar des PK230-U wurde anschließend eine PE-Folie von 2,40 m x 1,20 m gelegt, an den Enden hochgeführt und zwischen Auflagerhölzern und Bambusdruckstäben eingeklemmt. An den Flanken wurde die Folie hochgeschlagen und im Abstand von 40 cm mit ringförmigen Schnürungen gesichert. Der so geschaffene Hohlraum hatte ein Volumen von etwa  $0,10 \text{ m}^3$  und wurde mit einer Schüttung aus Grobsand ( $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$ ) angefüllt.

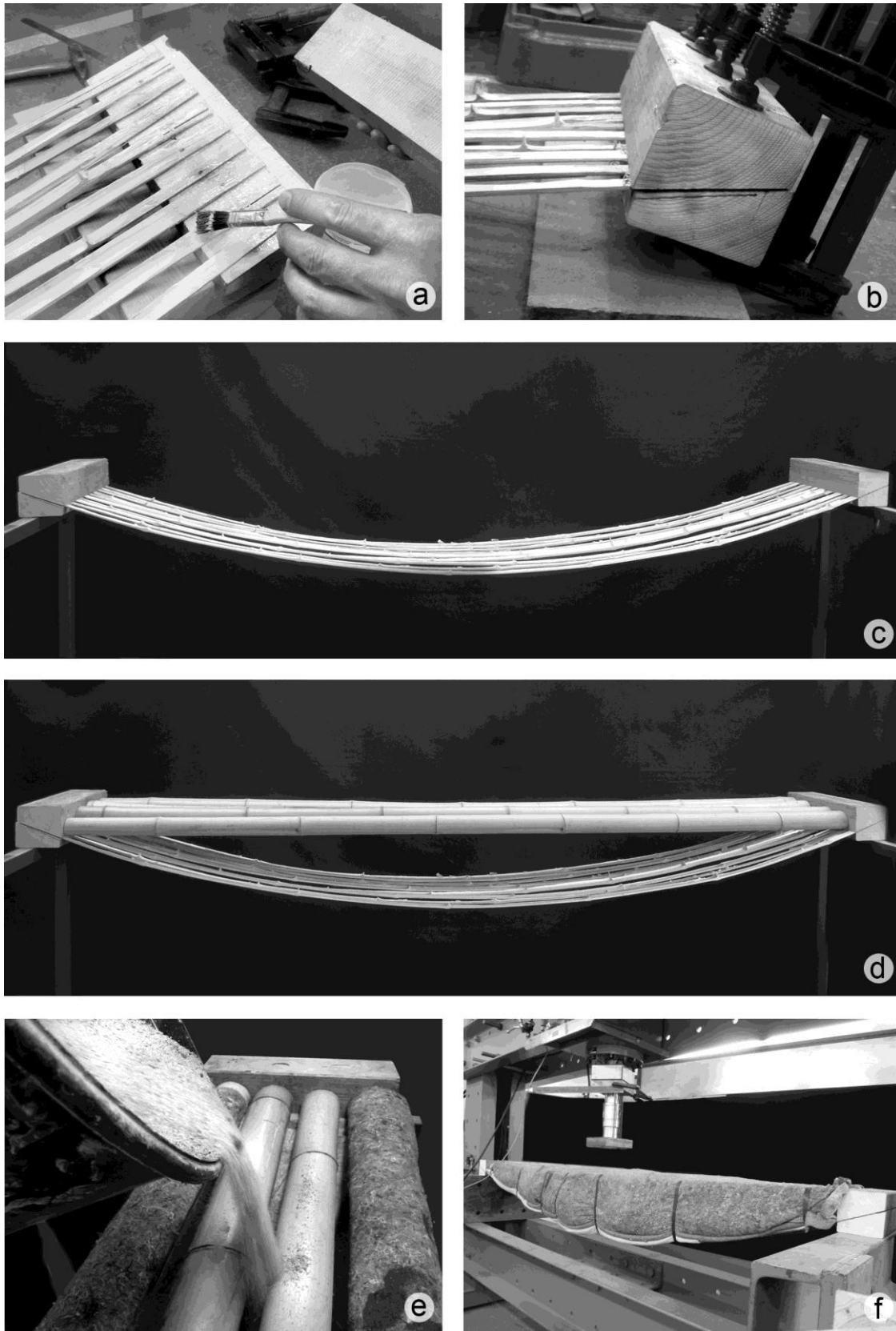


Abb. 113: Aufbau des PK230-U: a) Befestigung der Bambusstreifen an den Auflagerhölzern mittels Leim. b) Anpressen des Leims. c) Auflagerhölzer mit Bambusstreifen-Schar. d) Vier Bambusdruckstäbe werden zwischen die Auflagerhölzer gelegt. e) Einbringen der Sandfüllung. f) PK230-U vor dem Test, die Gurte sollen das Sandpaket zusammenhalten.

Der Sand wurde durch die Zwischenräume der Bambusstäbe eingebracht und manuell verdichtet. Die Eigenlast der Sandfüllung betrug entsprechend:  $G_{\text{Sand}} = 1,8 \text{ kN}$ . Die Sandfüllung sollte folgende Aufgaben erfüllen:

- **Lagerung der Bambusdruckstäbe**  
Dadurch dass der Sand bis an die Oberkante der Bambusdruckstäbe aufgefüllt wurde, waren diese vollflächig im Sandbett gelagert und konnten jegliche angreifende Vertikallast durch den Sand nach unten auf die Seilschar ableiten (Abb. 58).
- **Lagesicherung der Bambusdruckstäbe**  
Nach dem Einbringen der Sandfüllung erfuhren die Bambusstäbe durch das Anwachsen der Zugkräfte in der Seilschar axiale Druckkräfte, die infolge von Reibungswiderstand im Kontaktbereich zu den Auflagerhölzern lagesichernd wirkten.
- **Harmonisierung der Seilkrümmung**  
Ohne Sandfüllung entsprach die Kurve der Bambusstreifen etwa einem kontinuierlich gekrümmten Kreissegment. Durch das Auffüllen des Sandballasts veränderte sich diese Kurve entsprechend der Laststellung: Durch den mittigen Stich ergab sich, dass in der Mitte auch mehr Sandballast aufgefüllt werden konnte als im Bereich der Auflager. Die Kurve hatte infolge der unregelmäßigen Laststellung im mittleren Bereich eine stärkere Krümmung als im Bereich der Auflager. Der mittlere Bereich senkte sich leicht ab, während sich die Seilschar in den Viertelpunkten leicht hob. Gleichzeitig aber stabilisierte die Sandfüllung die gesamte Konstruktion durch den eingebrachten Ballast und erzeugte einen harmonischen Kurvenfluss für die Bambusstreifen, welche vom scharfen Knick einer punktförmigen Lasteinleitung zwangsläufig beschädigt worden wären.

Beim manuellen Verdichten des Sandes zeigte sich, dass die Folie trotz der Schnürungen sich in Richtung der Flanken ausbeulte. An den Längsseiten bildeten sich ungewünschte Sandtaschen aus. Um diesem zu erwartenden Phänomen zu begegnen, wurde die Anzahl der Schnürungen erhöht und deren Abstände wurden auf etwa 20 cm verringert. Dennoch deutete sich hier schon eine zunächst schwer zu kontrollierende Besonderheit der Sandschüttung an: das seitliche Ausweichen unter Vertikallast, welches auch auf die Versuchsergebnisse einen nicht geringen Einfluss haben sollte.

#### **8.4.3 Belastungstest**

Das Kraft-Weg-Diagramm wies drei unterschiedliche Phasen auf. Nach einer kurzen Anfangsphase mit geringer Steigung (bis zu einer Kraft von etwa 2 kN) folgte eine zweite, deutlich längere Phase konstanter Steigung. Bei etwa 19 kN flachte die Kraft-Weg-Kurve wieder etwas ab und erreichte bei 22 kN ihr Maximum (Abb. 114). Hier kam es zum plötzlichen Versagen des Prüfkörpers. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich die Oberkante des Prüfkörpers um 68 mm abgesenkt. In der ersten Phase senkte sich die Holzbohle auf die Bambusdruckstäbe und verdichtete alle restlichen Hohlräume. In der zweiten Phase war zu beobachten, wie die Sandfüllung gleichmäßig nach den Seiten hinausgepresst wurde und infolgedessen die Sandtaschen zwischen den Umgurtungen beständig anwuchsen. Ein Großteil der Verformung von 68 mm ließ sich auf dieses Phänomen zurückzuführen. Da diese Verformungserscheinung ausschließlich ein Problem der Flanken war, konnte man davon ausgehen, dass bei einem weniger balkenhaften, sondern mehr flächenhaften Deckenprüfkörper dieser Flanken-Effekt entsprechend geringer ausfallen würde. Eine weitere

Ursache für die Verformung lag in der Verschiedenheit von einer annähernd parabelförmigen Seillinie und einer mittig angreifenden Lastkonzentration. Die Seilschar strebte eine Form an, bei der Lastangriff und Seilkrümmung übereinstimmten. Es war zu erkennen, dass sich die Seilschar in der Mitte absenkte und sich die Viertelpunkte bei steigender Last anhoben.

#### 8.4.3.1 Versagensgrund

Bei der anschließenden Betrachtung des versagenden Auflagers B zeigte sich folgendes Bild: Die obere Hälfte des Auflagerholzes hatte sich von der Verleimung mit der Bambusstreifenschar gelöst und war nach außen abgeschert (Abb. 118). Zeitgleich rutschte die Streifenschar mit der noch anhaftenden unteren Hälfte des Auflagerholzes nach innen und blieb, nun von der Last des Hydraulikkolbens befreit, hängen. Bei näherer Betrachtung der Versagensstelle zeigte sich, dass im Holz die Scher- und Zugspannungen die Festigkeiten quer zur Faser überschritten hatten. Sowohl der Leim als auch die beteiligten Bambusstreifen zeigten keinerlei Anzeichen eines Versagens. Vielmehr hafteten im Leim die äußeren Fasern des Holzes (Abb. 118 c). An den senkrechten Innenseiten der oberen Auflagerholzhälften zeigten ringförmige Eindrückungen die Position der Bambusdruckstäbe an (Abb. 118 f, g). Diese Eindrückungen waren zwar nur von etwa 1 – 2 mm Tiefe, zeigten jedoch schon das Überschreiten der Holzdruckfestigkeit quer zur Faser an. Die Bambusdruckstäbe selbst waren im mittleren Bereich aufgrund der konzentriert angreifenden Kraft infolge der Querpressung auf der Oberseite leicht eingedrückt. Die Rundung war entlang einer 40 cm langen Mantellinie auf etwa 2 cm Breite abgeflacht. Es schien, als habe die lastverteilende Holzbohle schlimmere Schäden verhindert. Allerdings sind bei einer tatsächlichen Anwendung als Geschosdecke derartig große Punktlasten von 21 kN nicht vorhanden. Abgesehen von den hier geschilderten Abflachungen zeigten die Bambusdruckstäbe keine Anzeichen eines Knickens oder Beulens der Halmwand.

#### 8.4.3.2 Auswertung der Messergebnisse

Die Verformung des Prüfkörpers war bei höherer Last deutlich geringer, als die der vorhergehenden Versuche, was als Erfolg des veränderten Konzepts der Vermeidung von Schubspannungen angesehen werden kann (Abb. 114). Da der Versuch auf einem symmetrischen Aufbau basierte, lassen sich die resultierenden Kräfte leicht über die Kraftzerlegung an den Auflagern ermitteln. Um die tatsächlich am Auflager wirkenden Vertikalkräfte zu erhalten, wird zur gemessenen Bruchlast die errechnete Eigenlast der Sandschüttung addiert. Das Eigengewicht der leichten Bambusbauteile ist dabei vernachlässigbar gering:

$$A_V = \frac{1}{2} (22 \text{ kN} + 1,8 \text{ kN}) = 11,9 \text{ kN}$$

Die am Auflager B wirkende Horizontalkraft ergab sich aus:

$$B_H = \frac{B_V}{\tan(21,8^\circ)} = \frac{11,9 \text{ kN}}{0,40} = 29,8 \text{ kN}$$

Im Kontaktbereich mit den Bambusstäben betrug die Druckspannung quer zur Holzfaser:

$$\sigma_{\perp} = \frac{B_H}{A_{\emptyset}} = \frac{29,8 \text{ kN}}{58 \text{ cm}^2} = 5,1 \text{ MPa}$$

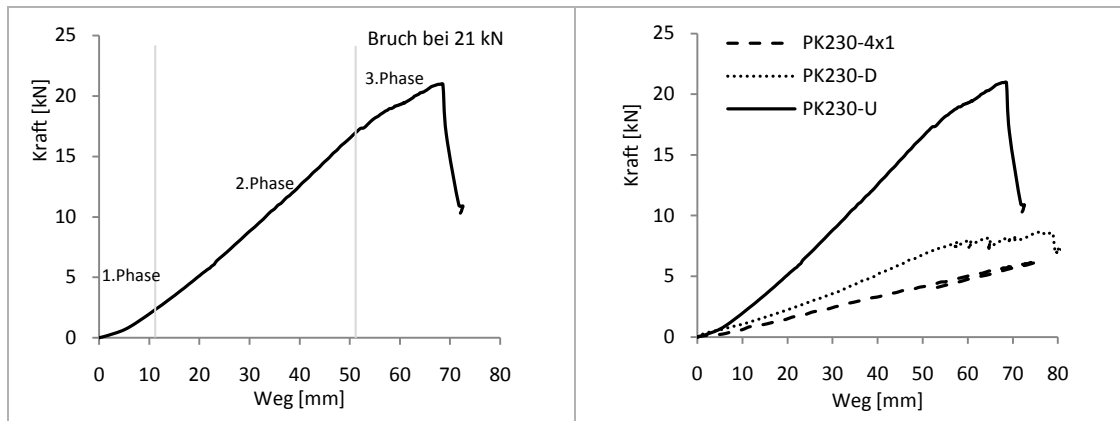


Abb. 114: Kraft-Weg-Diagramm beim Versuch PK230-U (links). Die Gegenüberstellung mit den vorhergehenden Versuchen zeigt eine deutliche Steigerung der Bauteilsteifigkeit und der Tragfähigkeit (rechts).

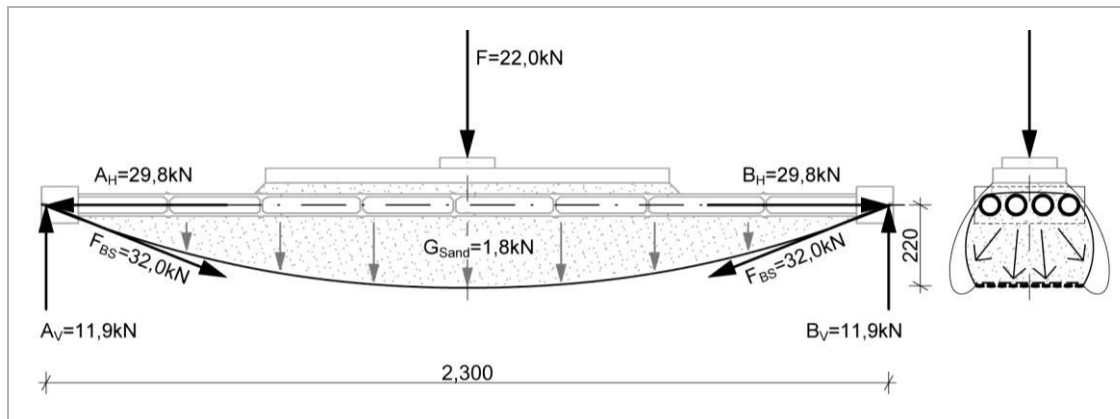


Abb. 115: Resultierende Kräfte an den Auflagern des PK230-U und seitliches Herausdrücken des Füllsands.

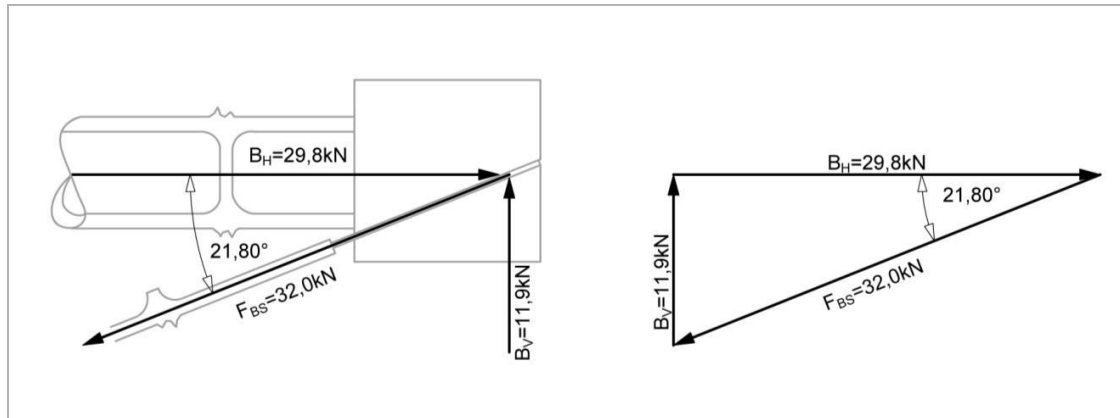


Abb. 116: Lage- und Kräfteplan am Auflager B.

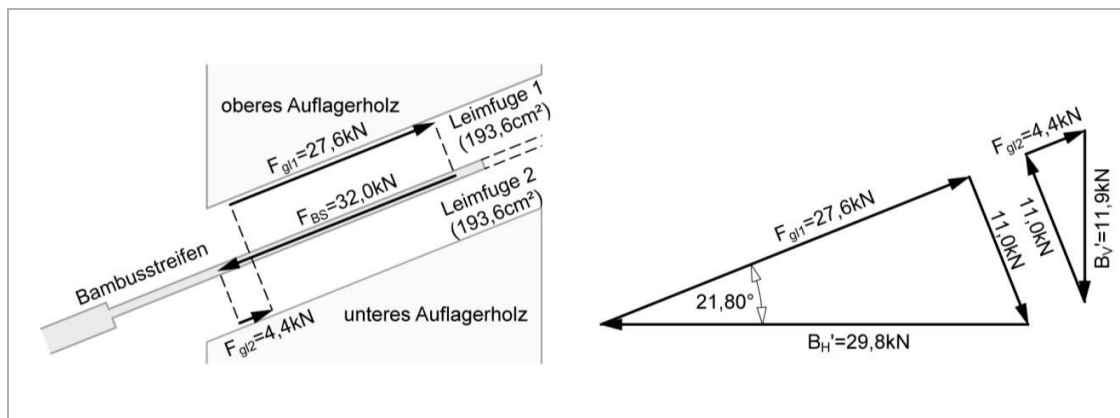


Abb. 117: Kräftegleichgewicht der Leimfugen und Kräfteplan der Auflagerreaktionen am Auflager B.



An den jeweils dünnen Halmenden war sie noch höher, da hier weniger Fläche zum Übertragen der Kraft vorhanden war. Die zulässige Querdruckfestigkeit von Holz (2,5 MPa) war dabei schon deutlich überschritten. Dies erklärt die örtlich bis zu 2 mm tiefen Einpressungen im Holz. Die am Auflager B (Abb. 116) wirkende Kraft der Bambusstreifen  $F_{BS}$  betrug:

$$F_{BS} = \frac{B_V}{\sin(21,8^\circ)} = \frac{11,9 \text{ kN}}{0,37} = 32,0 \text{ kN}$$

Dieser Kraftbetrag wurde zu ungleichen Teilen von der oberen und unteren Leimfuge übernommen. Zur besseren Unterscheidung werden sie im Folgenden „Leimfuge 1“ (oben) und „Leimfuge 2“ (unten) genannt (Abb. 117). Die in Leimfuge 2 übertragene Kraft  $F_{gl2}$  betrug:

$$F_{gl2} = B_V \cdot \sin(21,8^\circ) = 11,9 \text{ kN} \cdot 0,37 = 4,4 \text{ kN} (= F_{BS} \cdot 13,8 \%)$$

Die in Leimfuge 1 übertragene Kraft  $F_{gl1}$  folgte mit:

$$F_{gl1} = F_{BS} - F_{gl2} = 32,0 \text{ kN} - 4,4 \text{ kN} = 27,6 \text{ kN} (= F_{BS} \cdot 86,7 \%)$$

Die zum Versagen führende Scherspannung im Grenzbereich von Leimfuge 1 und dem Nadelholz, folgte aus:

$$\sigma = \frac{F_{gl1}}{A_{gl}} = \frac{27,6 \text{ kN}}{193,6 \text{ cm}^2} = 1,4 \text{ MPa}$$

Dieser Wert liegt bereits deutlich über der zulässigen Querzugfestigkeit von Holz (0,5 MPa), was das Versagen des Holzes erklärt.

#### 8.4.3.3 Fazit

Der Versuch machte drei wichtige Punkte deutlich:

1. Das Versagen trat aufgrund von Querzugversagen des Holzes ein. Zugspannungen quer zur Holzfaser sind enorm ungünstig und beschränken die Tragfähigkeit unnötig. In weiteren Versuchen sollte deshalb darauf geachtet werden, die Holzfasern axial mit Zug zu beanspruchen.
2. Der Kontaktbereich der Bambusdruckstäbe mit dem Auflagerholz ließ die festen Bambusfasern in die weiche und schwache Achse des Holzes drücken. Es sollte angestrebt werden, jeweils das Hirnholz von Bambus und Holz aufeinandertreffen zu lassen, um solche Schwachpunkte zu vermeiden.
3. Der Prüfkörper wies bei vergleichbarem Bambuseinsatz eine größere Steifigkeit als seine Vorgänger auf. Die Aussagefähigkeit bezüglich der Verformung ist bei diesem Versuch jedoch eingeschränkt, weil vor allem das seitliche Herausquellen des Sandes für das Absinken der Bauteiloberkante verantwortlich war. Da dies ein Problem der Flanken darstellt, dürfte es bei einem Bauteil mit größerer Breitenausdehnung entsprechend weniger relevant sein. Dessen ungeachtet sollte eine einfache und formstabile Füllung verwendet werden, die unter vertikalem Druck nicht zu den Seiten herausgepresst wird. Denkbar wäre die Verwendung von geschlossenen Sandsäcken.

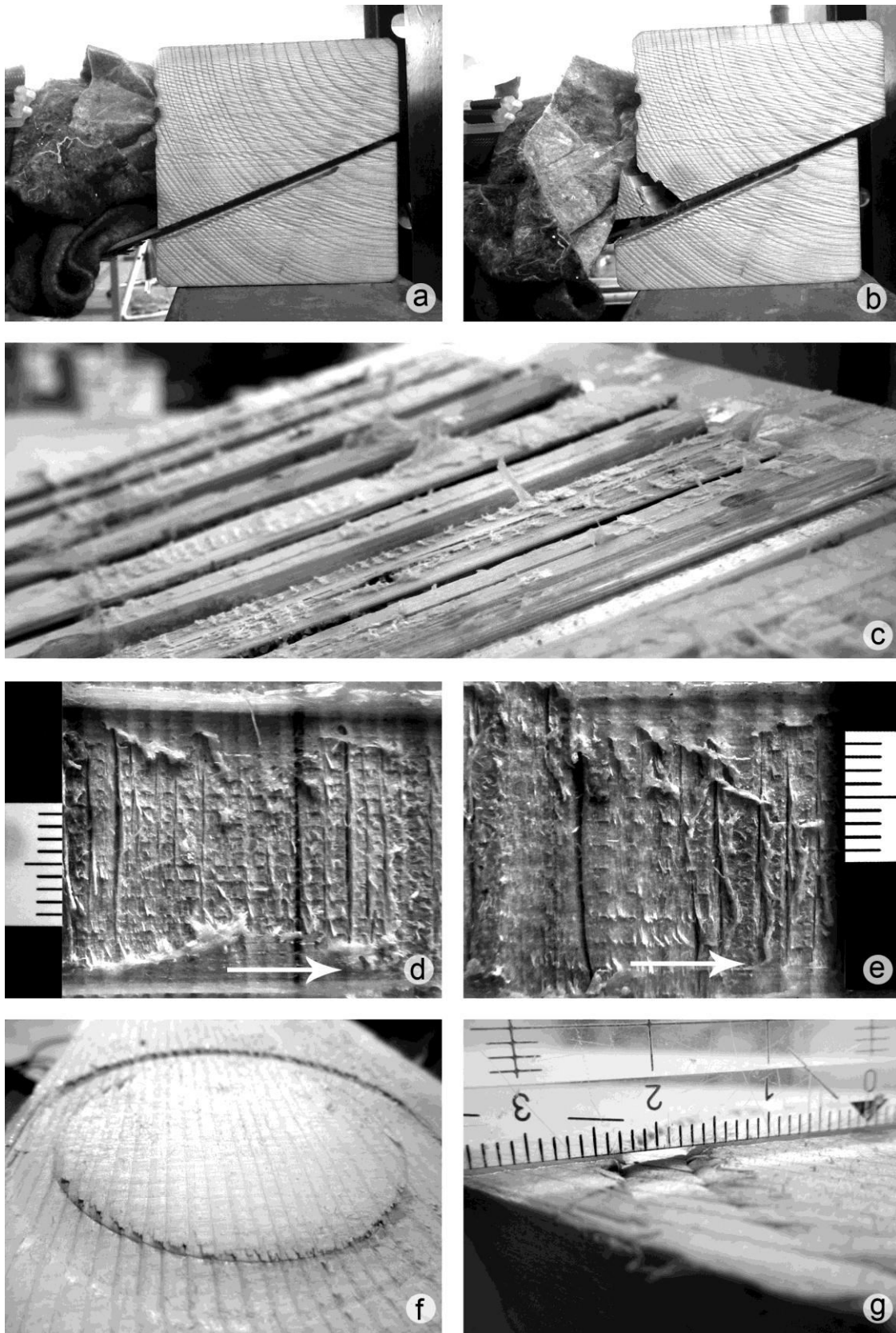


Abb. 118: Schadensanalyse von PK230-U. a) Auflager B vor dem Belastungstest. b) Auflager B nach dem Belastungstest. Deutlich ist das Abscheren der oberen Hälfte des Auflagerholzes zu sehen (Pfeil). c) Bambusstreifen mit anhaftenden Holzfasern im Leim. d), e) Zugversagen quer zur Holzfaser: oberes Auflagerholz mit herausgerissenen Holzfasern. Faserrichtung verläuft orthogonal zur Richtung der Zugkraft (Pfeil). f), g) Druckversagen quer zur Holzfaser, 2 mm tiefer Abdruck der Bambusdruckstäbe.

## 8.5 Leimverbindung zweiseitig PK-GL2

Beim Versuch PK230-U zeigte sich das große Potenzial der neuen Konstruktionsweise: Trotz größerer Steifigkeit und Tragfähigkeit, war beim Versagen des Einfeldträgers der Schaden nicht vom Bambus ausgegangen. Versagt hatte das Holz im Kontakt zur Leimfuge. Diese Tatsache war zu begrüßen, da sie die Festigkeitsgrenzen des besser erforschten Werkstoffs Nadelholz betraf. Im nächsten Schritt sollte die bekannte Schwäche von Holz hinsichtlich Querkzug vermieden und die Kraft in Richtung der Holzfasern eingeleitet werden.

### 8.5.1 Zielsetzung

Ziel war es, das Zusammenwirken der beteiligten Komponenten (Holz, Leim und Bambus) im Bereich der Leimfuge genauer zu untersuchen und die wirksamen Versagens-Prinzipien genauer zu benennen. Folgende vier Versagens-Prinzipien waren denkbar (Abb. 119):

- Das Holz versagt im Kontakt zur Leimfuge (Scherfestigkeit des Holzes).
- Der Bambus versagt im Kontakt zur Leimfuge (Scherfestigkeit des Bambusstreifens).
- Der Leim versagt (Scherfestigkeit des Leims).
- Der Bambusstreifen reißt ab (Zugfestigkeit des Bambusstreifens).

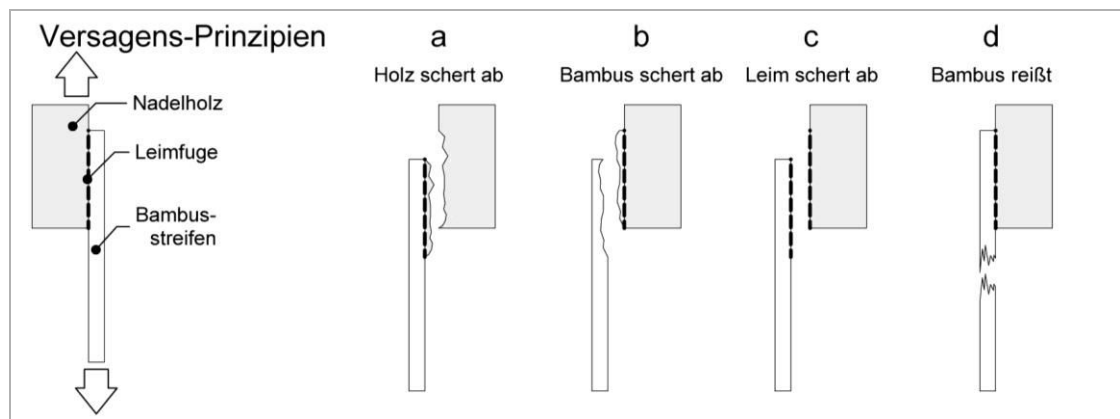


Abb. 119: Mögliche Arten des Versagens im Bereich der Leimfuge.

### 8.5.2 Beschreibung

Für den Versuch wurden 20 Bambusstreifen von 50 cm Länge und 2 cm Breite an jeweils einem Ende auf Außen- und Innenseite geebnet. Auf die geebneten Flächen wurden anschließend kleine Nadelholz-Quader von 3 x 3 x 5 cm mit unterschiedlicher Faserausrichtung geleimt. Die Leimfläche betrug 2 x 5 cm, sodass bei beidseitiger Verleimung insgesamt 20 cm<sup>2</sup> Leimfuge vorhanden waren. Verwendet wurde ein Weißleim auf PVA-Basis. Die Prüfkörper wurden entsprechend der Faserrichtung, mit der die Nadelholz-Quader an die Bambusstreifen geleimt wurden, in zwei Gruppen eingeteilt (Abb. 120):

- PK-GL2-90:** Holzfasern streifen die Leimfuge, Scherkraft quer zur Faser.
- PK-GL2-22:** Holzfasern laufen spiegelbildlich im Winkel von 22° spitz auf die Leimfuge zu, Scherkraft spitzwinklig zu den Faserenden.

Jede Gruppe bestand aus zehn Bambusstreifen mit je zwei angeleimten Hölzern.

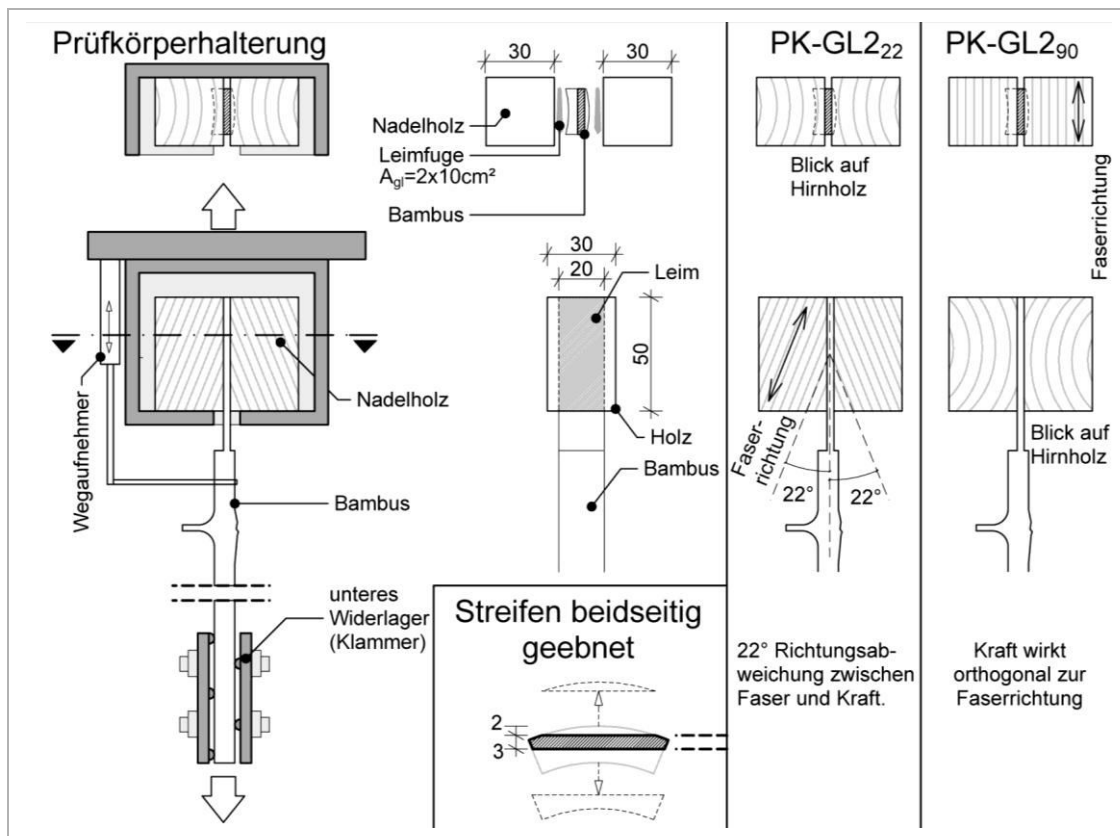


Abb. 120: Versuchsreihe PK-GL2 (Leimverbindung zweischnittig), Streifen beidseitig geebnet.

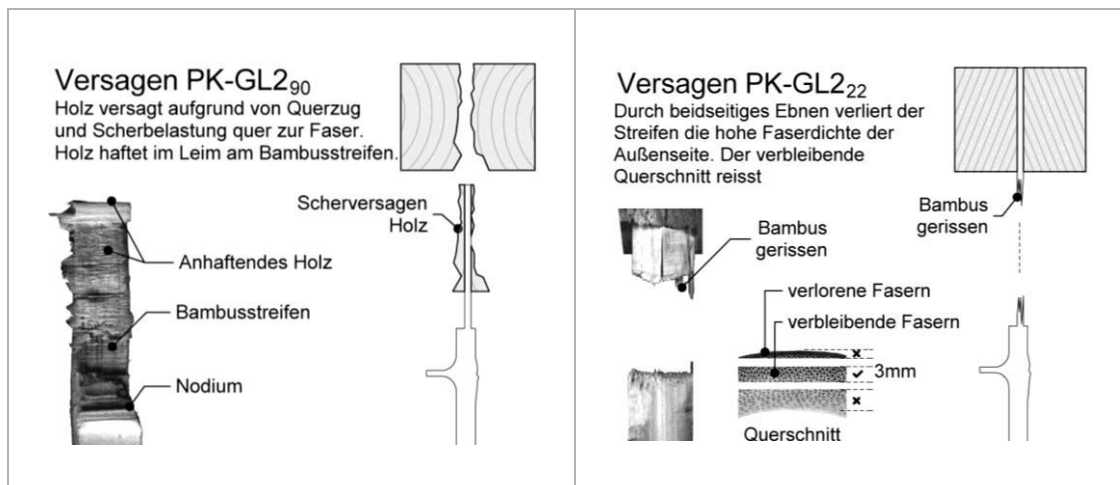


Abb. 121: PK-GL2-90 zeigt das Versagensprinzip „a“ (links). PK-GL2-22 zeigt das Versagensprinzip „d“ (rechts).

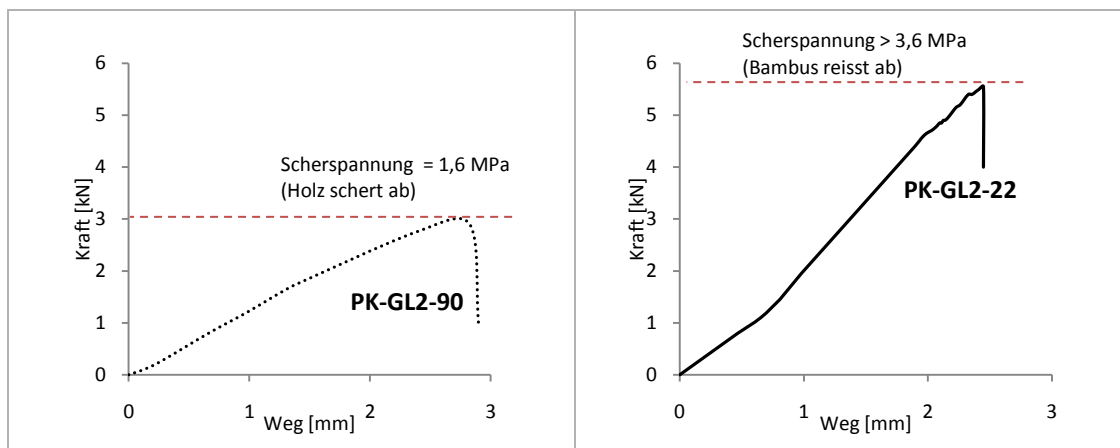


Abb. 122: Gegenüberstellung der Versuchsreihen PK-GL2-90 und PK-GL2-22 (Mittelwerte aus je zehn Kurven).

### 8.5.3 Belastungstest

Nach Aushärten des Leims wurden die Prüfkörper in einer Halterung positioniert und am unteren Ende des Bambusstreifens wurde eine Stahlklaue als Widerlager angeschraubt. Deutlich zu erkennen war die stärkere Verformung der Versuchsreihe PK-GL2-90 gegenüber der Reihe PK-GL2-22 bei gleicher Last. Die beobachtete Verformung ist das Ergebnis einer Überlagerung von:

1. Leim-Elastizität
2. Holz-Streckung/Stauchung,
3. Bambus-Streckung

Die zwei Gruppen von Prüfkörpern zeigten jeweils sehr typische Arten des Versagens:

#### 8.5.3.1 PK-GL2-90

Bei dieser Gruppe von Prüfkörpern versagte stets das Holz quer zur Faser im Kontakt zur Leimfuge. Der Bambusstreifen wurde herausgezogen, an den Leimflächen hafteten die herausgerissenen Fasern des Nadelholzes (ähnlich wie bei PK230-U). Das Versagen trat mit großer Regelmäßigkeit im Mittel bei 3,2 kN ein. Die Scherfläche betrug  $A_S = 20 \text{ cm}^2$ . Die Bruchspannung des Holzes quer zur Faser betrug dabei:  $\sigma_{v,90} = 1,6 \text{ MPa}$ . Das beobachtete Versagensprinzip entsprach dem vom PK230-U. In der Einzelbetrachtung konnte die Größenordnung der Bruchspannung bestätigt werden. Die für Nadelholz zulässige Zugspannung quer zur Faser 0,5 MPa war dabei wiederum deutlich überschritten.

#### 8.5.3.2 PK-GL2-22

Die Bruchlast trat mit einer höheren Streuung zwischen 5,5 kN und 7,2 kN auf. Hier zeigte sich ein anderes Versagensprinzip: Die Bambusstreifen rissen kurz hinter der Leimfuge im Bereich der geebneten Innen- und Außenseite ab.

Der Querschnitt des Streifens war hier durch das Abtragen von Innen- und Außenseite reduziert und es war lediglich eine Restquerschnittsfläche der mittleren Halmwandzone vorhanden von:  $A_\emptyset = 20 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} = 60 \text{ mm}^2$ . Demzufolge lag die Bruchspannung der mittleren Halmwandzone des Bambusstreifens bei:  $\sigma_{t,0} = 91 \text{ MPa}$ . Weil das Holz in dieser Faserrichtung nicht versagte, musste eine Scherfestigkeit von  $\sigma_{v,22} > 3,60 \text{ MPa}$  vorhanden sein. In dieser Kombination versagte der Bambus vor dem Holz. Die entscheidende Schwächung des Bambusstreifens war nicht primär durch die Reduzierung der Querschnittsfläche geschehen, sondern vor allem durch das Entfernen der hochfesten Außenzone beim *beidseitigen* Ebnen.

#### 8.5.3.3 Fazit

Auch wenn die tatsächliche Festigkeit der Leimverbindung nicht ermittelt werden konnte, da der geschwächte Bambusstreifen zuvor abbrach, machte die Versuchsreihe zwei wichtige Punkte deutlich:

- ⇒ *die Fasern der Halm-Außenzone sind für die Zugfestigkeit eines Bambusstreifens unersetzlich. Das Entfernen von nur 2 mm der Außenhaut schädigte die Struktur deutlich. In den weiteren Konstruktionsvorschlägen sollte dieser Bereich der Halmwand daher stets erhalten bleiben.*
- ⇒ *die Ausrichtung der Holzfasern zur Leimfuge spielte wie erwartet eine wichtige Rolle. Quer zur Faserrichtung versagte das Holz bedeutend schneller.*

## 8.6 Leimverbindung einseitig PK-GL1

### 8.6.1 Zielsetzung

Im vorhergehenden Versuch (PK-GL2) war der geschwächte Bambusstreifen frühzeitig gerissen, die Leimverbindung konnte deswegen nicht bis zum Scherversagen belastet werden. Daher sollte in einem weiteren Versuch die Festigkeit der Leimverbindung von Bambus und Nadelholz untersucht werden. Die Bambusspalten wurden in dieser Versuchsreihe nur innen-seitig geebnet, wodurch die festen Fasern der Außenseite an der Verbindung mitwirken konnten.

### 8.6.2 Beschreibung

Zur Feststellung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Holzfaserrichtung wurden 20 Prüfkörper vorbereitet. Die Prüfkörper wurden in zwei Gruppen von je zehn Stück unterteilt:

1. **PK-GL1-90** Holzfasern streifen die Leimfläche, die Kraft wirkt im Winkel von 90°.
2. **PK-GL1-16** Holzfasern und Leimfuge stehen im Winkel von 16° zueinander.

Die Bambusstreifen hatten eine Länge von 50 cm und waren im Bereich der Leimfuge auf 2cm Breite einheitlich zugeschnitten. Über 9 cm Länge waren sie an die Nadelholzklotzchen geleimt, sodass die Größe der Leimfuge jeweils 18 cm<sup>2</sup> betrug. Die Prüfkörper wurden mit dem Holzklotzchen in einer Halterung eingehängt, die sie gegen ein Umkippen bei der asymmetrischen Belastung sicherten. Am unteren Ende wurden die Streifen mittels einer Stahlklammer gehalten (Abb. 123).

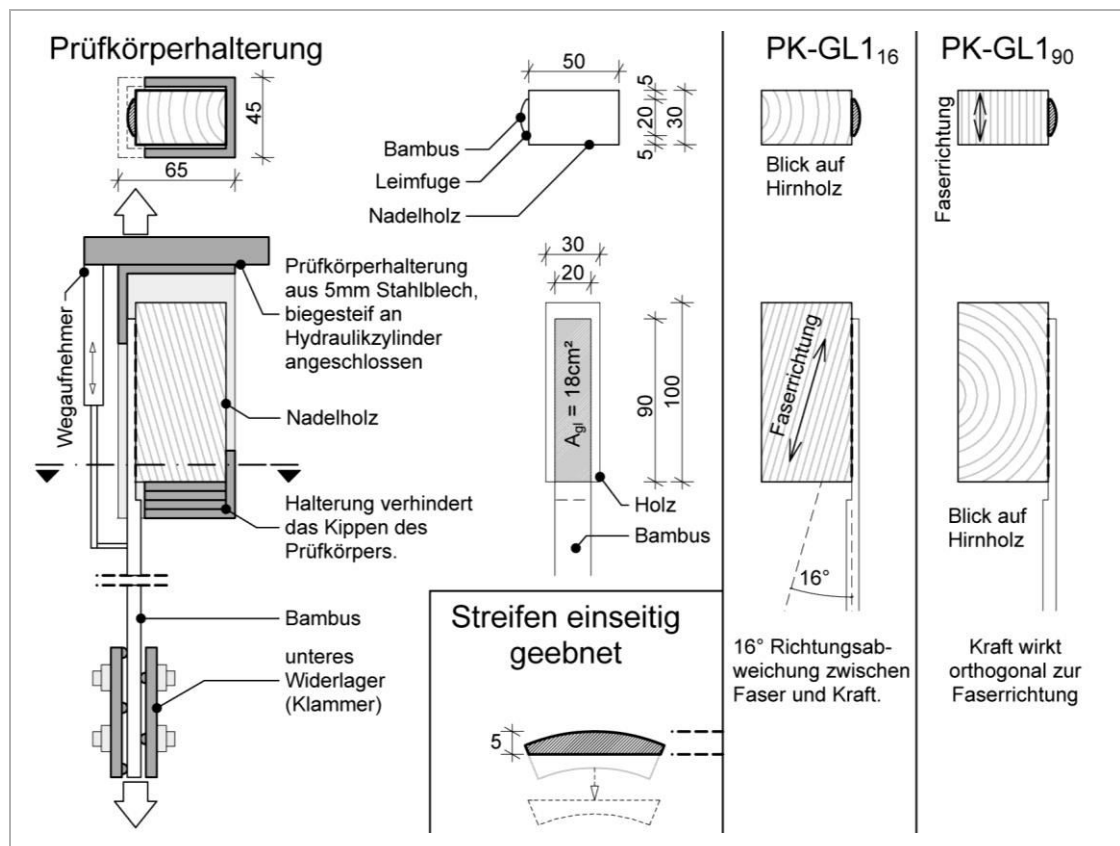


Abb. 123: Versuchsreihe PK-GL1 mit einseitiger Leimverbindung. Zwei unterschiedliche Ausrichtungen der Holzfasern zur Leimfuge wurden untersucht.

### 8.6.3 Belastungstest

Die zwei Prüfkörper-Gruppen zeigten sehr spezifische Bruchlasten und Arten des Versagens.

#### 8.6.3.1 PK-GL1-90

Die Scherkraft wirkte bei dieser Gruppe von Prüfkörpern orthogonal zur Faserrichtung und erreichte im Mittel 4,0 kN, bevor das Holz versagte. Holzfasern rissen mit dem Leim aus dem Holzklötzchen heraus und hafteten am unbeschädigten Bambusstreifen. Zum Teil riss das Holz jedoch auch tiefer. Dabei verliefen die Risse parallel zu den Markstrahlen und versprangen an den Jahresringen. Die Schwäche des Holzes quer zur Faser (besonders tangential) wurde deutlich. Die Scherfläche hatte eine Größe von  $A_s = 18 \text{ cm}^2$ . Es ergab sich eine Bruchspannung des Holzes quer zur Faser von:  $\sigma_{v,90} = 2,2 \text{ MPa}$ . Die Verformung ging beim vorübergehenden Absetzen der Last nicht mehr in den Ursprungszustand zurück. Ein allmähliches Versagen trat schon bei etwa der Hälfte der Bruchlast ein.

#### 8.6.3.2 PK-GL1-16

Bei dieser Gruppe von Prüfkörpern zeigte sich ein kombiniertes Versagen von Leimfuge und Holz quer zur Faser. Der Bambusstreifen wurde aus der Leimfuge herausgezogen, am Bambusstreifen haftete ein Holz-Keil an, der sich von dem Holzquader gelöst hatte. Der Riss lief parallel zur Faser (Querzugversagen). Das Versagen trat bei 10,5 kN bis 13,5 kN ein. Die Größe der Scherfläche betrug ebenfalls  $A_s = 18 \text{ cm}^2$ . Die Scherspannung in der Fuge betrug dabei  $\sigma_{v,16} = 5,8 \text{ MPa}$ .

Der einseitig geebnete Bambusstreifen war 5 mm dick. Aufgrund der Außenrundung verringerte sich diese Wanddicke jedoch zu den Flanken des 20 mm breiten Streifens, sodass effektiv nur 4,5 mm Streifendicke zur Verfügung standen. Die Querschnittsfläche des Bambusstreifens betrug somit:  $A_\emptyset = 90 \text{ mm}^2$ .

Für die Zugfestigkeit des Bambusstreifens mit ungestörter Halmaußenzone folgte daraus:  $f_{t,0} > 150 \text{ MPa}$ .

#### 8.6.3.3 Fazit

Auch wenn die tatsächliche Festigkeit des Bambusstreifens nicht ermittelt werden konnte, da Holz und Leim zuvor versagten, verdeutlichte die Versuchsreihe dennoch folgende Punkte:

- ⇒ *Das Erhalten der äußeren Halmzonen hatte für eine deutliche Verbesserung der Tragfähigkeit gesorgt. Bei einer herrschenden Zugspannung von 150 MPa versagte der Bambusstreifen nicht.*
- ⇒ *Die Ausrichtung der Holzfasern zur Leimfuge war von besonderer Bedeutung, wie die Gegenüberstellung der beiden Versuchsreihen zeigte (ähnlich wie bei PK-GL2).*
- ⇒ *Die Verformung bei PK-GL1-90 zeigte sich deutlich plastisch. Nach Absetzen der Last kehrt die Verformung nicht in die Ausgangsposition zurück.*

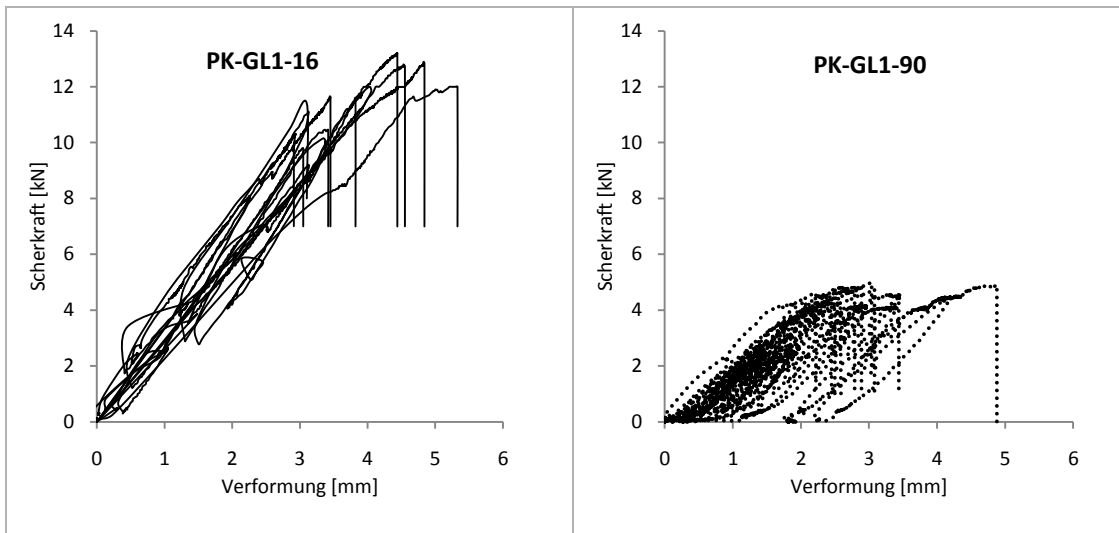


Abb. 124: Gegenüberstellung der Messergebnisse der beiden Prüfkörper-Gruppen.

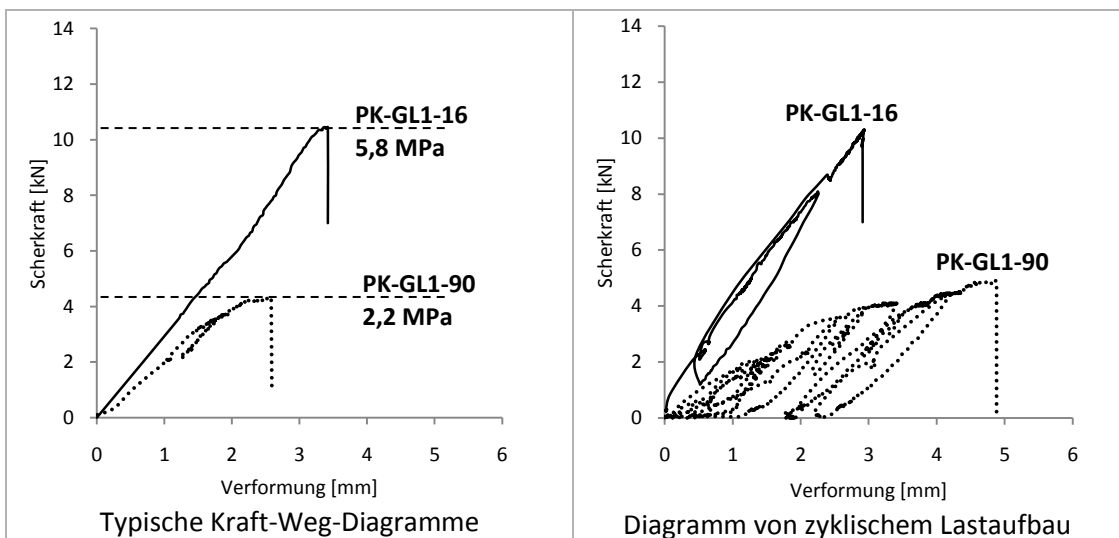


Abb. 125. Die Bruchspannung der Verbindung war bei PK-GL1-16 doppelt so hoch wie bei PK-GL1-90 (links). Bei Lastwechseln zeigte sich das plastische Versagen bei PK-GL1-90 (rechts).

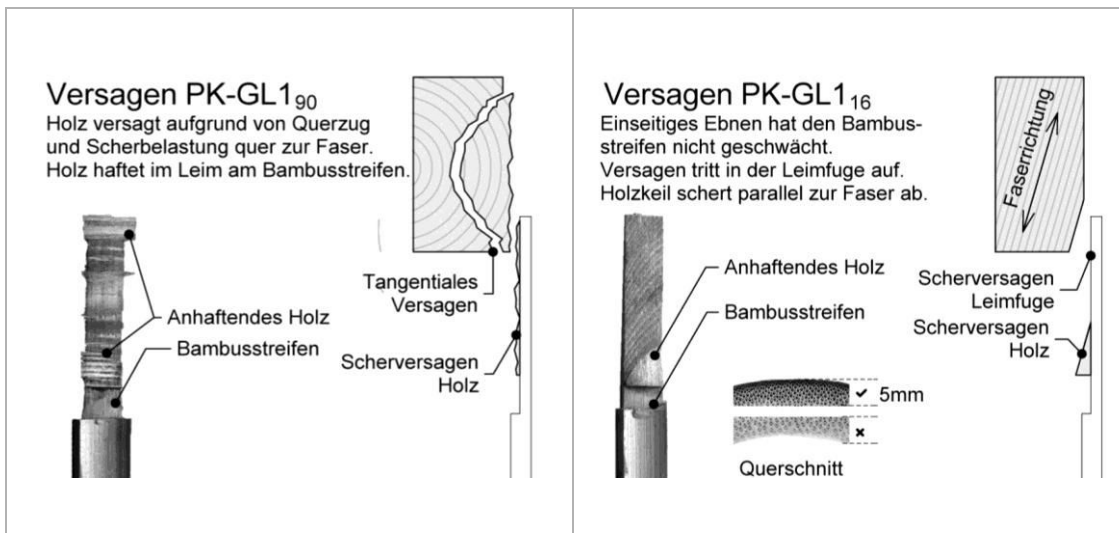


Abb. 126: PK-GL1-90 zeigt Versagensprinzip „a“ (links). PK-GL1-16 zeigt ein kombiniertes Versagensprinzip von „a“ und „c“ (rechts).



## 8.7 Deckenprüfkörper PK375-U

Durch einen Forschungsaufenthalt am *Ethiopian Institute of Architecture Building Construction and City Development* (EiABC) in Addis Abeba, Äthiopien ergab sich im Herbst 2014 die Möglichkeit, einen größeren Deckenprüfkörper zu testen.

### 8.7.1 Zielsetzung

Anhand der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Versuchen sollten bei diesem Deckenprüfkörper folgende Veränderungen vorgenommen werden:

- Die Spannweite sollte auf 3,75 m erhöht werden.
- Die Breite sollte auf 1 m vergrößert werden, um den Flanken-Effekt zu reduzieren.
- Der Stich in Feldmitte sollte auf 1/15 der Länge (= 25 cm) reduziert werden.
- Zur Vermeidung von Querszugbeanspruchung der Auflagerhölzer sollten Faserrichtung von Halm und Auflagerholz gleich gerichtet sein.
- Die Bambus Druckstäbe sollten mit den Auflagerklötzen Hirnholz-Kontakt haben, um die Querpressung der Holzfasern zu vermeiden.
- Die Bambusstreifen sollten nur innenseitig geebnet werden, um die hochfesten Fasern der Außenzone zu erhalten. Die Außenrundung sollte nur leicht angeschliffen werden, um eine Mindesthaftung des Leims zu ermöglichen. Orientierung der größeren Leimfläche der geebneten Streifen-Innenseite zur oberen Leimfuge in Erwartung betragsmäßig größerer Scherspannung.
- Als Füllkörper sollten Sandsäcke verwendet werden, um das seitliche Herausquellen der eingefüllten Schüttung zu vermeiden.

Die Belastung sollte als halbseitige sowie vollflächige Nutzlast wirken. Der Prüfkörper sollte hinsichtlich der Verformung unter verschiedenen Laststellungen betrachtet werden.

### 8.7.2 Beschreibung

PK375-U hatte eine Spannweite von 375 cm und eine Breite von 100 cm. Der mittige Stich betrug 1/15 der Spannweite (25 cm). 12 Bambushalme wurden als Druckstäbe verwendet, die im Mittel Querschnitte von 80/9 aufwiesen. 24 Bambusstreifen kamen als Unterspannung zum Einsatz.

Mittels eines „Splitters“ wurden vier Bambushalme (Querschnitt ca. 70/8) in jeweils 6 Streifen gespalten. An den Enden der Streifen wurde die Innenseite mit einer Kreissäge abgetragen und über eine Länge von 17 cm entfernt (Abb. 130). Die verbleibende Streifendicke betrug 5 mm. Die runde Außenseite der Halme wurde leicht angeschliffen, um die glatte und hydrophobe Außenhaut (Cortex) zu entfernen. Dies sollte die Leimhaftung der unteren Leimfuge fördern. Je Auflagerklotz wurden zwei Bambusstreifen angeleimt, um einen gleichmäßigen Anpressdruck beim Verleimen zu ermöglichen.

Abgesehen von den größeren Abmessungen des Deckenprüfkörpers erfolgte die eigentliche Veränderung an den Auflagern. Die Orientierung der Fasern von Bambus-Druckstäben und Auflagerhölzern sollte gleich gerichtet sein, um Hirnholzkontakt mit den Faserenden zu ermöglichen. Hierdurch benötigten die Auflagerhölzer jedoch eine zusätzliche Halterung, um nicht in einzelne Klötze zu zerfallen. Zu diesem Zweck wurde eine Latte quer über die Klötze jedes Auflagers geleimt.

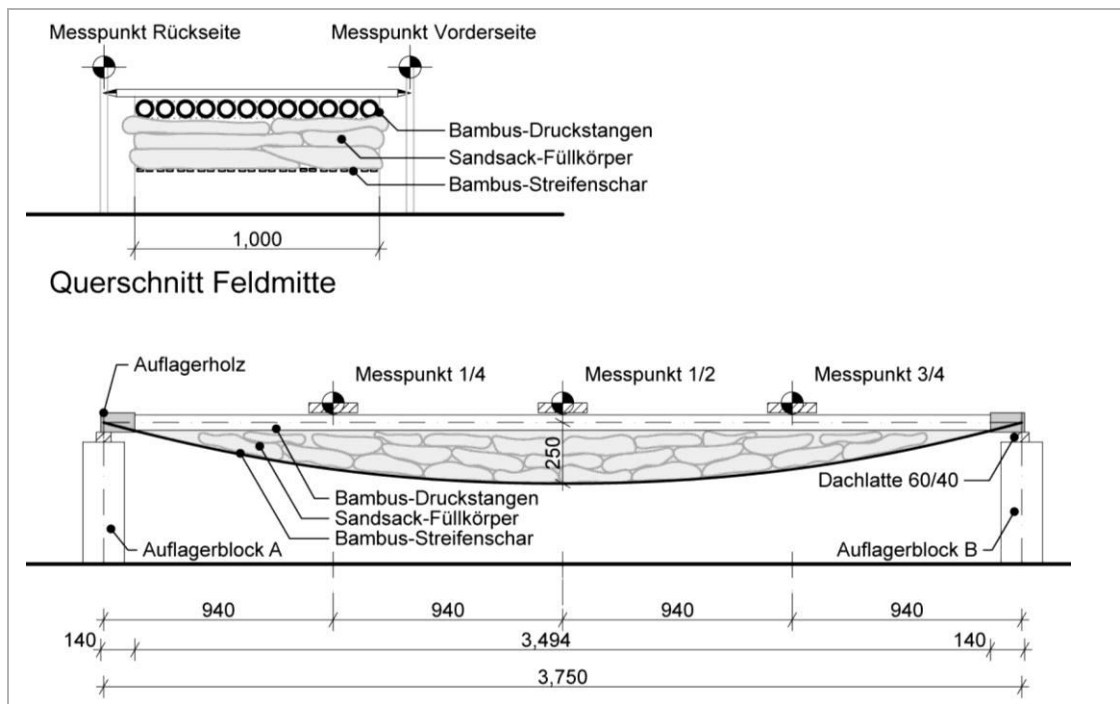


Abb. 127: Aufbau des Deckenprüfkörpers PK375-U.

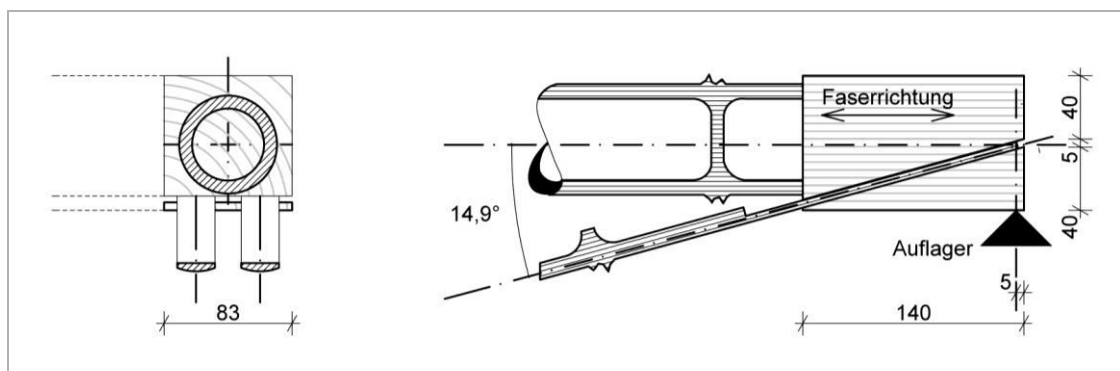


Abb. 128: Geometrie am Auflager. Hirnholzkontakt von Auflagerhölzern und Bambusdruckstäben.

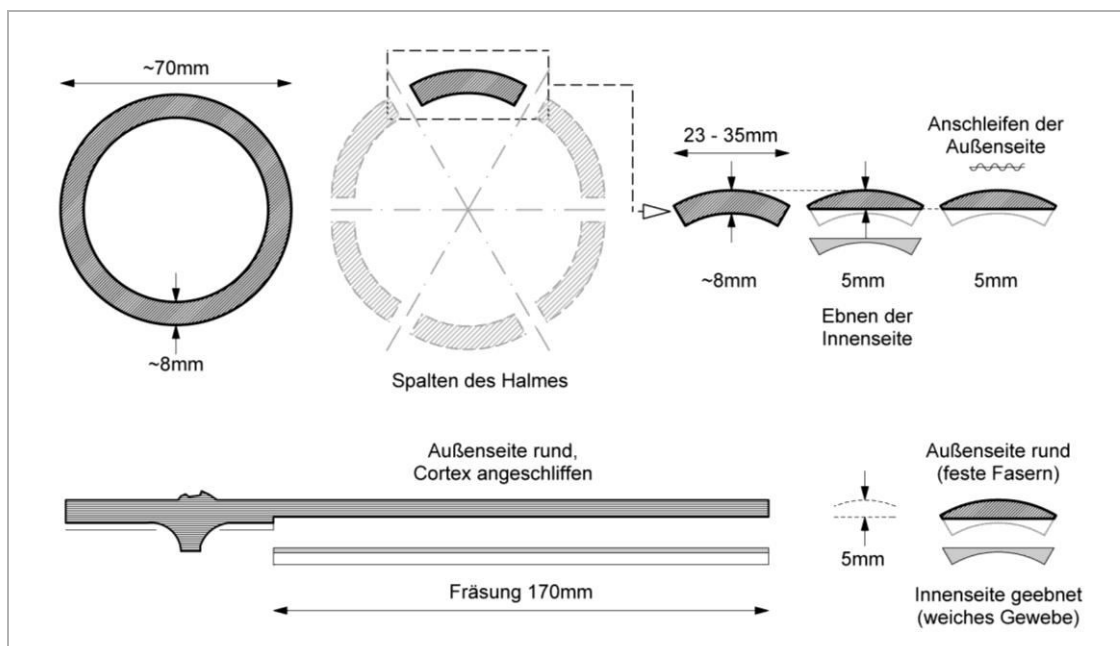


Abb. 129: Spalten der Halme in Streifen. Ebenen der Innenseite und Anschleifen der Außenhaut. Die verbleibenden Restdicken der Streifenenden beträgt 5 mm. Die hochfesten Fasern der Außenseite bleiben erhalten.

Durch den geringeren Stich in Feldmitte änderten sich am Auflager zudem folgende Bedingungen:

- Die Unterspannung hatte eine flachere Steigung am Auflager und erzeugte größere horizontale Auflagerreaktionen.
- Der Anteil der Seilkraft, welcher durch die obere Leimfuge übertragen werden musste, wurde durch die flachere Steigung noch größer. Die untere Leimfuge hingegen wurde weniger belastet.
- Die flachere Steigung der Unterspannung am Auflager hatte eine größere Länge der Auflagerhölzer zur Folge. Nur so konnten sich die Wirkungslinien von Unterspannung und Druckstäben über dem Auflagerpunkt schneiden.

Um dem seitlichen Herausdrängen der Schüttung zu begegnen, wurde mit geschlossenen Sandsäcken gearbeitet, die sich unter vertikaler Last selbst stabilisierten. Als Füllmaterial diente ein trockener und sehr steiniger Aushub, der vor Ort dem Boden entnommen wurde. Vor dem Einbringen der Sandsäcke mussten die Bambusdruckstäbe schon eingebaut sein, um ein Herabfallen der Streifenschar zu verhindern. Deshalb mussten die Sandsäcke zwischen Streifenschar und Bambusdruckstäben seitlich eingeschoben werden. Dies stellte bei einer Breite des Deckenprüfkörpers von 1,00 m einen merklichen Mehraufwand dar. Durch das seitliche Einzwängen der Sandsäcke konnte der Hohlraum zwischen Streifenschar und Bambusdruckstäben nicht vollständig bis unter die Bambusstäbe aufgefüllt werden, weshalb von oben zwischen den Bambusstäben weitere Schüttung lose eingefüllt und manuell verdichtet wurde.

### 8.7.3 Belastungstest

Aus Gründen der technischen Vereinfachung wurde bei diesem Belastungsversuch im Außenbereich auf ein hydraulisches Lastgeschirr verzichtet und stattdessen eine menschliche Nutzlast aufgebracht. 16 Studierende des *EiABC*, welche zuvor auf einer Personenwaage gewogen wurden, übernahmen diese Aufgabe (Tab. 10). An den Viertelpunkten und in Feldmitte wurden am Prüfkörper insgesamt sechs Messpunkte angebracht. Die Messpunkte waren so aufgebaut, dass ein am Prüfkörper befestigter Zeiger an einer auf dem Erdboden befestigten Millimeterskala eine Verformung anzeigte. Die Ausgangssituation wurde markiert und die Veränderung unter Last entsprechend abgelesen (Tab. 11).

	Bereich 0 – 94 cm	Bereich 94 – 188 cm	Bereich 188 – 282 cm	Bereich 282 – 375 cm
<b>1) Volllast</b> Flächenlast (Personen)	2,87 kN/m <sup>2</sup>	2,85 kN/m <sup>2</sup>	2,83 kN/m <sup>2</sup>	2,81 kN/m <sup>2</sup>
<b>2) Halbseitige Last</b> Flächenlast (Personen)	2,87 kN/m <sup>2</sup>	2,85 kN/m <sup>2</sup>	-	-

Tab. 10: Laststellung am PK375-U unter Volllast bzw. halbseitiger Laststellung.

	Messpunkt links (94 cm)	Messpunkt mittig (188 cm)	Messpunkt rechts (282 cm)
<b>1) Volllast</b>			
Vorderseite	2 mm	4 mm	3 mm
Rückseite	3 mm	4 mm	2 mm
<b>2) Halbseitige Last</b>			
Vorderseite	2 mm	1 mm	0 mm
Rückseite	3 mm	2 mm	0 mm

Tab. 11: Verformung des Feldes unter der jeweiligen Laststellung.

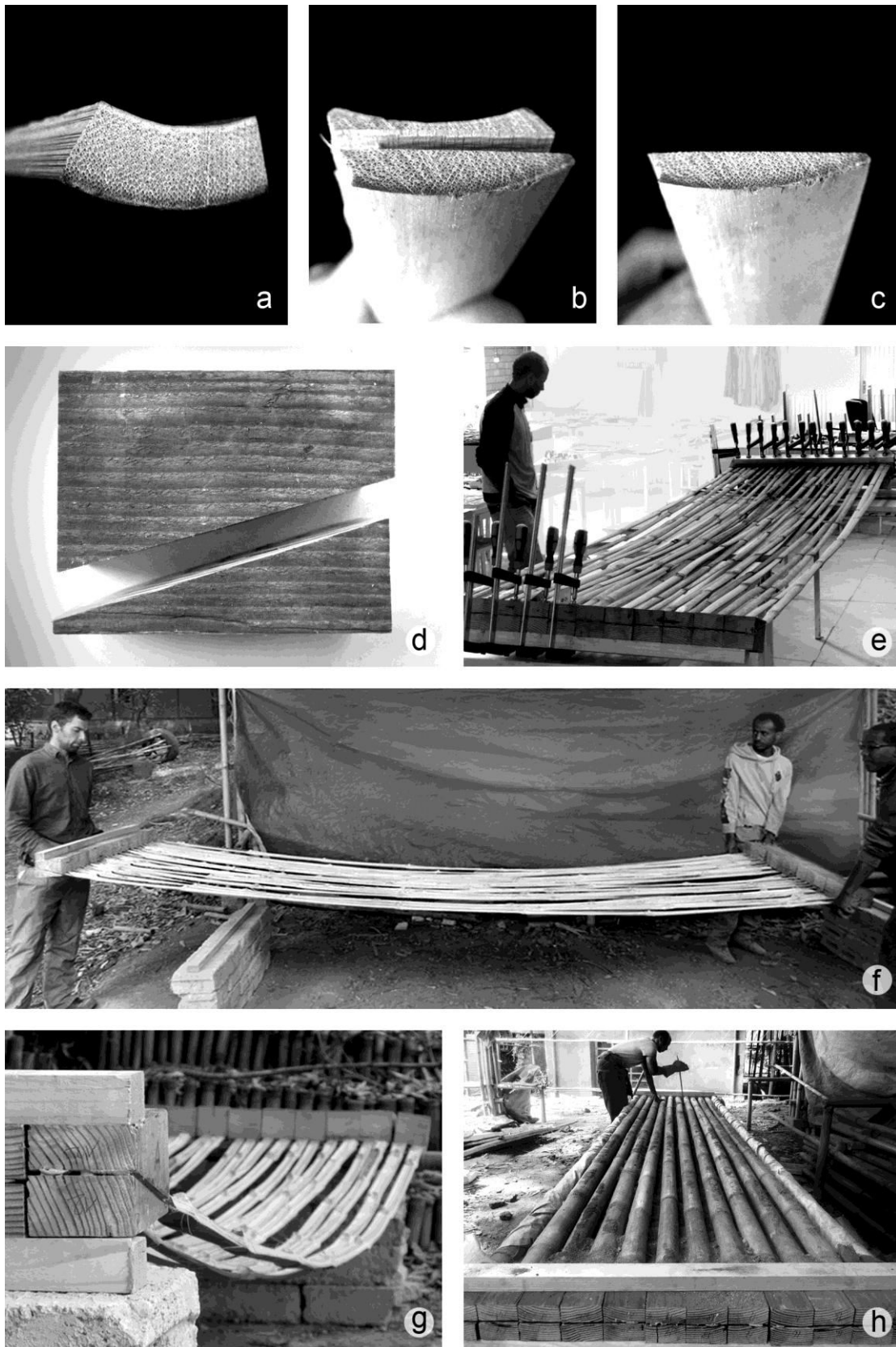


Abb. 130: Konstruktionsschritte des PK375-U. a) – c) Eben der Halmstreifen auf der Innenseite, verbleibende Streifenstärke: 5 mm. d) Auflagerholz von der Seite. e) Einleimen der Halmstreifen. f) Die Streifenschar wird auf die Auflager gelegt. g) Streifenschar mit einem planmäßigen Durchhang von  $1/15$  der Spannweite (25cm). h) Bambusstäbe und Sandsäcke sind eingelegt, Zwischenraum wird mit Sand aufgefüllt und manuell verdichtet.



Abb. 131: Belastungstest am PK375-U mit einer Nutzlast von  $2,84 \text{ kN/m}^2$ . Die Verformung in Feldmitte betrug dabei  $4 \text{ mm}$ , was einem Verhältnis zur Spannweite von  $1/940$  entspricht.

### 8.7.3.1 Fazit

Auch wenn dieser Versuch nicht bis an die Grenzen der Tragfähigkeit geführt wurde, konnte an dieser experimentellen Deckenkonstruktion doch wichtige Aspekte gezeigt werden:

Bei einer Nutzlast von  $p = 2,84 \text{ kN/m}^2$  betrug die maximale Verformung in Feldmitte lediglich  $4 \text{ mm}$  ( $f_{\max} = l/940$ ). Wenn eine linear-elastische Verformung des Deckenprüfkörpers unterstellt wird, könnte die Verformung bei einer Last von  $p = 5 \text{ kN/m}^2$  somit  $7,1 \text{ mm}$  gen ( $f_{\max} = l/528$ ). Die Gebrauchstauglichkeit wäre damit eindeutig gegeben.

Auch unter einseitiger Laststellung verformte sich die biegeeweiche Seilschar kaum. Bambusstäbe und Sandsack-Ballast wirkten hier stabilisierend entgegen. Die im Versuch PK230-U beobachtete seitliche Verdrängung der Sandschüttung konnte durch die Verwendung der geschlossenen Sandsäcke beim PK375-U vollständig verhindert werden, weshalb die Verformung stark begrenzt wurde. Die Füllung des Zwischenraums mit Sandsäcken war zwar formstabil, doch gestaltete sich das seitliche Einbringen als mühsam.

⇒ *Für die Füllung des Zwischenraums sollte angestrebt werden, leichtere und formstabile Füllelemente zu benutzen, welche von Hand einfach versetzt werden können.*

## 8.8 Deckenprüfkörper PK400-U

Der vorhergehende Versuch PK375-U hatte gezeigt, dass Fertigung und Steifigkeit der Konstruktion in hohem Maße den Ansprüchen der Zielsetzung entsprachen. In einem weiteren Versuch sollten nun Deckenprüfkörper bis zum Bruch belastet werden. Es wurden drei einzelne Prüfkörper getestet, die mit *PK400-U1*, *-U2* und *-U3* benannt wurden. Die Spannweite sollte auf 4,00 m erhöht werden, die statische Höhe (Abstand von Mittelachse Bambus-Druckstab und Bambustreifen) sollte in Feldmitte 26 cm ( $l/15$ ) betragen. Als Füllkörper sollten Leichtlehm-Formsteine eingelegt werden.

### 8.8.1 Zielsetzung

Bei den Versuchskörpern *PK400-U1* und *PK400-U2* bestand das Ziel darin, eine größtmögliche Tragfähigkeit und Steifigkeit zu erzeugen. Bei Versuchskörper *PK400-U3* sollten hingegen die Auswirkungen eines reduzierten Bambuseinsatzes und einer Belastung quer zur Holzfasern abgebildet werden.

### 8.8.2 Beschreibung

Bei PK400-U1 und PK400-U2 wurden die Auflagerhölzer mit der Faserrichtung parallel zu den Bambusdruckstäben angeordnet. Jeder der fünf Bambusdruckstäbe hatte somit an beiden Stabenden Hirnholzkontakt mit den Auflagerhölzern. Bei PK400-U3 waren trotz gleicher Bambustreifenanzahl, lediglich drei Druckstäbe eingebaut. Die Auflagerhölzer waren ähnlich dem PK230-U mit der Faserrichtung orthogonal zur Richtung der Bambusdruckstäbe angeordnet. Folglich drückten die Stirnflächen der drei Bambusdruckstäbe die Auflagerhölzer quer zur Faser, ebenso zogen die Bambustreifen quer zur Holzfasern (Abb. 132).

#### 8.8.2.1 Leichtlehm-Füllsteine

Die Erfahrungen der vorhergehenden Versuche (insbesondere PK375-U) berücksichtigend, war geplant, in dieser Versuchsreihe steife Formsteine zu verwenden, um den Bereich zwischen der Unterspannung und der Unterkante der Bambusdruckstäbe zu füllen. Die Wahl fiel auf luftgetrocknete Stroh-Lehmsteine, da sie unter dem Aspekt der Umweltfreundlichkeit von Baumaterialien hervorragende Eigenschaften besitzen. Die Materialien sind weltweit ohne großen Energieaufwand zu gewinnen, die massenhafte Herstellung gelingt auch ungelehrten Arbeitern. Zur Vereinfachung der Herstellung war vorgesehen lediglich zwei Schalformen zu verwenden, welche die planmäßige Seillinie der Unterspannung abbilden sollten. Beiderseits der mittleren Symmetrieachse sollten sich die Steinformate jeweils gespiegelt wiederholen (Abb. 133). Es war geplant, eine Stroh-Leichtlehmmischung zu verwenden, die eine Rohdichte von etwa  $10 \text{ kN/m}^3$  erreichen würde. Diese Rohdichte sollte eine gute Druckfestigkeit mit reduziertem Eigengewicht verbinden und die Nachteile der unhandlichen und schweren Sandsackfüllung verbessern. Die Steinbreite sollte maximal 10 cm betragen, um das vollständige Austrocknen nicht zu sehr zu behindern und somit einer Fäulnisbildung im Stroh vorzubeugen. Für die Herstellung von je 20 Steinen wurde eine Lehmmischung verwendet, die sich nach den von *Volhard* (29) angegebenen Richtwerten für schwere Mischungen ( $800 - 1200 \text{ kg/m}^3$ ) orientierte. Folgendes Mengenverhältnis wurde dabei verwendet:

- Lehmschlämme: 200 Liter (aus 250 kg Lehm, trocken + 80 Liter Wasser)
- Weizenstroh: 20 kg

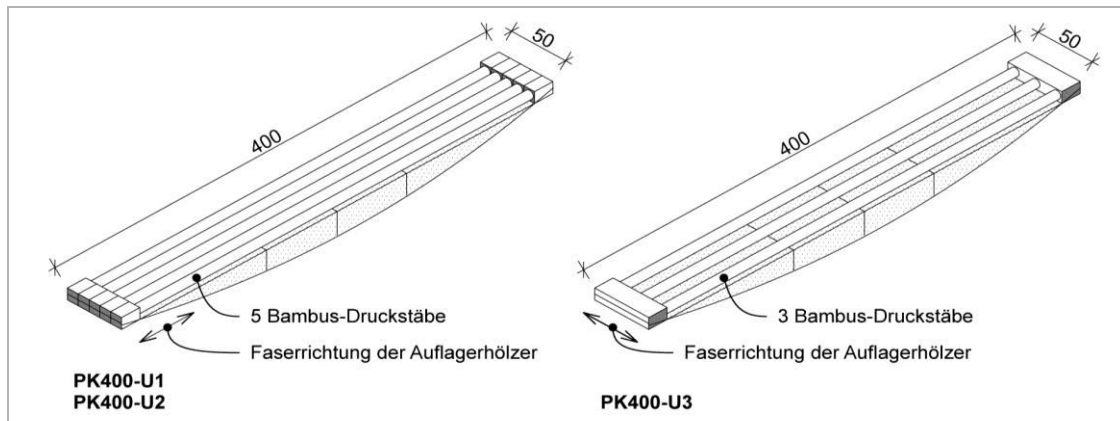


Abb. 132: Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Prüfkörperreihe PK400-U.

Prüfkörper	<i>PK400-U1</i>	<i>PK400-U2</i>	<i>PK400-U3</i>
Spannweite	400 cm	←	←
Breite	50 cm	←	←
Mittiger Stich	26 cm ( $l/15$ )	←	←
Bambusdruckstäbe	5 Stück 82/8; $l=368$ cm	←	3 Stück 82/8; $l=368$ cm
Stirnfläche Bambusstäbe	A: 94 cm <sup>2</sup> ; B: 96 cm <sup>2</sup>	A: 92 cm <sup>2</sup> ; B: 104 cm <sup>2</sup>	A: 63 cm <sup>2</sup> ; B: 57 cm <sup>2</sup>
Unterspannungen	10	←	←
Einleimtiefe	$a_{gl}=15,8$ cm	←	←
Leimfläche Auflager A	$A_{gl} = 347,6$ cm <sup>2</sup>	$A_{gl} = 372,9$ cm <sup>2</sup>	$A_{gl} = 355,5$ cm <sup>2</sup>
Leimfläche Auflager B	$A_{gl} = 357,1$ cm <sup>2</sup>	$A_{gl} = 404,5$ cm <sup>2</sup>	$A_{gl} = 360,2$ cm <sup>2</sup>
Auflagerhölzer	5 Einzelklötze	←	50 cm Keilbohle
Bambus-Holz-Orientierung	Parallel (Hirnholzkontakt)	←	Orthogonal
Bambusstab-Bettung	Sandschüttung; $G = 2,4$ kN	←	←
Füllkörper	20 Leichtlehmsteine = 2,8 kN	←	←

Tab. 12: Beschreibung der Reihe PK400 (Symbol "←" bedeutet "Wert entspricht linker Nachbarspalte").

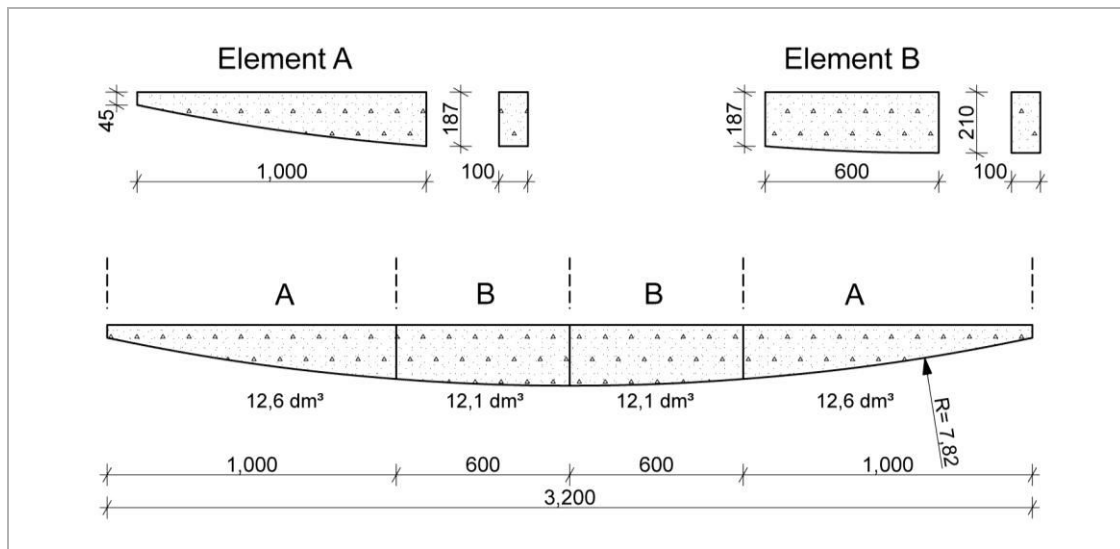


Abb. 133: Stroh-Leichtlehm Steine, zwei Element-Typen bilden die planmäßige Seillinie nach.

	Volumen je Stein	Anzahl der Steine	Gesamt-volumen	Rohdichte $\rho$	Gesamt-gewicht
	[m <sup>3</sup> /Stk.]	[Stk.]	[m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN]
Lehmsteine	0,014	20	0,28	10,0	$G_{Lehm} = 2,8$
Sandschüttung	(vollständige Halm-Einbettung)		0,17	14,5	$G_{Sand} = 2,4$

Tab. 13: Ermittlung des Eigengewichts von Lehmsteinen und Schüttung (zur Halmbettung) für einen Prüfkörper.

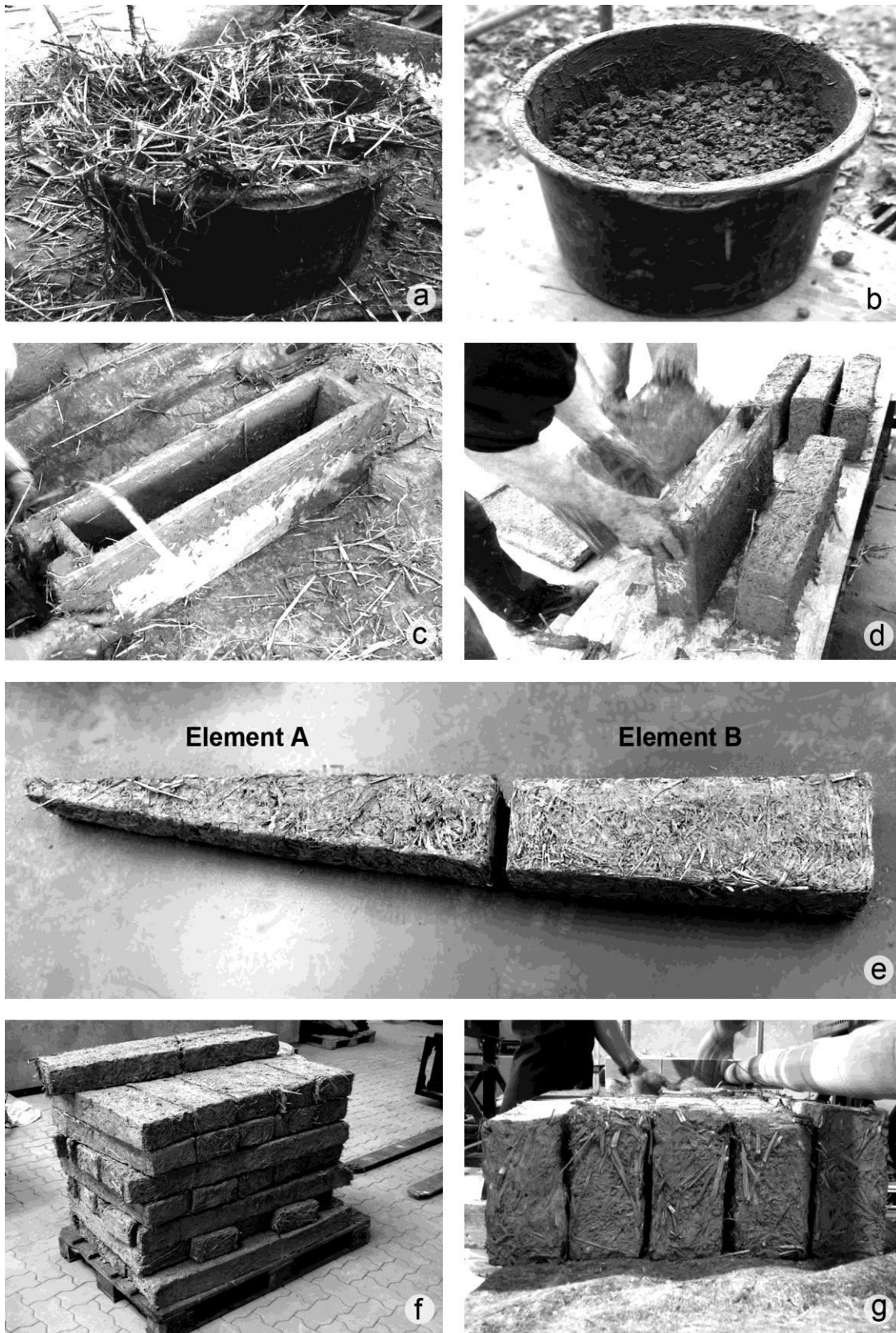


Abb. 134: Herstellung der Leichtlehm-Füllkörper. a) Weizenstroh. b) Lehm, vor dem Einschlämmen. c) Einfüllen des Stroh-Lehm-Gemischs in die Schalform. d) Ausschalen des verdichteten Gemischs. e) Seitenansicht der zwei Leichtlehm-Elemente. f) Fertige Decken-Füllkörper auf einer Palette. g) Einbau der längsgerichteten Stroh-Lehm-Steine unterhalb der Bambus-Druckstäbe.



Beim Einfüllen in die Schalung wurde das Gemenge mäßig verdichtet, und so ein Gesamtvolumen erreicht, das feucht bei 0,32 m<sup>3</sup> und trocken bei 0,28 m<sup>3</sup> lag. Nach dem Trocknen konnte an den Steinen die erwartete Rohdichte von durchschnittlich 10 kN/m<sup>3</sup> festgestellt werden. Da der verwendete Lehm einen sehr hohen Tonanteil aufwies und mit einer wasserreichen Lehmschlämme gearbeitet wurde, wurde ein Längenschwindmaß von 5 % veranschlagt. Die Schalung wurde unter dieser Annahme in jeder Richtung entsprechend größer gebaut.

Das tatsächliche Längenschwindmaß betrug jedoch lediglich 4 %, sodass die Steine am Ende der Trocknungsphase in allen Richtungen etwa 1 % größer waren als geplant. Weitere Abweichungen vom geplanten Maß entstanden dadurch, dass beim unvorsichtigen Ausschalen die Steine leicht deformiert wurden und anschließend in geringfügig falscher Form trockneten. Diese Formabweichungen konnten jedoch bis zu einem gewissen Grad als hinnehmbar angesehen werden, da das Material im Bedarfsfall leicht mit bloßen Händen bearbeitet werden konnte und eine ausgleichende Sandschüttung darauf aufgebracht werden sollte. Das Trocknen der Steine erfolgte über sechs Wochen.

#### **8.8.2.2 Bambusstreifen**

Zur Gewinnung der Bambusstreifen stand bei der Fertigung keine Spaltmaschine zur Verfügung, weshalb die Halme zunächst an den Nodien mit einem Stechbeitel eingeschlagen wurden, um das anschließende Auftrennen mit einem Messer zu erleichtern. An manchen Nodien kam es dabei zu leichten Versätzen zwischen den Spaltlinien, sie sich später an den Rändern der Bambusstreifen als Längssplitter entwickelten. Diese gesplitterten Ränder waren beim Versagen des PK400-U2 von gewisser Bedeutung (Abb. 143-d). Nach dem Spalten wurden die Halme an den Enden innenseitig geebnet und auf 5 mm Restdicke einheitlich abgetragen (Abb. 129).

#### **8.8.2.3 Auflagerhölzer**

Zur Herstellung der Auflager wurden Nadelholzbalken mit 10 x 10 cm Querschnitt verwendet. Für PK400-U1 und PK400-U2 wurden die trapezförmigen Auflagerklötze aus 16 cm langen Abschnitten hergestellt, welche in Holzfaserrichtung belastet werden sollten. Dafür wurden je Auflager fünf einzelne Holzklötze mit den zehn Bambusstreifen verleimt (Abb. 135).

PK400-U3 wurde hingegen mit nur einem 50 cm langen Kantholz je Auflager gefertigt, welches quer zur Faser belastet werden sollte. Zum einen sollte die Auswirkung der Faserrichtung auf Verformung und Tragverhalten genauer betrachtet werden, zum anderen sollte ein vereinfachtes Fügeprinzip mit reduziertem Bambusaufwand getestet werden. Es wurden hier nur drei Bambusdruckstäbe zwischen die Auflagerhölzer gelegt (Abb. 136).

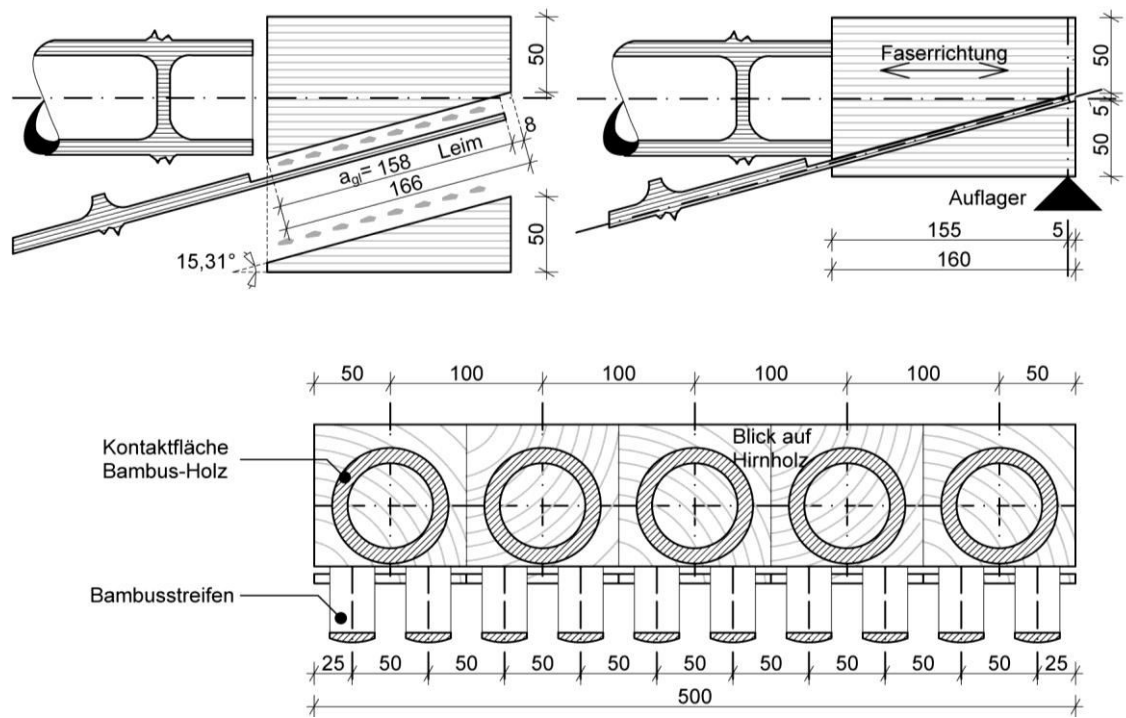


Abb. 135: PK400-U1 und PK400-U2 mit Längs- und Querschnitt am Auflager. Dargestellt sind fünf Auflagerklötze, fünf Bambus-Druckstäbe und zehn Bambusstreifen. Die Auflagerklötze und Bambus-Druckstäbe haben Hirnholzkontakt.

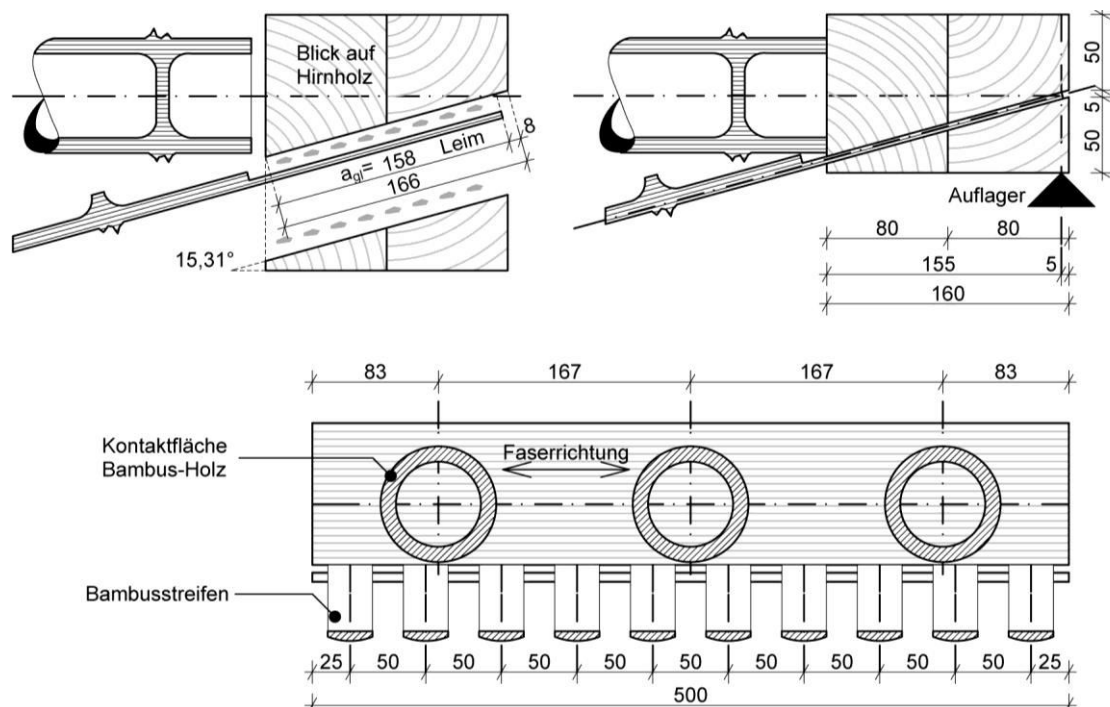


Abb. 136: PK400-U3 mit Längs- und Querschnitt am Auflager. Dargestellt sind ein Auflagerholz, drei Bambus-Druckstäbe und zehn Bambusstreifen. Das Auflagerholz erfährt Faserquerpressung durch die Bambus-Druckstäbe. Die Holzfasern in der Leimfuge werden quer zur Faser belastet.

#### 8.8.2.4 Aufbau

An den eingeleimten Bambusunterspannungen wurden hervorstehende Nodienreste der Halminnenseite abgetragen. Dies sollte den Leichtlehmsteinen eine möglichst ebene Auflage schaffen. An den Kontaktpunkten der Leichtlehmsteine wurde unter die Bambusstreifen eine temporäre Unterstützung gelegt und so das Einbringen der Füllsteine erleichtert. Weil die Unterspannung auf diese Weise noch nicht auf Zug belastet wurde, konnte auf ein Auseinanderspreizen der Auflagerhölzer verzichtet werden, die Bambusstäbe waren dem Befüllen also nicht im Wege. Um ein Hindurchfallen der länglichen und schmalen Leichtlehmsteine zu verhindern, wurde eine PE-Folie auf die Bambusstreifen aufgelegt. Dennoch war der Vorgang des Einlegens labil, da nicht immer sichergestellt war, dass die schmalen Steine stabil auf zwei Bambusstreifen lagerten. Durch Unebenheiten der vertikalen Kontaktflächen entstanden größere Fugen als erwartet und es ergab sich eine Gesamtbreite der fünf Lehmsteine nebeneinander von 54 cm. Sie ragte also rechts und links um jeweils 2 cm über die geplante Breite hinaus. Zwischen den Lehmsteinen bestanden unwesentliche Höhenunterschiede, vereinzelt jedoch ergaben sich bis zu 19 mm Differenz. Die fünf Längslagen der Lehmsteine wurden mit Spannband zusammengezogen und stellten anschließend ein stabiles Gesamtgefüge dar.

Die fünf Bambus-Druckstäbe wurden nun zwischen die Auflagerhölzer gelegt, sodass Bambus und Holz Stirnkontakt hatten. Weil sich die Durchmesser von dickem und dünnem Ende der Halme stark unterschieden ( $61 \text{ mm} < D < 102 \text{ mm}$ ), wurden die Halme in wechselnden Richtungen eingelegt, um im Obergurt eine gleichmäßigere Gesamtsteifigkeit zu erlangen. Mit Spannband wurden die Bambushalme mit den Leichtlehmsteinen und Bambusstreifen der Unterspannung verschnürt, um ein Ausknicken unter Druckbelastung zu verhindern.

#### 8.8.2.5 Prüfstand

Die Lasteinleitung erfolgte mittels eines Hydraulikzylinders, der mittig über dem Prüfkörper positioniert wurde. Da eine möglichst gleichmäßige und flächenhafte Lasteinleitung geplant war, wurde die Last mittels eines zweistufigen Verteilungsgeschirrs auf vier symmetrische Punkte (I bis IV) verteilt. Dazwischen bestand jeweils ein Abstand von 100 cm. Zwischen Stahlgeschirr und Bambusstäben wurde eine Ausgleichsschicht von jeweils zwei Sandsäcken und einer Baubohle eingebracht, die die einzeln angreifenden Punktlasten auf Flächen von jeweils  $35 \times 50 \text{ cm}$  ( $A = 1750 \text{ cm}^2$ ) verteilten (Abb. 137). Das Lastverteilungsgeschirr wurde an Drahtseilen gegen Absturz gesichert und bestand aus folgenden Elementen:

Bauteil	Länge [m]	Anzahl	[kN/m]	Gewicht [kN]
HEA 220 (Primär-Joch)	2,20	1	0,52	1,15
HEA 140 (Sekundär-Joche)	1,20	2	0,25	0,60
Walzenlager, Steifenbleche etc.				0,25
<b>Summe</b>				<b>2,00</b>

Tab. 14: Eigengewichtsermittlung des Lastverteilungsgeschirrs

Vor Beginn der Verformungsmessung wurde das Lastverteilungsgeschirr abgenommen, um die unbelastete Prüfkörperlage für die Wegaufnehmer als Ursprung zu referenzieren. Insgesamt wurden drei Wegaufnehmer an den Viertelpunkten des Feldes positioniert.

#### 8.8.3 Belastungstest

Die Prüfkörper wurden mit halbseitiger und kontinuierlicher Flächenlast getestet, um die Verformung in Abhängigkeit zur Laststellung zu untersuchen.

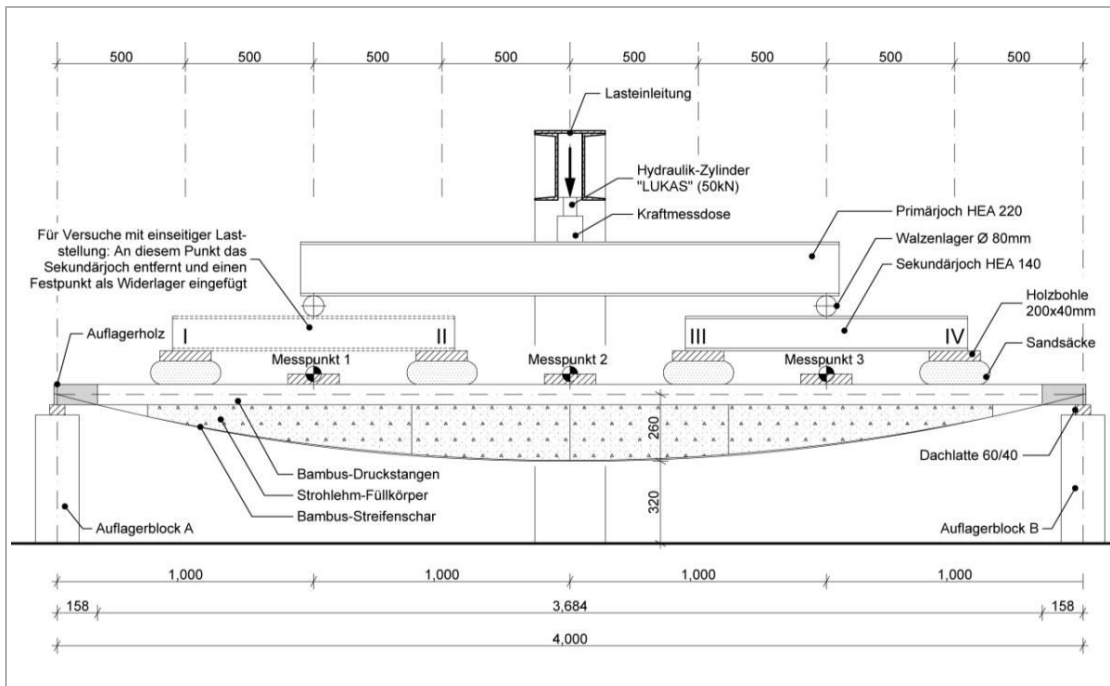


Abb. 137: Längsansicht des Versuchsaufbaus PK400-U. Prüfkörper mit Aufbau der Lasteinleitungs-Vorrichtung.

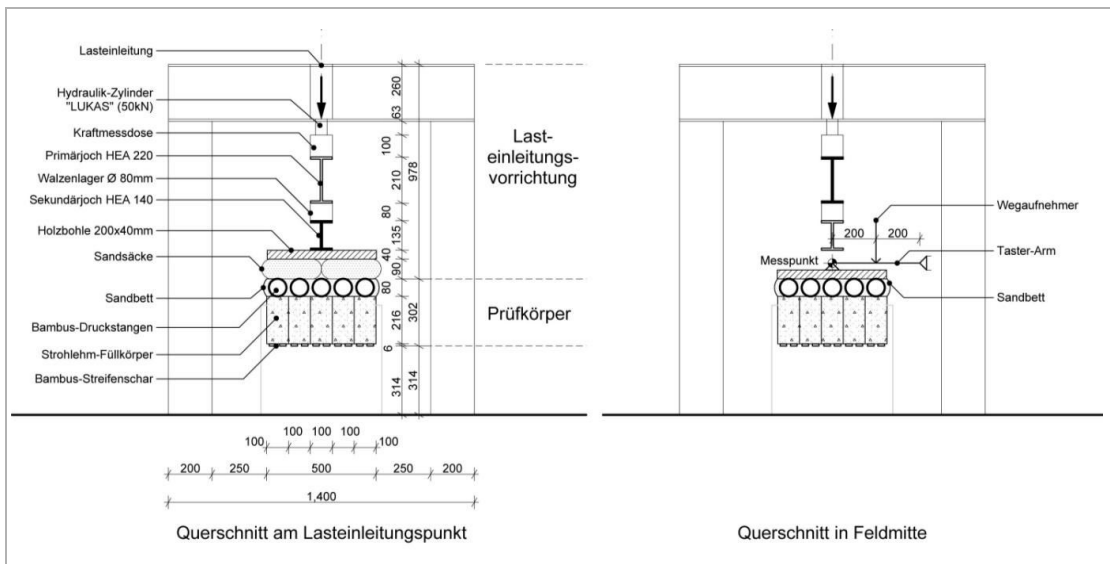


Abb. 138: Querschnitt des Versuchsaufbaus PK400-U.

### 8.8.3.1 Verformung unter Gleichstreckenlast

Bei 5 kN/m<sup>2</sup> vollflächiger Nutzlast betrug die Durchbiegung in Feldmitte bei allen Prüfkörpern weniger als  $l/300$  und erfüllte somit die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit. Alle Prüfkörper wurden unter voller Flächenlast zum Bruch geführt. Die Prüfkörper PK400-U1 ( $f = l/520$ ) und PK400-U2 ( $f = l/645$ ) wiesen bei gleicher Last eine um etwa 35% geringere Verformung auf, als PK400-U3 ( $f = l/435$ ). Eine Erklärung dafür kann die ungünstige Beanspruchung des Holzes quer zur Faser bei PK400-U3 geben (Abb. 139).

Laststellung	Absolute Verformung f [mm]						Relative Verformung in Bezug auf Spannweite	
	5 kN/m <sup>2</sup>			25 kN/m <sup>2</sup>			5 kN/m <sup>2</sup>	25 kN/m <sup>2</sup>
Messpunkt	1	2	3	1	2	3	Feldmitte	Feldmitte
PK400-U1	6,0	7,7	5,1	31,1	42,7	27,9	$1/520$	$1/94$
PK400-U2	5,4	6,2	4,3	33,6	43,4	22,9	$1/645$	$1/92$
PK400-U3	7,3	9,2	6,8	-	-	-	$1/435$	n.a.

Tab. 15: Verformung bei vollflächiger Laststellung.

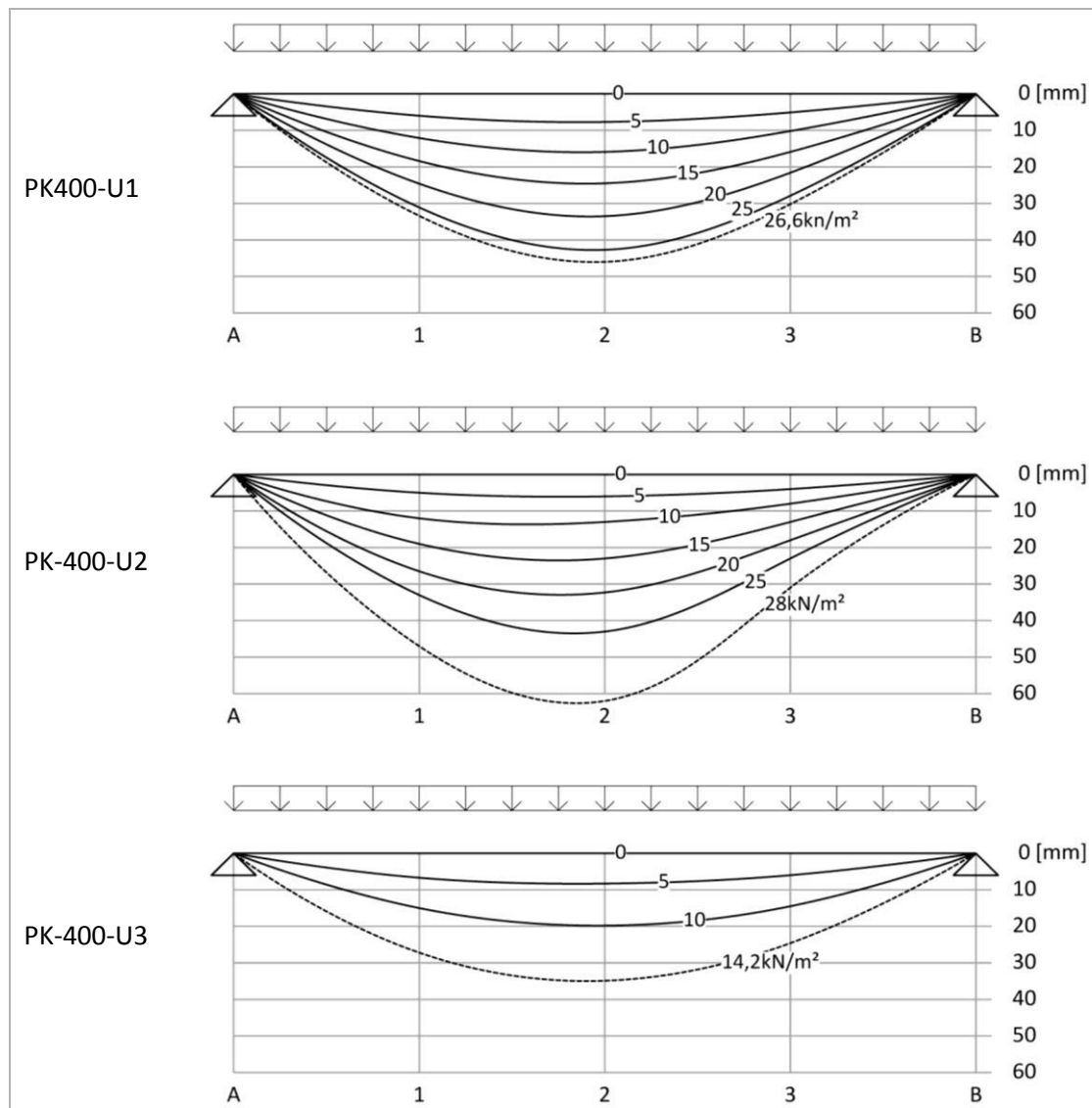


Abb. 139: Verformung der Prüfkörper-Oberkante unter kontinuierlicher Flächenlast. Die Verformung ist 20-fach überhöht dargestellt. Die gestrichelte Linie zeigt die maximale Verformung zum Zeitpunkt des Bruchs an.

### 8.8.3.2 Verformung unter halbseitiger Last

Bei halbseitiger Belastung zeigte sich die Auswirkung der Unterspannung auf die Verformung. Bei höheren Lasten hob sich das linke Viertel des Felds umso mehr, je weiter sich die rechte Hälfte senkte. Dies ließ sich auf die Anpassung der Seillinie an die veränderte Laststellung zurückführen. Das Eigengewicht der Konstruktion und die Steifigkeit der Bambusdruckstäbe wirkten dem jedoch stabilisierend entgegen. Bei PK400-U3 machte sich die reduzierte Zahl der Bambusstäbe bemerkbar, da hier die Verformung im rechten Viertelpunkt etwa doppelt so stark war wie bei den Prüfkörpern PK400-U1 und PK400-U2 (Abb. 140).

Laststellung	Absolute Verformung [mm]						Relative Verformung in Bezug auf Spannweite	
	5 kN/m <sup>2</sup>			25 kN/m <sup>2</sup>			5 kN/m <sup>2</sup>	25 kN/m <sup>2</sup>
Messpunkt	1	2	3	1	2	3	Feldmitte	Feldmitte
PK400-U1	1,2	3,5	3,1	0,6	19,5	24,7	1/1142	1/205
PK400-U2	1,1	2,8	3,1	0,1	16,4	22,7	1/1428	1/244
PK400-U3	0,6	4,9	6,0	-	-	-	1/816	n.a.

Tab. 16: Verformung bei halbseitiger Laststellung.

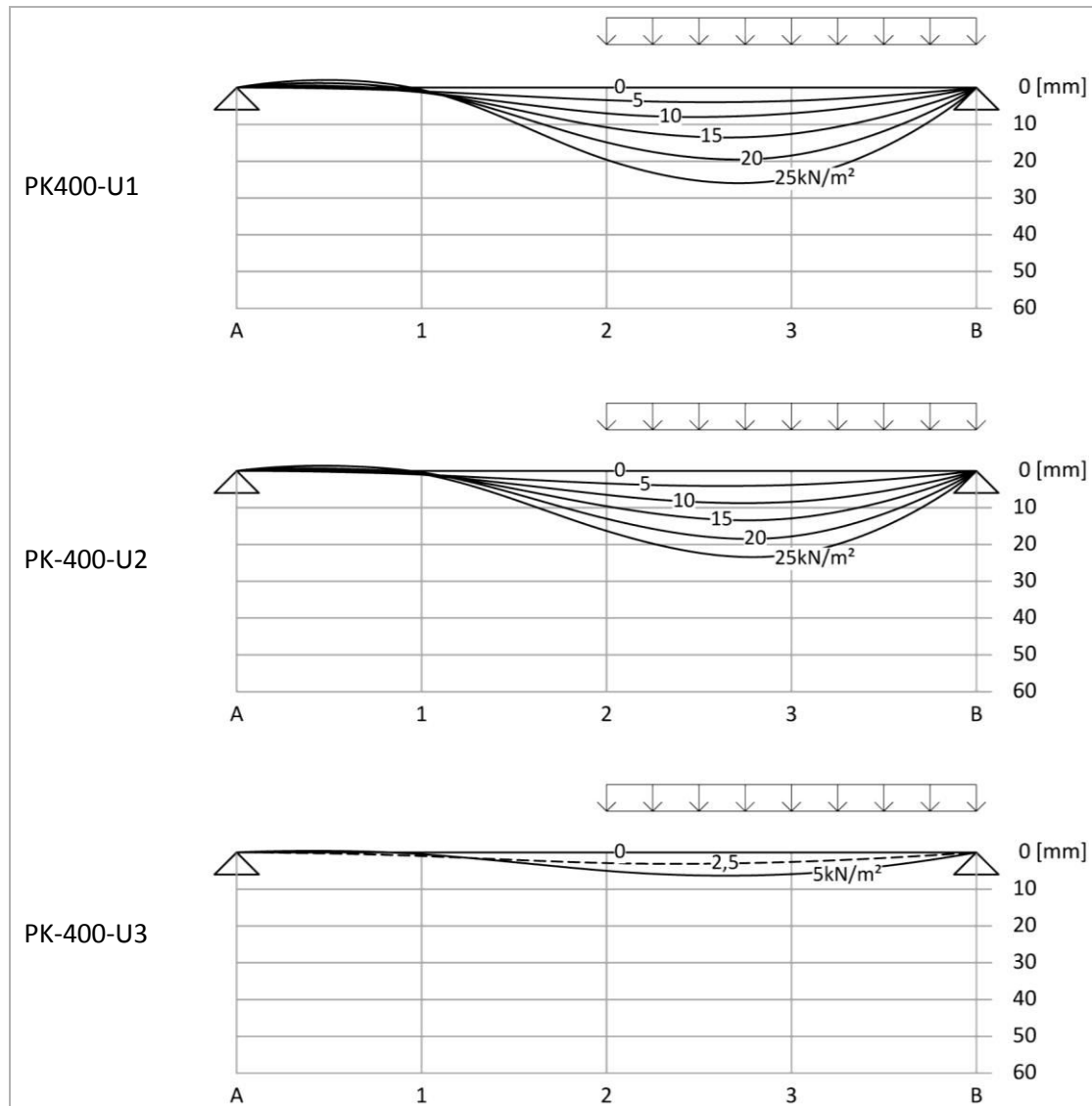
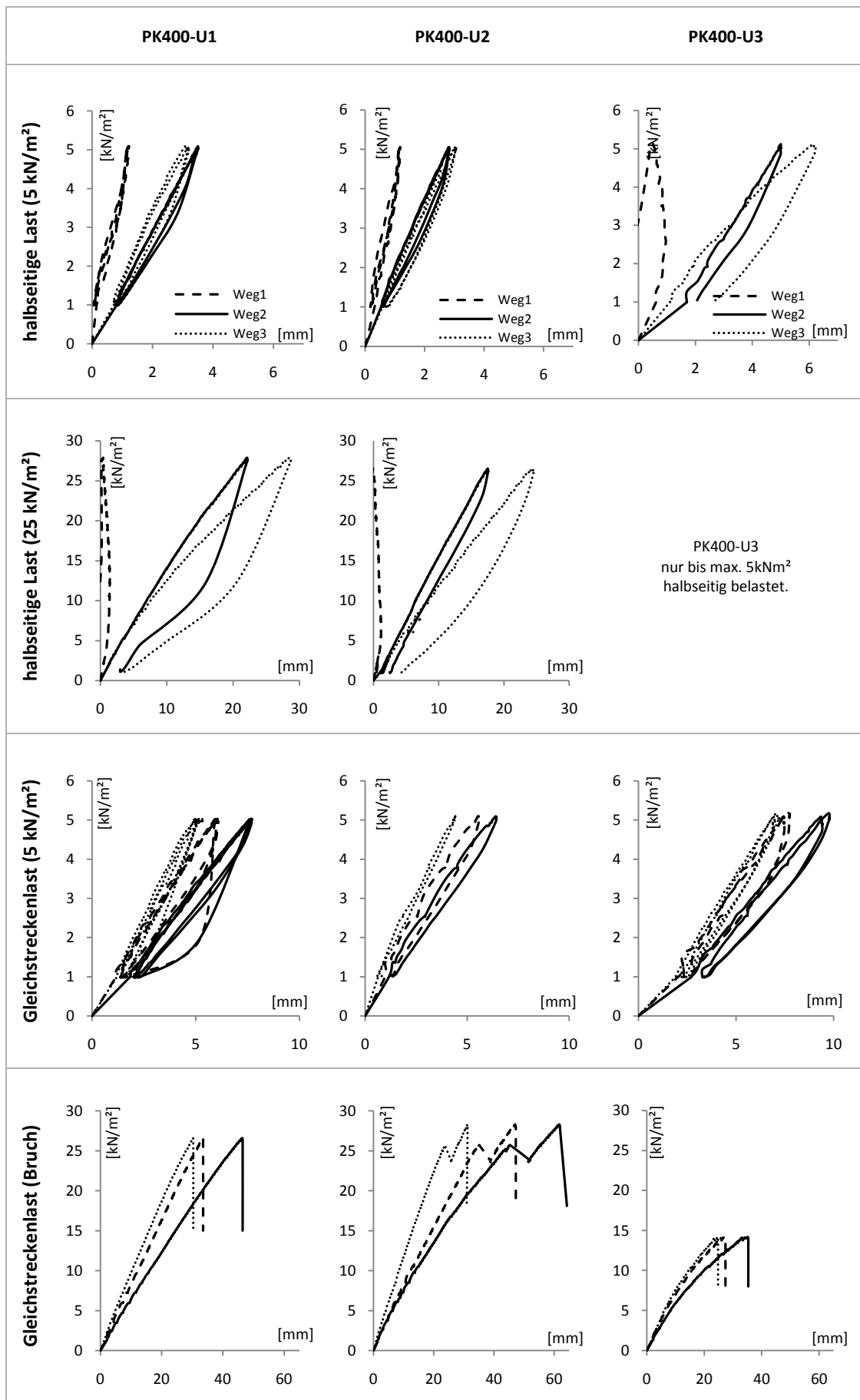


Abb. 140: Verformung unter halbseitiger Flächenlast. Die Verformung ist 20-fach überhöht dargestellt.



Tab. 17: Verformung der Prüfkörper PK400-U1 bis PK400-U3 unter verschiedenen Laststellungen und Lastgrößen.

### 8.8.3.3 Versagen

Das Versagen trat bei allen drei Prüfkörpern im Bereich der Auflager ein. Um die wirkenden Kraftverhältnisse zu verdeutlichen, muss die Geometrie der Elemente am Auflager betrachtet werde (Abb. 141). Diese resultiert aus dem Verhältnis von Stich und Spannweite ( $l/15$ ):

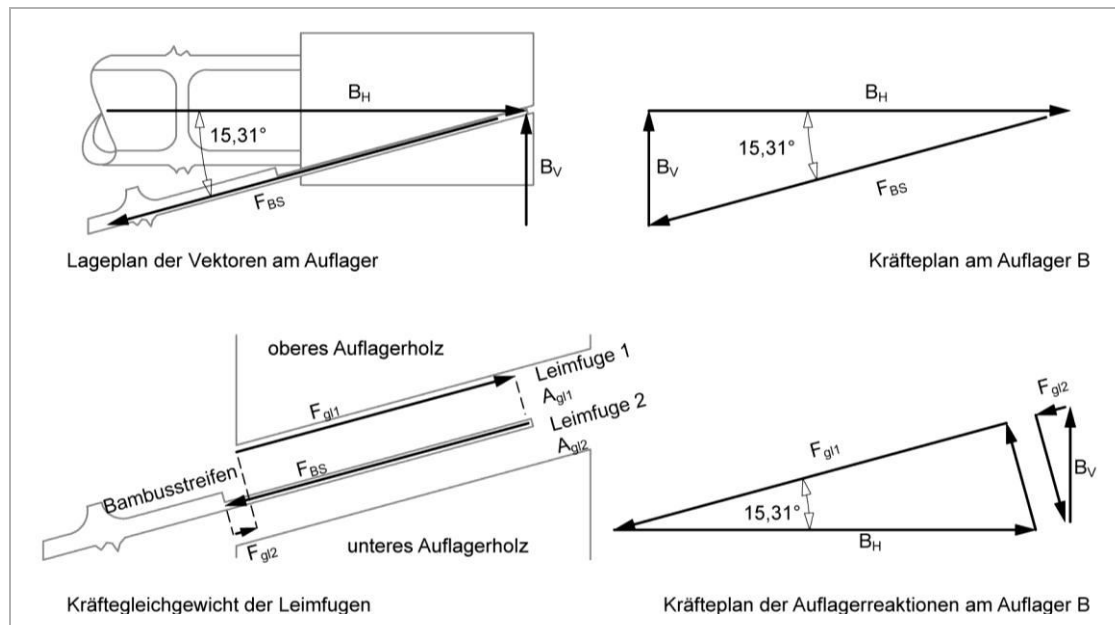


Abb. 141: Kräftegleichgewicht am Auflager. Je flacher die Steigung der Unterspannung ist, desto größer werden die resultierenden Horizontalkräfte am Auflager.

Zusätzlich zur Auflast aus Hydraulikzylinder und Lastverteilungsgeschirr wirkte das Eigengewicht der Lehmsteine und der Sandbettung. Das Eigengewicht der Bambuskonstruktion war dabei vernachlässigbar. Die vertikalen Auflagerreaktionen betrugen folglich:

$$A_V = B_V = \frac{R}{2} = \frac{F + G_{\text{Sand}} + G_{\text{Lehm}}}{2}$$

Die am Auflager wirkende Seilkraft der Bambusstreifen ( $F_{BS}$ ) wurde zu ungleichen Teilen von Leimfuge 1 ( $F_{gl1}$ ) und Leimfuge 2 ( $F_{gl2}$ ) aufgenommen. Sie ergab sich aus:

$$F_{BS} = F_{gl1} + F_{gl2} = \frac{B_V}{\sin 15,3^\circ}$$

Um die Belastung der Leimverbindung zu beurteilen, können die Kräfte der Leimfuge 1 ( $F_{gl1}$ ) und Leimfuge 2 ( $F_{gl2}$ ) differenziert werden. Es zeigt sich, dass Leimfuge 1 mit 93 % der Seilkraft den Hauptteil aufnahm, während Leimfuge 2 nur 7 % der Seilkraft übernahm:

$$F_{gl2} = B_V \cdot \sin 15,3^\circ \rightarrow F_{gl2} = F_{BS} \cdot 7\%$$

$$F_{gl1} = F_{BS} - F_{gl2} \rightarrow F_{gl1} = F_{BS} \cdot 93\%$$

Bruchlast	Einwirkungen				Auflagerreaktionen			Leimfuge	
	F [kN]	G <sub>Sand</sub> [kN]	G <sub>Lehm</sub> [kN]	R [kN]	A <sub>V</sub> , B <sub>V</sub> [kN]	A <sub>H</sub> , B <sub>H</sub> [kN]	F <sub>BS</sub> [kN]	F <sub>gl1</sub> [kN]	F <sub>gl2</sub> [kN]
<b>PK400-U1</b>	52,8	2,4	2,8	<b>58,0</b>	29,0	105,9	109,9	<b>102,2</b>	7,7
<b>PK400-U2</b>	56,6	2,4	2,8	<b>61,8</b>	30,9	112,9	117,0	<b>108,8</b>	8,2
<b>PK400-U3</b>	28,3	2,4	2,8	<b>33,5</b>	16,8	61,2	63,4	<b>59,0</b>	4,4

Tab. 18: Übersicht der am Auflager wirkenden maximalen Kräfte zum Zeitpunkt des Bruchs.



Auflagerposition		Auflager A			Auflager B		
Keilholz	Streifen	$b_{gl}$ [cm]	$A_{gl}$ [cm <sup>2</sup> ]	Versagensbild	Versagensbild	$b_{gl}$ [cm]	$A_{gl}$ [cm <sup>2</sup> ]
<b>PK400-U1</b>		$\Sigma=22,4$	$\Sigma=353,9$			$\Sigma=22,6$	$\Sigma=357,1$
I	b	2,4	37,9	-	-	1,8	28,4
	a	1,7	26,9	-	-	2,2	34,8
II	b	2,5	39,5	-	-	2,6	34,8
	a	2,5	39,5	-	-	2,2	34,8
III	b	2,1	33,2	-	-	2,7	42,7
	a	2,7	42,7	-	-	2,8	44,2
IV	b	2,0	31,6	-	-	2,2	34,8
	a	1,7	26,9	-	-	2,4	37,9
V	b	2,8	44,2	-	Bambus schert ab	1,5	23,7
	a	2,0	31,6	-	Bambus schert ab	2,2	34,8
<b>PK400-U2</b>		$\Sigma=23,6$	$\Sigma=372,9$			$\Sigma=25,6$	$\Sigma=404,5$
VI	b	3,0	47,4	-	Streifen gerissen	2,6	34,8
	a	2,6	34,8	-	Streifen gerissen	3,0	30,0
VII	b	2,0	31,6	-	Streifen gerissen	2,2	34,8
	a	2,2	34,8	Bambus schert ab	-	2,0	31,6
VIII	b	2,7	42,7	-	-	2,8	44,2
	a	2,2	34,8	-	-	2,7	42,7
IX	b	2,9	45,8	-	-	2,7	42,7
	a	1,9	30,0	-	-	2,9	45,8
X	b	2,2	34,8	-	Bambus schert ab	2,0	31,6
	a	1,9	30,0	Streifen gerissen	-	2,7	42,7
<b>PK400-U3</b>		$\Sigma=22,5$	$\Sigma=355,5$			$\Sigma=22,8$	$\Sigma=360,2$
XI	a-j	22,5	355,5	Holz schert ab	-	22,8	360,2

Tab. 19: Übersicht der jeweiligen Leimbreite ( $b_{gl}$ ) und Leimfläche ( $A_{gl}$ ) der Bambusstreifen an den Auflagern.

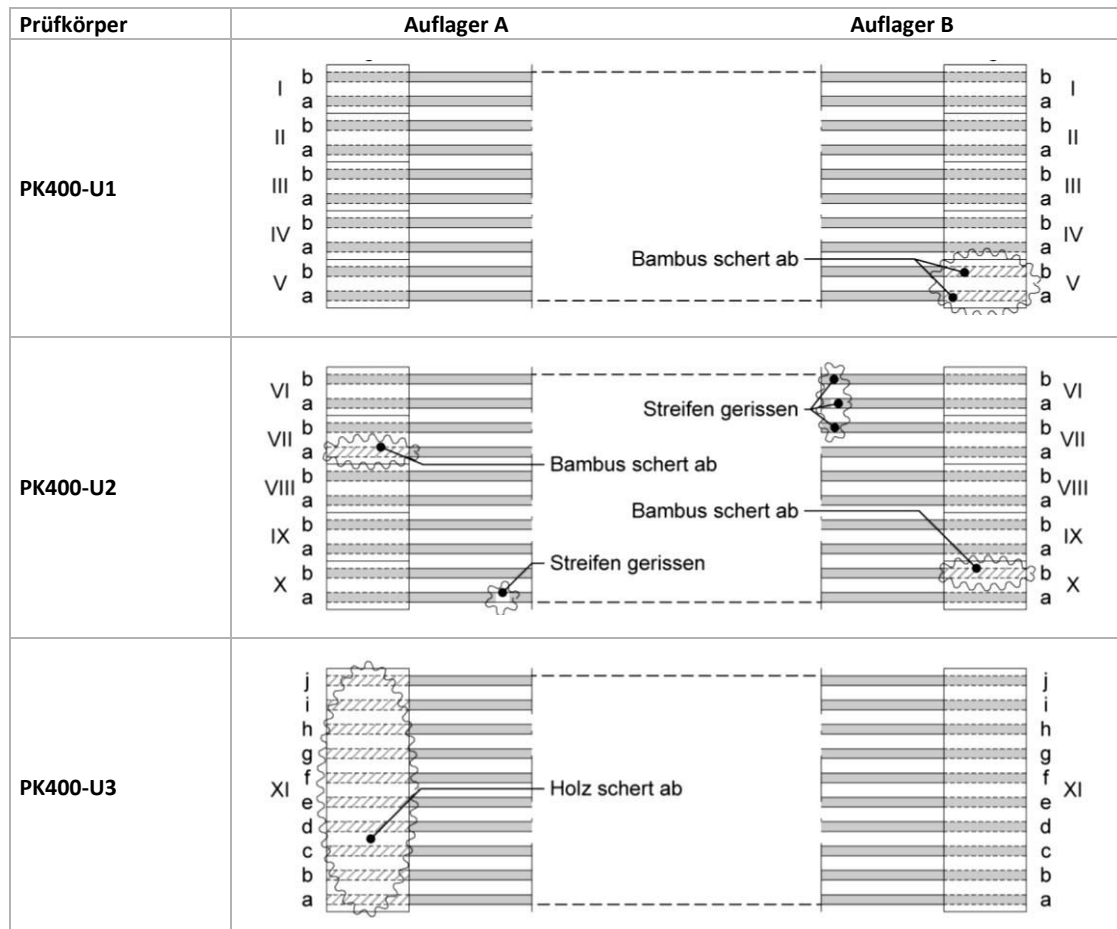


Abb. 142: Auswertung der Versagens-Ursachen bei PK400-U1-3. Das Versagen setzte stets an den Auflagern ein.

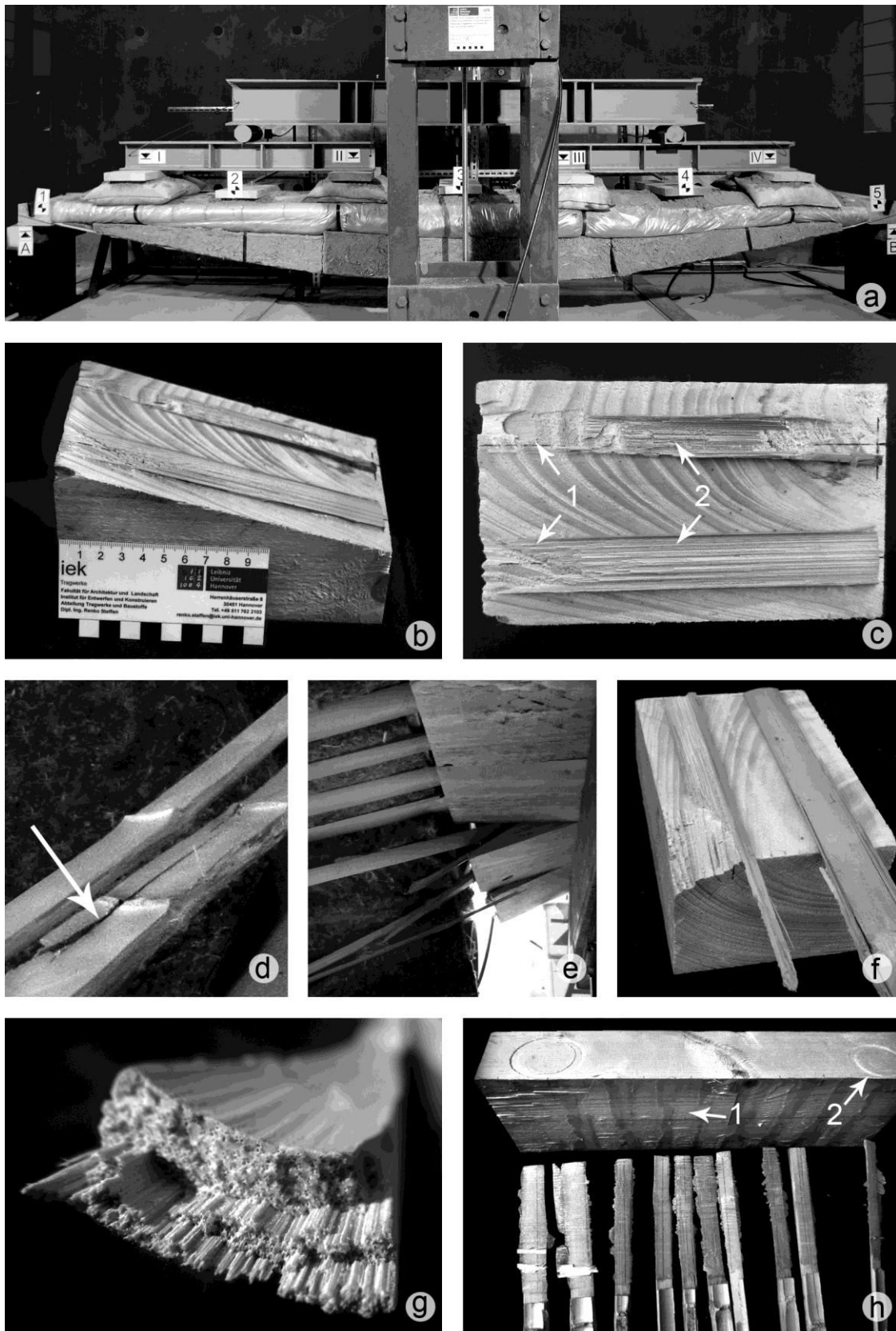


Abb. 143: Belastungstest und anschließende Schadensbilder bei der Versuchsreihe PK400-U. a) Aufbau. b) PK400-U1, Auflagerholz V-a/b: Leimfuge 1 mit Bambusanhaftungen. c) Blick auf dieselbe Leimfuge mit kombiniertem Scherversagen von Holz [1] und von Bambus [2]. d) Splitternde Ränder der Bambusstreifen als Ergebnis der Vorschädigung beim Auftrennen. e) PK400-U2, Blick unter das Auflager A. f) Auflagerholz X-a/b mit kombiniertem Scherversagen von Holz und Bambus. g) Gerissener Bambusstreifen VI-a. h) PK400-U3, Schäden am Auflagerholz: Scherversagen des Holzes [1], Querpressung Holz [2].

#### 8.8.3.4 Versagen bei PK400-U1

Das Versagen setzte am Auflager B bei einer Auflast von 52,8 kN ein, was einer vollflächigen Nutzlast von 26,4 kN/m<sup>2</sup> entsprach. Am äußeren Auflagerklotz V lösten sich kurz hintereinander mit hörbarem Knall beide Bambusstreifen. Dadurch stand der einwirkenden Last nunmehr ein asymmetrischer Widerstand gegenüber und der gesamte Prüfkörper kippte zur Seite.

Bei der anschließenden Suche nach der Ursache zeigte sich am Auflagerklotz V in der Leimfuge 1 ein kombiniertes Scherversagen von Holz und Bambus, wie es schon bei PKGL1-16 zu beobachten gewesen war. Teile des Holzes hafteten am Bambusstreifen und Teile des Bambusstreifens hafteten am Holz (Abb. 142c). Zwar war der Prüfkörper durch das Umkippen als Ganzes auseinandergefallen die übrigen Teile waren aber im Einzelnen unbeschädigt. Der abgescherte Streifen V-b hatte von allen Streifen des *PK400-U1* die geringste Breite ( $b_{gl} = 1,5 \text{ cm}$ ). Die Leimfläche des Streifens war entsprechend klein ( $A_{gl} = 23,7 \text{ cm}^2$ ). Unter der vereinfachten Annahme, dass alle zehn Bambusstreifen zu gleichen Teilen belastet worden sind, musste die Spannung am schmalen Streifen V-b folglich besonders groß gewesen sein (Abb. 142):

$$\sigma_{glV-b} = \frac{F_{gl1} \cdot 1/10}{A_{glV-b}} = \frac{102,2 \text{ kN} \cdot 0,1}{23,7 \text{ cm}^2} = 4,3 \text{ MPa}$$

Aufgrund der hohen Scherspannung versagte Streifen V-b. Dadurch wurde die Last allein auf V-a umgelagert, woraufhin V-a ebenfalls versagte. Das Umkippen des Prüfkörpers verhinderte einen weiteren Lastanstieg, weshalb die übrigen Auflagerklötze unbeschädigt blieben. Bambusstreifen V-b hatte eine Querschnittsfläche von:

$$A_{\emptyset V-b} = 4,5 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} = 67,5 \text{ mm}^2$$

Die maximale Kraft der Seilschar am Auflager betrug:  $F_{BS} = 109,9 \text{ kN}$ . Daraus folgte eine Zugspannung des Bambusstreifens V-b:

$$\sigma_{BS} = \frac{F_{BS} \cdot 1/10}{A_{\emptyset V-b}} = \frac{109,9 \text{ kN} \cdot 0,1}{67,5 \text{ mm}^2} = 162,8 \text{ MPa}$$

Da der Bambusstreifen nicht riss, musste dessen Zugfestigkeit höher als 162,8 MPa sein. Das beobachtete, kombinierte Scherversagen von Holz und Bambus entsprach im Prinzip dem Versuchsergebnis PK-GL1-16. Die Scherfestigkeit bei PK400-U1 war mit 4,3 MPa allerdings geringer als die im Versuch *PK-GL1-16* ermittelten 5,8 MPa. Für diese Differenz könnte folgende Erklärung infrage kommen: Die vereinfachte Annahme, dass alle zehn Bambusstreifen beim PK400-U1 zu gleichen Teilen belastet waren, war nicht zutreffend, sondern die auf den Randstreifen V-b wirkende Kraft war in Wirklichkeit höher.

### 8.8.3.5 Versagen PK400-U2

Das Versagen des PK400-U2 vollzog sich in zwei Stufen:

1. Bei einer Auflast von 51,4 kN gab das hintere Streifenpaar X-a/b nach. Es kam zu einem Lastabfall auf 47,2 kN. Die Feldmitte sackte abrupt um 7 mm nach unten. Die übrigen Streifenpaare zeigten zu diesem Zeitpunkt noch keine Schäden.
2. Nach dem fortgesetzten Anstieg der Last versagten die beiden vorderen Streifenpaare VI-a/b und VII-a/b bei 56,6 kN. Dies führte schließlich zum vollständigen Kollaps des Prüfkörpers. Die einwirkende Nutzlast betrug entsprechend 28,3 kN/m<sup>2</sup>.

Die anschließende Untersuchung von Streifenpaar X-a/b ließ erkennen, dass zunächst X-a schräg gerissen und anschließend X-b am Auflager abgeschert war. Es zeigte sich, dass der Riss auf einer Länge von mehr als 20 cm schräg durch den Bambusstreifen verlief und an einem schräg gesplitterten und außen angeschnittenen Nodium seinen Ausgang genommen hatte. Diese Beobachtung verdeutlichte erneut, wie wichtig die Außenseite der Halme für die Zugfestigkeit der Bambusstreifen war. Die maximale Seilkraft ( $F_{BS}$ ) betrug zum Zeitpunkt des ersten Versagens 107,2 kN. Der Bambusstreifen X-a hatte eine Querschnittsfläche ( $A_{\emptyset X-a}$ ) von:

$$A_{\emptyset X-a} = 4,5 \text{ mm} \cdot 19 \text{ mm} = 85,5 \text{ mm}^2$$

Unter der vereinfachten Annahme, dass alle 10 Bambusstreifen zu gleichen Teilen belastet waren, betrug die Bruchspannung von Bambusstreifen X-a am beschädigten Nodium folglich:

$$\sigma_{BS} = \frac{F_{BS} \cdot \frac{1}{10}}{A_{\emptyset X-a}} = \frac{107,2 \text{ kN} \cdot 0,1}{85,5 \text{ mm}^2} = 125,4 \text{ MPa}$$

Es wurde deutlich, dass die Bambusstreifen schon bei ihrer Herstellung ungewollt vorgeschädigt wurden: Das Auftrennen der Halme geschah mit einem Stechbeitel an den Nodien und einem einfachen Messer. Dadurch hatten die Streifen im Ergebnis extrem raue Ränder und waren zum Teil in der Länge gesplittert (Abb. 143-d). Mit einem geeigneten Spaltgerät (wie dem „Splitter“ vgl. Abb. 162-f), welches jedoch nicht zur Verfügung stand, wären diese Kerbspannungsprobleme vermeidbar gewesen.

Auffällig bei den Prüfkörpern PK400-U1 und PK400-U2 war, dass die äußeren Streifenpaare (V bzw. VI, VII und X) zuerst versagten. Dies kann als Indiz dafür gelten, dass entweder eine Lastumlagerung an den offenen Rändern des einachsigen gespannten Prüfkörpers nicht möglich war oder die Ränder durch die Platzierung der zwei Sandsäcke höhere Lasten erhielten.

### 8.8.3.6 Versagen PK400-U3

Das Versagen trat bei einer Auflast von 28,3 kN/m<sup>2</sup> ein. Geräusche von reißen Holzfasern und ein Abflachen des Kraft-Weg-Diagramms kündigten das Versagen schon bei etwa 50 % der Bruchlast an. Schließlich versagte am Auflager A das Auflagerholz im Bereich der Leimfuge 1. Die Bambusstreifen rissen mitsamt der am Leim anhaftenden Holzfasern heraus. Die Scherspannung im Holz quer zur Faser betrug zu diesem Zeitpunkt:

$$\sigma_{gl} = \frac{F_{gl1}}{A_{gl}} = \frac{59,0 \text{ kN}}{355,5 \text{ cm}^2} = 1,6 \text{ MPa}$$

Dieser Wert liegt über der maximal zulässigen Querkzugspannung von Holz (0,5 MPa). Bei der anschließenden Untersuchung der Auflagerhölzer fielen 2 bis 3 mm tiefe, scharfrandige Abdrücke der Bambus-Druckstäbe an den Kontaktflächen des Holzes auf (Abb. 143-h).

Element	Kraft $A_H, B_H$ [kN]	dünnes Halmende		dickes Halmende	
		Kontaktfläche [cm <sup>2</sup> ]	Druckspannung [MPa]	Kontaktfläche [cm <sup>2</sup> ]	Druckspannung [MPa]
Bambushalm PK400-U3					
IX		12,6		28,3	
X		12,3		27,4	
XI		10,7		25,4	
<b>Summe:</b>	<b>61,2</b>	<b>35,6</b>	<b>17,2</b>	<b>81,1</b>	<b>7,5</b>

Tab. 20: Kontaktbereich von Bambusdruckstäben und Auflagerhölzern mit herrschenden Druckspannungen

Die von der Unterspannung erzeugten horizontalen Auflagerkräfte  $A_H$  und  $B_H$  wurden durch die Bambus-Druckstäbe aufgenommen und kurzgeschlossen. Zur Kraftübertragung standen die Stirnflächen der Halme zur Verfügung, deren Größe sich je nach Halmende unterschied (Tab. 20). Die maximale Druckspannung am dünneren Halmende betrug im Mittel 17,2 MPa. Dies erklärte die Zerstörung der oberen Holzschichten im Kontaktbereich. Eine Lastverteilung auf ein Niveau unter der Bruchspannung, erfolgte erst in tieferliegenden Holzschichten. Die Spannung war etwa fünfmal so hoch wie die zulässige Druckspannung quer zur Holzfaser (2,5 MPa.) Die aus dem Eigengewicht der Konstruktion resultierende Druckspannung im Kontaktbereich war mit 2,8 MPa bereits höher als zulässig.

Die Konstruktion war in diesem Punkt also stark unterdimensioniert. Die Stirnfläche der Halme war zu klein. Die geringe Holzdruckfestigkeit konnte dem Ansatz des reduzierten Bambusaufwands nicht gerecht werden, da zur Übertragung der Druckkräfte eine größere Kontaktfläche nötig gewesen wäre. Die stärkere Verformung des PK400-U3 gegenüber Prüfkörper 1 und 2 ergab sich nicht allein aus einer stärkeren Deformation der Bambuselemente im Feld, sondern folgte aus dem allmählichen Versagen der Auflagerhölzer durch Überschreiten der deutlich geringeren Festigkeiten quer zur Faser.

Das langsame Einpressen der Bambusdruckstäbe in die Auflagerholzflanken wirkte praktisch als Verkürzung des Obergurts. Unter Querkzugspannung verformte sich das Holz im Bereich der Leimfuge durch den geringen E-Modul quer zur Holzfaser stärker, wodurch die effektive Länge des Untergurts sich vergrößerte. Diese Nachgiebigkeit des Fügepunkts verursachte das Abflachen des Kraft-Weg-Diagramms (Abb. 144).

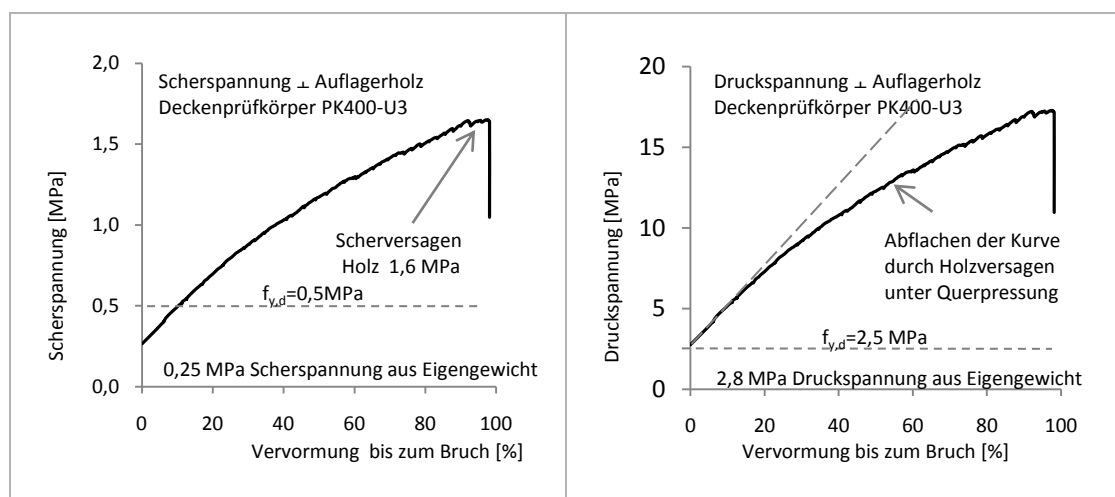


Abb. 144: PK400-3 Versagen des Auflagerholzes unter Scher- und Druckspannung.

### 8.8.3.7 Fazit

Die Prüfkörper der Reihe PK400-U wiesen insgesamt gute Belastungsfähigkeiten auf. Die Bruchlasten waren um ein Mehrfaches höher als die angestrebten Nutzlasten von  $5 \text{ kN/m}^2$ . Die Verformung war ausreichend begrenzt und lag im Rahmen der Gebrauchstauglichkeit. Die Knickgefahr der langen und schlanken Druckstäbe schien durch die vollflächige Einbettung in die Sandschüttung und die Verschnürung mit den Lehmsteinen stark reduziert worden zu sein. In keinem der Versuche wurde ein Halmknicken beobachtet. Die Schlankheit der Stäbe betrug dabei isoliert betrachtet etwa  $\lambda = 150$ .

PK400-U3 wies eine zu geringe Kontaktfläche zwischen Bambusdruckstäben und Auflagerhölzern auf, wodurch das Holz schon früh geschädigt wurde. Weiterhin tauchte eine Reihe (zum Teil sich wiederholender) Schwächungen auf, die vermeidbar gewesen wären:

- Die Leichtlehmsteine waren aufgrund von Produktionsüberlegungen längsgerichtet und schmal, daraus folgte für die Einbausituation eine mangelnde Stabilität bei der Positionierung auf lediglich zwei Bambusstreifen der Unterspannung. Gleichzeitig musste diese Anordnung im Belastungsfall zu einer fehlenden Lastquerverteilung führen. Eine quer zur Spannrichtung verlaufende Ausrichtung der Füllkörper müsste die Gesamttragfähigkeit durch eine bessere Lastverteilung steigern. Voraussetzung dafür wäre eine kontinuierliche Lagerung der Füllkörper auf allen Streifen der Unterspannung.
- Die Lasteinzugsbreite der Streifen war als lose Bambusstreifen-Schar nicht kontrollierbar. Seitliche Verschiebungen der Streifen von wenigen Zentimetern, mussten zu erheblichen Unterschieden in der Last-Aufnahme führen. Die Fixierung der Streifenabstände durch geeignete Bindeglieder (Schnur, Draht etc.) wäre daher anzustreben.
- Zur Steigerung der Redundanz der Unterspannung könnten in einer verbesserten Fertigung die Bambusstreifen nicht als eindimensionale Schar, sondern als zweidimensionales Gewebe bzw. Matte gefertigt werden. Der hohe Reibewiderstand zwischen den Gliedern eines Gewebes könnte die Streifen zusammenschnüren. Wie bei einem Seilbund würden beim Versagen eines Streifens die Nachbarstreifen Kraftanteile übernehmen. Diese Verbundwirkung sollte zunächst als Zugversuch bei entsprechenden Geweben ermittelt werden. Dabei wäre auf die Webrichtung und das Prinzip von Kett- und Schussfäden zu achten, um stark gewellte Hauptspannglieder zu vermeiden, die sich unter Last geradeziehen und mit dieser Federwirkung die Bauteilsteifigkeit herabsetzen könnten. Um Faserbrüche zu vermeiden, dürften die Bambusstreifen beim Weben nicht zu stark gebogen werden.
- Aus der Art der Verarbeitung resultierten Breitendifferenzen der Bambusstreifen am Auflager, die sich als entscheidende Schwächung auswirkten. Die Scherspannung war bei geringerer Streifenbreite und Leimfläche entsprechend höher. Dies führte zu einer verfrühten Überlastung. Das Versagen des überlasteten Streifens bewirkte das Versagen der benachbarten Streifen, wodurch sich die Belastbarkeit der gesamten Streifenschar nach dem schwächsten Glied bemaß. Es sollte somit bei der Herstellung der Bambusstreifen auf eine gleichmäßige Streifenbreite am Auflager geachtet werden, um diese Schwachstelle zu vermeiden (PK400-U1). Darüber hinaus sollte eine maximale Gesamt-Scherfläche angestrebt werden, was nur durch eine sehr dichte

Belegung der Auflagerhölzer mit Bambusstreifen zu erreichen ist. Die optimale Ausnutzung der Leimfläche wäre mit einer mattenartigen Unterspannung denkbar.

- Das Auftrennen der Halme zu Streifen sollte möglichst ebene Streifenränder ergeben. Spaltversätze zwischen Stechbeitel und Messer führen zum Splintern der Ränder und reduziert lokal den Querschnitt. Zusätzlich werden Kerbspannungen erzeugt, welche die Belastbarkeit der Bambusstreifen herabsetzen (PK400-U2).
- Die Ausrichtung der Auflagerhölzer ist, wie die drei Prüfkörper zeigten, entscheidend. Wie zuvor schon bei PK230-U beobachtet sollten jegliche Druck- und Zugbelastungen quer zur Holzfaser (PK400-U3) vermieden werden. Auf der anderen Seite zeigte das seitliche Umkippen des PK400-U1, dass das Ausfallen einzelner Auflagerklötze den Zusammenhalt des Deckenelements zerstören kann. Eine Kombination von Längs- und Querhölzern (wie bei einem Brett-Sperrholz) wäre denkbar. Dabei sollten konsequent alle Holzbauteile mit Bambus-Kontakt in Faserrichtung belastet werden.
- Im Vergleich zu den Leim-Prüfkörpern mit einseitiger Leimverbindung der Reihe PK-GL1 wiesen die Deckenprüfkörper der Reihe PK400-U eine Scherfestigkeit auf, die nur etwa 73 % betrug (Abb. 145). Diese Reduktion kann auf die oben beschriebenen Unregelmäßigkeiten der Lasteinleitung, der Streifenbreiten am Auflager und die damit einhergehender Schwächung zurückgeführt werden.

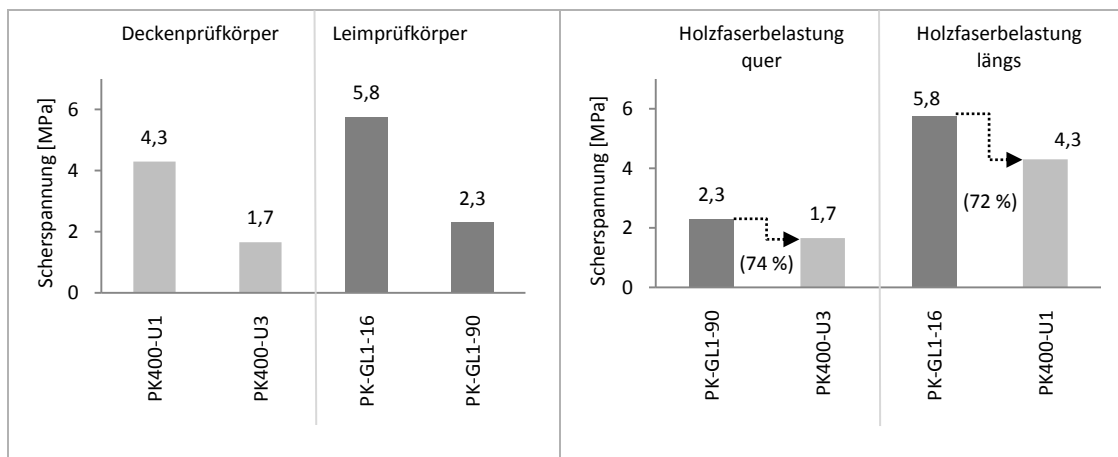


Abb. 145: Bruch-Scherspannung der betrachteten Leim- und Deckenprüfkörper (helle Balken: Deckenprüfkörper, dunkle Balken: Leimprüfkörper).

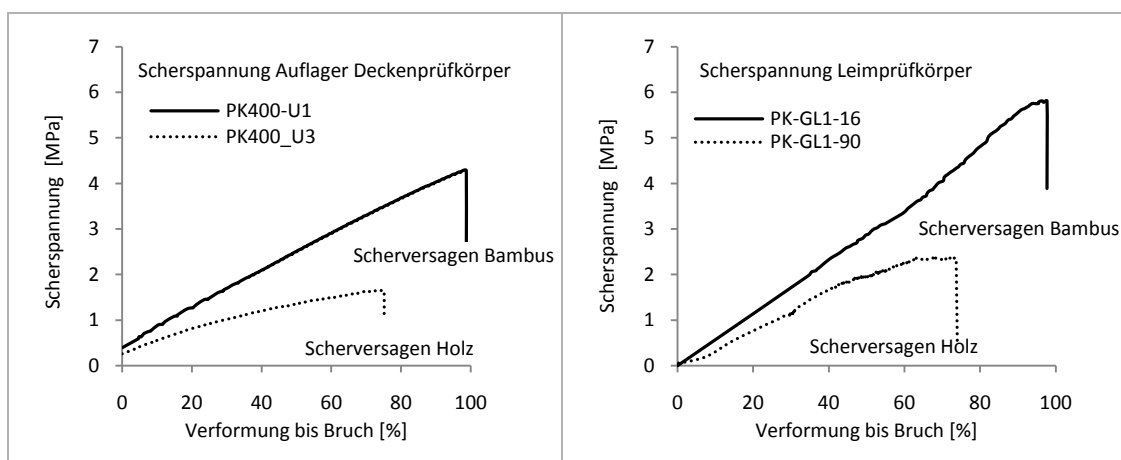


Abb. 146: Die Verformung unter Scherspannung bei Decken- und Leimprüfkörpern weisen Ähnlichkeiten auf, was die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Ausrichtung der Holzfasern demonstriert.

## 9 Vergleich der betrachteten Deckentragwerke

Die Verwendung von natürlich runden Bambushalmen bringt es mit sich, dass der Konstrukteur mit den vorhandenen Querschnitten umgehen muss. Inwieweit ein Deckentragwerk die Tragfähigkeit und Steifigkeit des gegebenen Materials ausnutzen bzw. steigern kann, hängt entscheidend vom Konstruktionsprinzip ab. Um eine Bewertung der betrachteten Tragwerksysteme hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu ermöglichen, sollen die unterschiedlichen Konstruktionsbeispiele dieser Arbeit im Folgenden miteinander verglichen werden. Die vorliegenden Konstruktionsansätze sind in Bezug auf Materialeinsatz, Spannweite, Fügetechnik, Laststellung, Verformung und Tragfähigkeit sehr unterschiedlich. Und doch haben alle eine gemeinsame Zielsetzung: Mit den vorhandenen Bambushalmen sollen Deckentragwerke geschaffen werden, welche Nutzlasten im Rahmen der Gebrauchstauglichkeit abtragen können. Der Blick soll daher vor allem auf die Begrenzung der Nachgiebigkeit und damit auf das Flächenträgheitsmoment des jeweiligen Konstruktionsprinzips gelenkt werden.

### 9.1 Flächenträgheitsmoment

Für die in dieser Arbeit angestrebte Deckenkonstruktion von 4 m Spannweite und 5 kN/m<sup>2</sup> Nutzlast ist bei einer maximal zulässigen Verformung<sup>50</sup> von  $l/300$  ein Flächenträgheitsmoment von:  $I_{\text{erf}} = 8.320 \text{ cm}^4$  je Meter Deckenbreite erforderlich. Um diesen Wert zu erreichen, sind die meisten natürlich runden Bambushalme alleine nicht ausreichend (wie das Rechenbeispiel im Abschnitt 8.1.3, Tab. 8 gezeigt hat). Was aber leisten die auf unterschiedliche Weise konstruktiv kombinierten Bambushalme im Hinblick auf die zu erreichende Zielgröße  $I_{\text{erf}}$  ?

Es lassen sich hieraus für einen 1 m breiten Deckenstreifen drei Fragstellungen ableiten:

1. Wie groß ist das effektive Flächenträgheitsmoment ( $I_{\text{eff}}$ ) der betrachteten Konstruktion?
2. Wie groß ist das ursprüngliche Flächenträgheitsmoment ( $I_{\text{input}}$ ) aller eingesetzten Bambusstäbe?
3. Wie ist das Verhältnis des effektiven Flächenträgheitsmoments ( $I_{\text{eff}}$ ) zum Flächenträgheitsmoment aller eingesetzten Bambusstäbe ( $I_{\text{input}}$ )? Dieses Verhältnis soll durch den Koeffizienten  $k_1$  beschrieben werden.

#### 9.1.1 Effektives Flächenträgheitsmoment

Zur Ermittlung der maximalen Verformung<sup>51</sup> einer Konstruktion mit bekanntem Flächenträgheitsmoment  $I$ , wird folgende Gleichung verwendet:

$$f_{\text{max}} = \frac{n \cdot M_{\text{max}} \cdot l^2}{I}$$

Diese Gleichung wird umgestellt nach  $I$  und die vorhandene Breite ( $b$ ) mit einem 1 m breiten Deckenstreifen ins Verhältnis gesetzt.

---

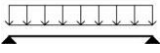

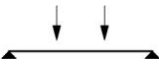
<sup>50</sup> Rechenwert  $a = 208$ ; siehe Tab. 21

<sup>51</sup> Rechenwert  $n$ , siehe Tab. 21



Man erhält auf diese Weise das effektive Flächenträgheitsmoment ( $I_{\text{eff}}$ ) welches sich aus der Verformung des Trägers unter bestimmter Last ableiten lässt:

$$I_{\text{eff}} [\text{cm}^4] = \frac{n \cdot M_{\text{max}} [\text{kNm}] \cdot l^2 [\text{m}] \cdot 1\text{m}}{f_{\text{max}} [\text{cm}] \cdot b [\text{m}]}$$

Belastungsfall	Einfeldträger	Holz (E-Modul 10 GPa)		Bambus (E-Modul 15 GPa)	
		$a$ ( $l/300$ )	$n$	$a$ ( $l/300$ )	$n$
	Gleichstreckenlast	313	104	<b>208</b>	<b>69,3</b>
	Punktlast, 1/2 Länge	250	83,3	<b>167</b>	<b>55,5</b>
	Punktlasten 1/3 Länge	320	107	<b>213</b>	<b>71,3</b>

Tab. 21: Rechenwerte für Einfeldträger aus Holz nach Schneider Bautabellen (30). Rechenwerte für Bambus sind entsprechend dem höheren E-Modul angepasst.

### 9.1.2 Eingesetztes Flächenträgheitsmoment der verwendeten Bambusstäbe

Die Bewertung des Materialaufwands kann sich bei Bambus nicht allein in Kilogramm oder Kubikmetern ausdrücken, da nicht beliebig abstrakte Mengen zur Verfügung stehen, sondern runde Halme mit begrenzten Abmessungen und naturgegebenen Querschnittsgrößen. Der Blick muss folglich auf gegebene Elemente und nicht auf eine formbare Rohmasse gerichtet werden. Zur Ermittlung des eingesetzten Flächenträgheitsmoments  $I_{\text{input}}$  wird das mittlere Einzel-Flächenträgheitsmoment der Halme mit der Anzahl ( $x$ ) der verwendeten Halme multipliziert und auf 1m Deckenbreite umgerechnet. Daraus folgt:

$$I_{\text{input}} = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - (D - 2 \cdot t)^4) \cdot \frac{x}{b}$$

### 9.1.3 Koeffizient des Flächenträgheitsmoments

Ein Tragwerk, welches mit einem geringen Aufwand von dünnen Halmen ein großes  $I_{\text{eff}}$  bewirkt, ist effizienter als eines, das mit einem großen Aufwand von dicken Halmen ein vergleichsweise kleines  $I_{\text{eff}}$  zur Folge hat. Aus dieser einfachen Effizienzüberlegung, die dem Verhältnis von Mittel und Zweck entspricht, lässt sich direkt der Koeffizient  $k_I$  ableiten:

$$k_I = \frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{input}}}$$

Es lässt sich an diesem Wert ablesen, ob die Konstruktion verformungssteifer ist als die verbauten Bambushalme zusammengenommen. Ein Wert von  $k_I$ , der deutlich über 1,0 liegt, ist also anzustreben. Diese Betrachtung ist jedoch wie jede Effizienzbetrachtung nur in Bezug auf ein bestimmtes Ziel gültig. In diesem Fall ist das die Begrenzung der Verformung. Selbst wenn der Wert über 1,0 liegt, bedeutet dies nicht, dass die Konstruktion *an sich* effizient ist. Wird zur Erstellung der Konstruktion der Einsatz von teuren oder energieintensiven Materialien oder Fertigungsschritten nötig, kann die Konstruktion (trotz aller Steifigkeit) ökologisch oder ökonomisch unzumutbar sein. Diese zusätzlichen Faktoren sind jedoch von sehr komplexer Natur, denn sie sind von Umgebungsparametern abhängig, die in ihrer Gesamtheit nicht konstant sind. Insofern soll zunächst nur auf  $k_I$  eingegangen werden.

### 9.1.4 Gegenüberstellung

Tab. 22 gibt einen Überblick über die verschiedenen Tragwerke mit ihren unterschiedlichen Halmquerschnitten, Abmessungen, Spannweiten, Belastungen und Verformungen. Aus den Einzelwerten werden die Größen  $I_{\text{eff}}$  und  $I_{\text{input}}$  sowie  $k_I$  gebildet. Anhand dieser Werte können die Konstruktionen miteinander verglichen werden (Abb. 147).

Nr.	Testkörper	Bambushalme			Prüfkörper		Belastung			Flächenträgheitsmoment		
		D	t	x	l	b	n	M <sub>max</sub>	f <sub>max</sub>	I <sub>eff</sub>	I <sub>input</sub>	k <sub>I</sub>
		[cm]	[cm]	$\frac{\text{Stk}}{\text{m}}$	[m]	[m]	E-Modul 15 GPa	[kNm]	[cm]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	$\frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{input}}}$
1	PK230-4x1	5,8	0,6	13,0	2,30	0,30	55,5	4,1	9,4	<b>428</b>	<b>436</b>	<b>0,98</b>
2	PK230-D	6,2	0,6	12,0	2,30	0,50	55,5	4,4	5,7	<b>450</b>	<b>502</b>	<b>0,90</b>
3	PK230-U	6,0	0,6	15,0	2,30	0,30	55,5	12,0	6,6	<b>1.777</b>	<b>563</b>	<b>3,15</b>
4	PK375-U	8,0	0,9	16,0	3,75	1,00	69,3	5,1	0,4	<b>12.340</b>	<b>2.056</b>	<b>6,00</b>
5	PK400-U1	8,2	0,8	13,0	4,00	0,50	69,3	26,5	5,2	<b>11.229</b>	<b>1.674</b>	<b>6,71</b>
6	PK400-U2	8,2	0,8	13,0	4,00	0,50	69,3	25,7	4,7	<b>12.132</b>	<b>1.674</b>	<b>7,25</b>
7	PK400-U3	8,2	0,8	9,0	4,00	0,50	69,3	14,1	3,7	<b>8.433</b>	<b>1.159</b>	<b>7,28</b>
Daten aus anderen Berichten (Guzman <sup>52</sup> ; Ghavami <sup>53</sup> , ZRS <sup>54</sup> ):												
Nr.	Testkörper	Bambushalme			Prüfkörper		Belastung			Flächenträgheitsmoment		
		D	t	x	l	b	n	M <sub>max</sub>	f <sub>max</sub>	I <sub>eff</sub>	I <sub>input</sub>	k <sub>I</sub>
		[cm]	[cm]	$\frac{\text{Stk}}{\text{m}}$	[m]	[m]	E-Modul 15 GPa	[kNm]	[cm]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	$\frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{input}}}$
8	GUZMAN -Bn2	8,8	0,8	10,0	1,00	0,10	55,5	3,9	1,6	<b>1.354</b>	<b>1.625</b>	<b>0,83</b>
9	GUZMAN -BC2	9,0	0,7	10,0	1,00	0,40	55,5	2,8	1,3	<b>1.196</b>	<b>1.583</b>	<b>0,76</b>
10	GHAVAMI -BTDG-HD	12,0 ( <sup>55</sup> )	1,2 ( <sup>56</sup> )	4,2	3,50	0,60	71,3	43,1	10,6	<b>5.923</b>	<b>2.504</b>	<b>2,37</b>
11	GHAVAMI -BTDG-ED	10,6 ( <sup>d</sup> )	1,1 ( <sup>e</sup> )	9,4	3,50	0,64	71,3	58,3	8,8	<b>9.051</b>	<b>3.430</b>	<b>2,64</b>
12	ZRS-TSM -SCHOOL	9,5	0,9	10,0	5,50	0,30	---	---	---	<b>8.107</b>	<b>2.273</b>	<b>3,57</b>
13	1x LBL-Profil 7,8x23,4 cm	7,0	0,7	38,0	---	---	---	---	---	<b>8.328</b>	<b>2.644</b>	<b>3,15</b>
14	2x LBL-Profil 6,6x19,7 cm	7,0	0,7	54,0	---	---	---	---	---	<b>8.398</b>	<b>3.758</b>	<b>2,23</b>

Tab. 22: Numerische Kennwerte der in dieser Arbeit betrachteten Konstruktionen.

<sup>52</sup> Guzman, 2007 (26)

<sup>53</sup> Ghavami, 2009 (57)

<sup>54</sup> Ziegert-Seiler, 2011 (27)

<sup>55</sup> Werte geschätzt: (Bauteilbreite/Halmanzahl)

<sup>56</sup> Werte geschätzt (t = 1/10 Durchmesser)

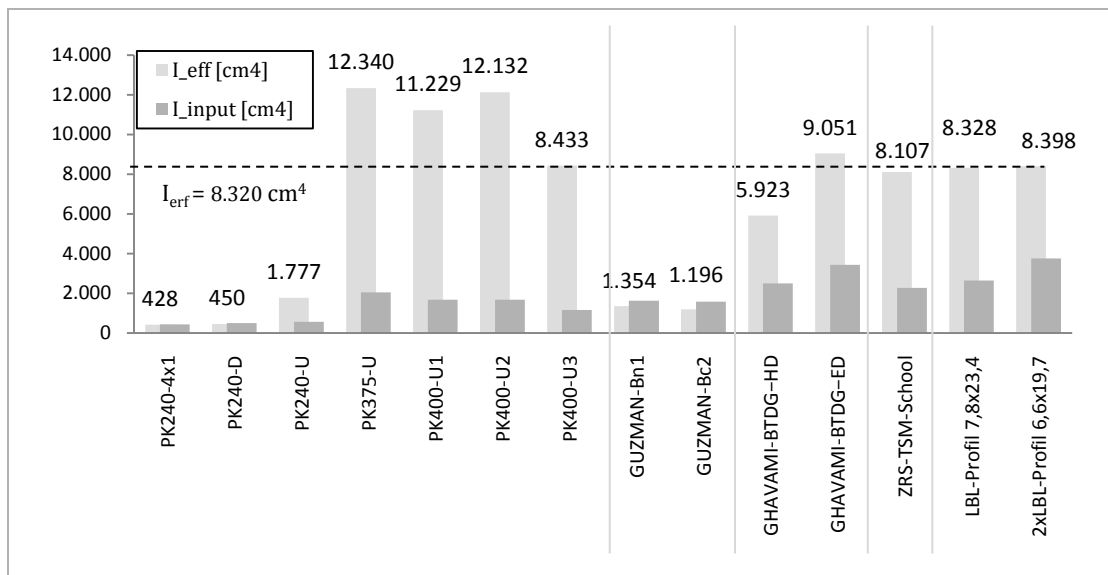


Abb. 147: Gegenüberstellung von  $I_{input}$  und  $I_{eff}$  der jeweiligen Prüfkörper in cm<sup>4</sup>. Das erforderliche Flächen­trägheitsmoment für die angestrebte Deckenkonstruktion beträgt  $I_{erf} = 8.320$  cm<sup>4</sup>.

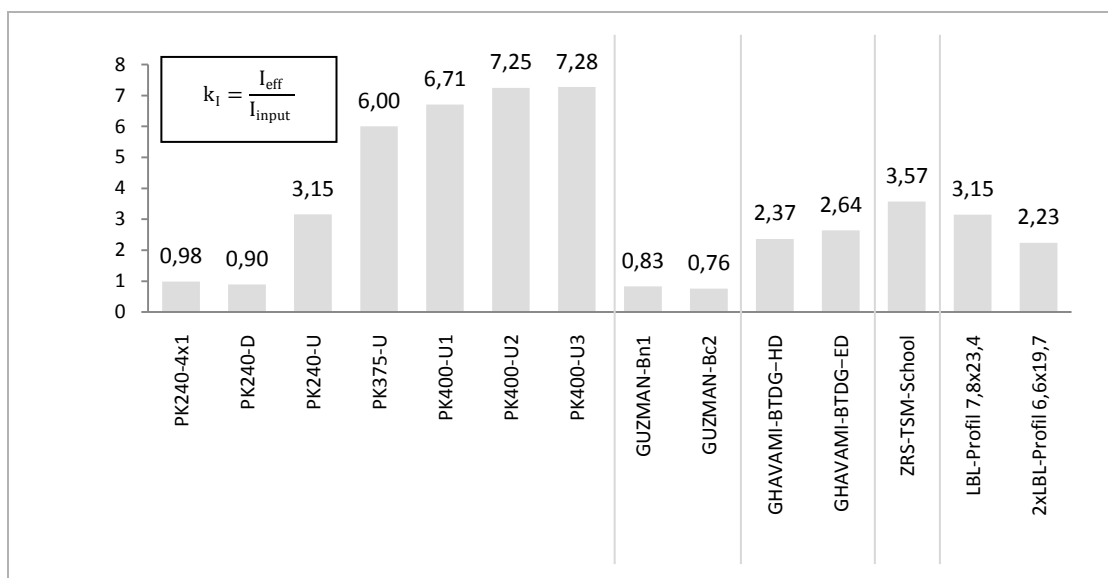


Abb. 148: Übersicht der Prüfkörper und ihrer jeweiligen  $k_i$ -Werte.

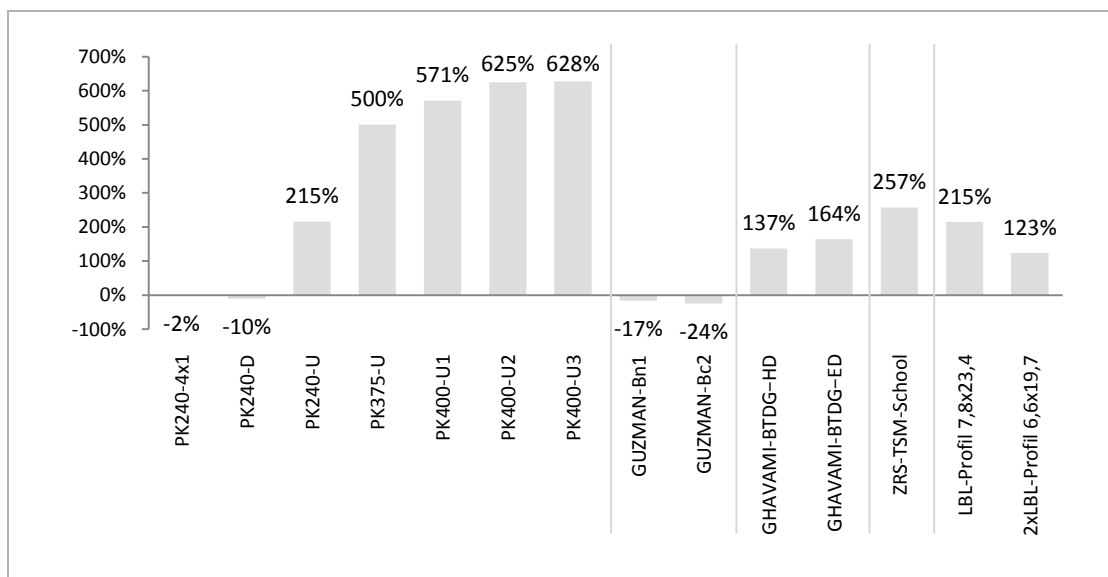

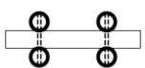

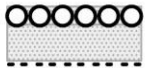
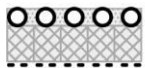
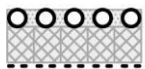
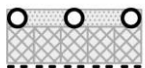




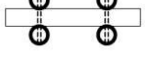

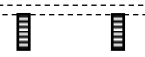


Abb. 149: Prozentuale Veränderung von  $I_{input}$  zu  $I_{eff}$ .

Nr.	Testkörper	Querschnitt durch Konstruktion	$k_f$	Bemerkung
1	PK230-4x1		<b>0,98</b>	$I_{input} \approx I_{eff} \rightarrow k_f \approx 1$ Abweichungen sind auf die Varianz der Halmgeometrie und deren rechnerisch ungenaue Erfassung zurückzuführen.
2	PK230-D		<b>0,90</b>	In diesem Beispiel findet nur eine geringfügige Nutzung der Verdübelungswirkung statt. Die Halme der Mittelebene leisten keinen aktiven Beitrag, bedeuten aber Materialaufwand. Daher: $I_{input} > I_{eff}$ . Dübel schädigen die Halme.
3	PK230-U		<b>3,15</b>	Die Verformung wird durch den seitlich herausquellenden Sand verstärkt.
4	PK375-U		<b>6,00</b>	Einsatz von Bambus in Druck- und Zugzone. Sandsäcke sorgen für Stabilität. Materialaufwand: 12 Halme je 1 m Breite in der Druckzone
5	PK400-U1		<b>6,71</b>	Einsatz von Bambus in Druck- und Zugzone. Dazwischen Stroh-Lehmsteine Materialaufwand: 10 Halme je 1 m Breite in der Druckzone.
6	PK400-U2		<b>7,25</b>	Wie PK400-U1.
7	PK400-U3		<b>7,28</b>	Einsatz von Bambus in Druck- und Zugzone. Dazwischen Stroh-Lehmsteine. Querpressung der Auflagerhölzer. Stärkere Verformung als PK400-U1 und PK400-U2. Materialaufwand: Aber nur 6 Halme je 1 m Breite in der Druckzone.
Deckenkonstruktionen aus anderen Berichten (Guzman <sup>57</sup> ; Ghavami <sup>58</sup> , ZRS <sup>59</sup> ):				
8	GUZMAN -Bn2		<b>0,83</b>	Bambus mit Aufbeton. Bambushalme zu 200° Segmenten aufgetrennt. Verwendeter Leichtbeton mit E-Modul von nur 2GPa (!) Verformung des Tragwerks ist theoretisch stärker als die der eingesetzten Halme ohne Auftrennung: $I_{input} > I_{eff}$ .
9	GUZMAN -Bc1		<b>0,76</b>	Wie GUZMAN-Bn2. Zusätzlich: Stahldübel in Querrichtung. Dübel schädigen den Halm. $I_{input} > I_{eff}$
10	GHAVAMI -BTDG-HD		<b>2,37</b>	Bambus mit Epoxidharz-Beschichtung und Aufbeton. Große Halmquerschnitte ( $D \approx 12\text{cm}$ ) daher $I_{input}$ groß. Die Halme wurden der Länge nach halbiert, daher ist die erforderliche Halmanzahl um 50% reduziert (Nutzung beider Hälften).
11	GHAVAMI -BTDG-ED		<b>2,64</b>	Bambus mit Epoxidharz-Beschichtung und Aufbeton. Große Halmquerschnitte ( $D \approx 11\text{cm}$ ). Ganze Halme, Nodium vollständig, Internodien der Länge nach halbiert, dadurch $I_{input}$ sehr groß.
12	ZRS-TSM -SCHOOL		<b>3,57</b>	Verdübelung alle 30 cm, Spannweite 5,50 m. Nutzung des Steinerschen Anteils rechnerisch zu 40 %. (Dem Verfasser liegen keine experimentell validierten Werte vor.)
13	1x LBL-Profil 7,8x23,4 cm		<b>3,15</b>	Großer Aufwand an Leim und Bambushalmen. Beliebige Größe des Querschnitts möglich, Sekundärtragwerk erforderlich, um Deckenplatte zu schließen.
14	2x LBL-Profil 6,6x19,7 cm		<b>2,23</b>	Enormer Aufwand an Leim und Bambushalmen. Beliebige Größe des Querschnitts möglich, geringes Sekundärtragwerk erforderlich, um Deckenplatte zu schließen.

Tab. 23: Prüfkörper (Nr. 1 – 7) aus Kapitel 8 und Deckenkonstruktionen anderer Forschungsarbeiten (Nr. 8 – 14) aus Kapitel 6.

<sup>57</sup> Guzman, 2007 (26)

<sup>58</sup> Ghavami, 2009 (57)

<sup>59</sup> Ziegert-Seiler, 2011 (27)

### 9.1.5 Auswertung der Gegenüberstellung

Die betrachteten Deckentragwerks-Typen weisen deutliche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit auf, aus dem eingesetzten Halmmaterial Biegesteifigkeit zu generieren. Der Koeffizient des Flächenträgheitsmoments ( $k_I$ -Wert) beschreibt den Faktor um den das wirksame Flächenträgheitsmoment der eingesetzten Halme mittels der Tragwerkstypologie gesteigert wird. Der Wert zeigt die Tragwerks-Effizienz an. Ein hoher  $k_I$ - Wert bedeutet also einen geringen Halmaufwand, was einen Beitrag zu ressourcenschonendem Bauen darstellt.

Die Leistungsfähigkeit der betrachteten Deckentragwerke lässt sich anhand dreier grundlegender Parameter erklären:

#### 1. Tragwerkshöhe

Für das Flächenträgheitsmoment kommt die wirksame Tragwerkshöhe in dritter Potenz zur Geltung ( $I = b \cdot h^3/12$ ). Die Bauteilhöhe ist daher entscheidend für die Biegesteifigkeit des Deckenelements. Eine im Rahmen der Nutzung vertretbare statische Höhe sollte für einen effizienten Materialeinsatz angestrebt werden.

#### 2. Tragwerksform

Die günstigste Ausnutzung des Materials lässt sich bei einem anisotropen Material wie Bambus durch einen kongruenten Verlauf von Fasern und Hauptspannungslinien erreichen. Die Orientierung der Halme – und damit die Trägerform – sind also von größter Bedeutung und haben Auswirkung auf die auftretenden Schnittgrößen am Halm (vgl. Kapitel 7.4).

#### 3. Fügeprinzip

Inwieweit die auftretenden Kräfte verformungsarm aufgenommen werden können, hängt schließlich von der Art der Fügeprinzipien ab. Die Eignung der Fügeprinzipien ist direkt aus den mikro- und makrostrukturellen Eigenschaften des Bambusmaterials ableitbar (vgl. Kapitel 4 und 5).

An den Prüfkörpern *PK375-U*, *PK400-U1* und *PK400-U2* betrug der  $k_I$ -Wert etwa 7. Die Bedeutung der genannten Parameter lässt sich im Folgenden klar belegen:

#### 1. gesteigerte Tragwerkshöhe ( $l/15$ )

Für Geschossdecken ist die gewählte Tragwerkshöhe verhältnismäßig groß, doch auf die Wirtschaftlichkeit hat sie nur dann negative Auswirkungen, wenn eine Begrenzung der Geschosshöhen eine Rolle spielt.

#### 2. optimierte Tragwerksform (Seil + Druckstab)

Im Bambusmaterial treten ausschließlich Normalkräfte auf, welche optimal übertragen werden können. Der hohe E-Modul von Bambus in Faserrichtung kann dabei über die volle Länge des Bauteils zur Wirkung gelangen.

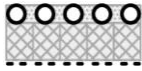
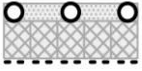
#### 3. optimales Fügeprinzip (Leim + Stirnkontakt)

Großflächige Leimverbindung (Zug) und vollflächiger Stirnkontakt (Druck) können die maximale Festigkeit des Bambusmaterials ausschöpfen und bieten dabei extrem geringe Verformung.

Dagegen werden bei *PK230-4x1*, *GUZMANN-Bn2*, und *GUZMANN-Bc1* die Mängel in der Tragwerksform und den Fügeprinzipien deutlich, was sich entsprechend in der Leistungsfähigkeit der Deckentragwerke ablesen lässt: Der  $k_I$ -Wert sinkt folglich unter die Grenze von 1,0.

Auffällig hoch ist bei *PK400-U3* der  $k_I$ -Wert von 7,28. Trotz des mangelhaften Fügeprinzips (Druck- und Zug quer zur Holzfaser) wird im Vergleich zu den eingesetzten Halmen die größte Steigerung des effektiven Flächenträgheitsmoments erzielt. Die Verformung war zwar stärker als bei *PK400-U1* und *PK400-U2*, die Gesamtzahl der verwendeten Halme dagegen deutlich geringer. Der eigentliche Unterschied aber war, dass bei *PK400-U3* weniger Druckstäbe eingesetzt wurden. Die Querschnittsfläche in der Unterspannung war dagegen gleichgroß.

Stellt man bei *PK400-U3* das eingesetzte Bambusmaterial in Druck- und Zugzone gegenüber, zeigt sich, dass sich die Querschnittsflächen gleichmäßiger gegenüberstanden und damit besser ausgenutzt wurden. Bei *PK400-U1* und *PK400-U2* hingegen war deutlich mehr Material in der Druckzone eingesetzt, was eine entsprechend geringere Ausnutzung zur Folge haben musste (Tab. 24).

Materialverteilung	PK400-U1 PK400-U2	PK400-U3
<b>Druckzone</b> Halmanzahl der Druckstäbe	5,00	3,00
		
<b>Zugzone</b> 10 Streifen aus je 1/6 Halm. $10/6 = 1,66$ Halme	1,66	1,66
<b>Materialverhältnis von Druck/Zugzone</b>	<b>3,00</b>	<b>1,80</b>

Tab. 24: Die gleichmäßigere Verteilung von Halmmaterial in der Druck- und Zugzone brachte eine günstigere Ausnutzung des Bambusmaterials und führten zum hohen  $k_I$ -Wert bei *PK400-U3*.

*PK400-U3* kann daher trotz seines verfrühten Versagens einen Hinweis auf eine mögliche Effizienzsteigerung im Materialaufwand geben:

⇒ *Es sollte im Querschnitt der Druck- und Zugzone möglichst gleichviel Bambus-Material zum Einsatz kommen.*

Die Abwicklung des Halmumfangs kann beschrieben werden mit:  $U = \pi \cdot D$ . Folglich sollten die Zugstreifen (Halmabwicklung) möglichst dicht aneinander liegen, die Druckstäbe jedoch mit einem Abstand von  $\pi \cdot D$  angeordnet sein.

Wie am Beispiel der Holzquerpressung bei *PK400-U3* gesehen, spielt die jeweilige Festigkeit der beteiligten Materialien (Holz) die entscheidende Rolle für die Tragfähigkeit. Dieser Optimierungsansatz ist also nur unter Vorbehalt anwendbar.

## 10 Lasttragende Wandelemente aus Bambus

Auch wenn diese Arbeit Deckenelemente behandelt, soll doch ein Ausblick auf mögliche tragende Wandelemente gewagt werden. Es soll zunächst davon ausgegangen werden, dass etwaige Wandelemente in Anlehnung an die gängige Holzrahmenbauweise erstellt werden können (Abb. 157). Ähnliche vorgefertigte Wandelemente aus Bambus sind in Kolumbien unter dem Begriff „Bahareque“ bekannter Standard (Abb. 150). Für die Bahareque-Bauweise werden Holzschwellen und Bambusständer verwendet. Die befestigten Bambusmatten dienen als Putzträger. Der Ständerabstand beträgt 30 – 50 cm. Es werden gewöhnlich Deckenbalken aus Holz verwendet (13). Nach der Richtlinie für erdbebensicheres Bauen (NSR-98) sind zweigeschossige Gebäude in dieser Ausführung in Kolumbien zulässig (31).

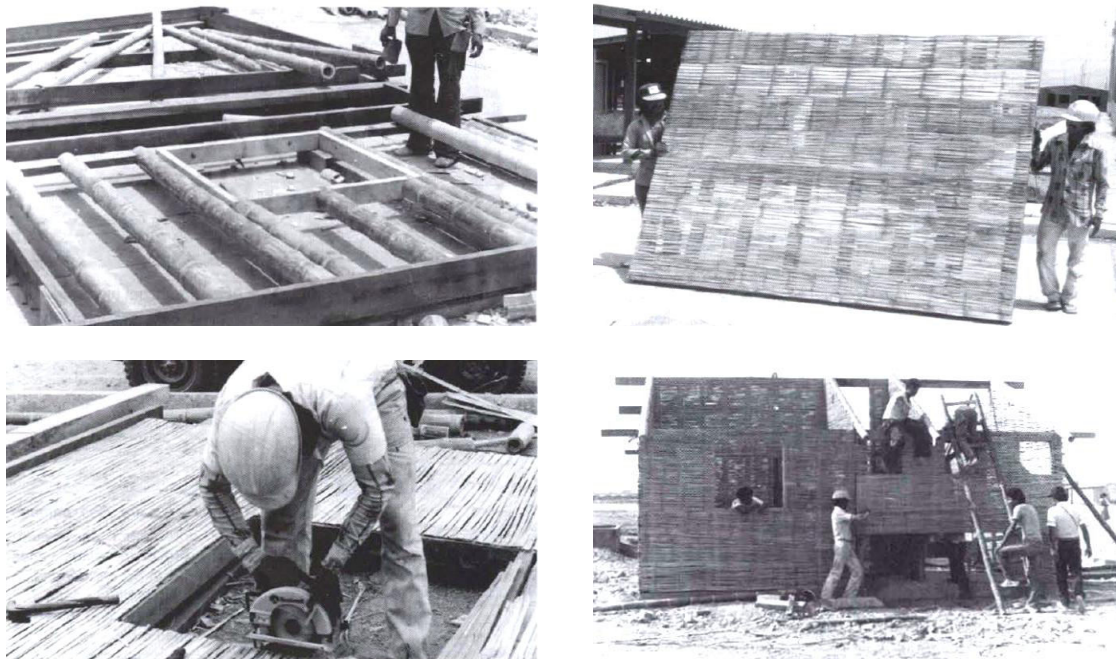


Abb. 150: Vorfertigung von Wandelementen aus Bambus und Holz in Kolumbien (1983). Die Wandelemente ergeben eingeschossige Häuser und werden anschließend verputzt (Bilder nach Hidalgo-Lopez (13)).

Diese lasttragenden Wandelemente könnten auch für deutlich höhere Gebäude genutzt werden. Durch eine Reduzierung der Ständerabstände lassen sich die absolut übertragbaren Druckkräfte entsprechend steigern. In Abschnitt 2.4.3 wurde das Knicken schmaler Bambushalme erwähnt. Ein Halm mit Querschnitt 70/7 kann entsprechend der Knickspannungslinie mit einer Druckkraft von 16,6 kN belastet werden, wie das Rechenbeispiel<sup>60</sup> gezeigt hat. Auf einen Meter Wandlänge können maximal 14 Halme der bezeichneten Größe ( $D = 7 \text{ cm}$ ) nebeneinander angeordnet werden. Damit könnte die Wand Lasten von 232,4 kN/m aufnehmen. Wenn pro Geschoss Lasten von 30 kN/m auf die Wand einwirken, könnten auf diese Art Gebäude mit bis zu sieben Obergeschossen ermöglicht werden.

Durch doppelte Halmreihen oder die Verwendung dickerer Halme wären sogar noch bedeutend höhere Gebäude möglich. Gewiss wären noch zusätzliche Sicherheiten auf der Materialseite einzubeziehen, doch könnten entsprechende Einbausituationen helfen, die effektiven Knicklängen zu reduzieren und damit die ausnutzbaren Festigkeiten zu erhöhen.

<sup>60</sup> Werte aus Beispielrechnung:  $i = 2,24 \text{ cm}$ ;  $s_k = 250 \text{ cm}$ ;  $\lambda = 112$ ;  $6_k = 12 \text{ Mpa}$ ;  $A = 1390 \text{ mm}^2$

Um etwaige Möglichkeiten einer konstruktiven Reduzierung der Knicklänge zu überprüfen, wurden zwei Typen von Wandtestkörpern experimentell untersucht. Sie bestanden jeweils aus zehn extrem schlanken Halmen ( $\lambda \approx 150$ ), welche in Doppelreihung auf verschiedene Weise verbunden waren (Abb. 151 und Abb. 153).

### 10.1 Wand-Typ 1

Für den ersten Wand-Typ wurden die Halme mit drei hölzernen Abstandshaltern in eine linsenförmige Krümmung gebracht. Jeweils zwei gegenüberliegende Halme wurden mittels einer 8-förmigen Schlinge aneinander befestigt. Durch diese Anordnung sollten sich die Halme gegenseitig am Ausknicken um die Wandachse hindern. In der Mittelebene der Wand waren als weitere Knickhalterung zwei OSB-Platten eingefügt. Die Platten waren mit einer Langlochverbindung am Fuß der Wand gefügt und konnten daher nicht am Übertrag der Druckkräfte mitwirken (Abb. 151). Der Versuchsaufbau ließ folgende Beobachtungen zu:

- Bei besonders dicken Halmen ist für das Einzwängen in die Linsenform ein erhebliches Biegemoment nötig, daher ist diese Methode eher für schlanke Halme geeignet.
- Die sich jeweils gegenüberliegenden Halme sollten gleich steif sein und mit gleicher Orientierung der Halmenden eingebaut werden, um keine Asymmetrien zu erzeugen.
- Alle Halme müssen gleichmäßig stark gebunden sein. Je lockerer die Bindung ist, desto stärker weicht der betreffende Halm unter Last aus, bis die Bindung hält. Damit ziehen die am stärksten gebundenen Halme die Last stärker an und versagen folglich früher.
- Die Stirnflächen der Halme müssen entsprechend der Tangentiallinie ihrer Krümmung im Schwellenbereich auf Hirnholz treffen.
- Die zu erwartenden Knickfestigkeit der schlanken Bambushalme und die Druckfestigkeit von Holz in Faserrichtung besitzen etwa die gleiche Größenordnung (etwa 10 bis 15 MPa) und sind somit gut kompatibel.

Der Versuch erbrachte eine bedeutend höhere Knickspannung, als es die Knickspannungskurve für eine Schlankheit von  $\lambda = 144$  hätte erwarten lassen. Mit 16,5 MPa war die Knickspannung eher einer Schlankheit von  $\lambda \approx 80$  zuzuordnen (Abb. 20). Effektiv kommt dies fast einer Halbierung der Knicklänge gleich. Solch konstruktive Halterung der Halme wird umso wichtiger und sinnvoller, je schlanker die Stäbe sind.

### 10.2 Wand-Typ 2

Mittels Dübeln untereinander befestigt sollten die Halme in Summe eine Verbundwirkung entwickeln und damit – so die Überlegung – in der Art nachgiebig verbundener Querschnitte die Knicksteifigkeit des Wandbauteils steigern. Dazu wurden die Halme beidseitig mit Dübeln in X-förmiger Anordnung an vier horizontalen Latten befestigt. Im Bereich der Schwellhölzer wurden Holzklötze mit Hirnholzkontakt zu den Bambus-Stirnflächen angeordnet. Vorbild für die Konstruktionsweise war eine Abwandlung des Systems der Vierbund-Stützen, welche in vielen Bambuskonstruktionen verwendet wird (Abb. 155).

Es zeigte sich aber, dass die Verbindung mehrerer Halme durch Dübel mit 10,1 MPa keine Steigerung der Knickspannung herbeiführen konnte. Ganz im Gegenteil, es wurde erneut die schädigende Wirkung der Dübel deutlich: Das Aufreißen der Halme beim Knicken ging an jeder Stelle von den Dübellöchern aus.



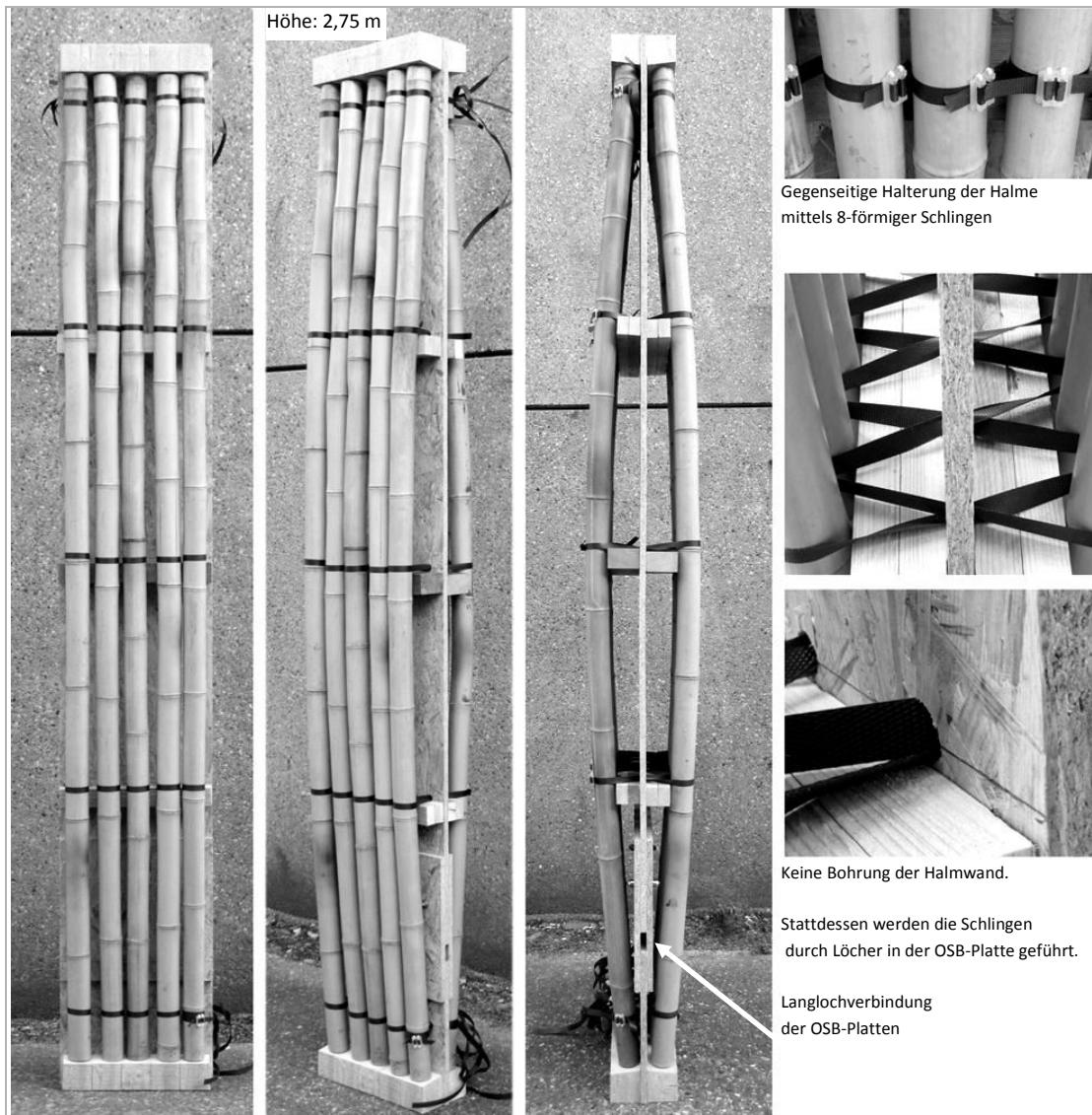


Abb. 151: Wand-Typ 1 mit linsenförmiger Stabanordnung unter Verwendung von Abstandshaltern und Schnürung.

### Wand-Typ 1

Zehn Halme in linsenförmiger Anordnung.

Versagen durch lokales Halmwandknicken bzw. Aufplatzen einzelner Internodien, anschließendes Ausweichen des Wandbauteils

Hirnholzkontakt von Bambus und Holz an Schwellen

Höhe	2,75 m
mittlere Halmgeometrie	58/7,3 mm
mittlere Schlankheit	$\lambda = 144$
Knicklast	$F = 190 \text{ kN}$
Gesamtquerschnittsfläche	$A = 115 \text{ cm}^2$
Knickspannung	$\sigma_k = 16,5 \text{ MPa}$
Länge der Wand	0,4 m
Lastkapazität	475 kN/m

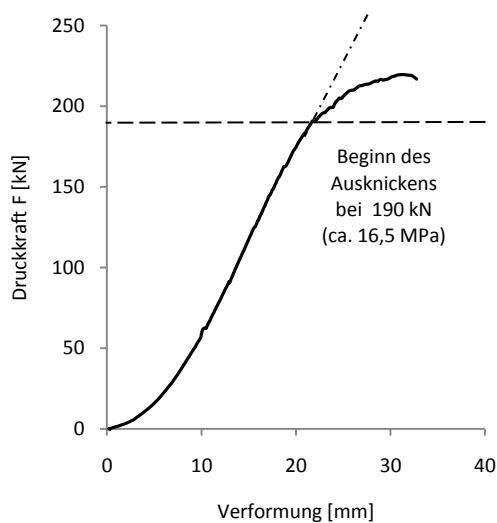


Abb. 152: Wand-Typ 1, Ergebnisse des Drucktests.

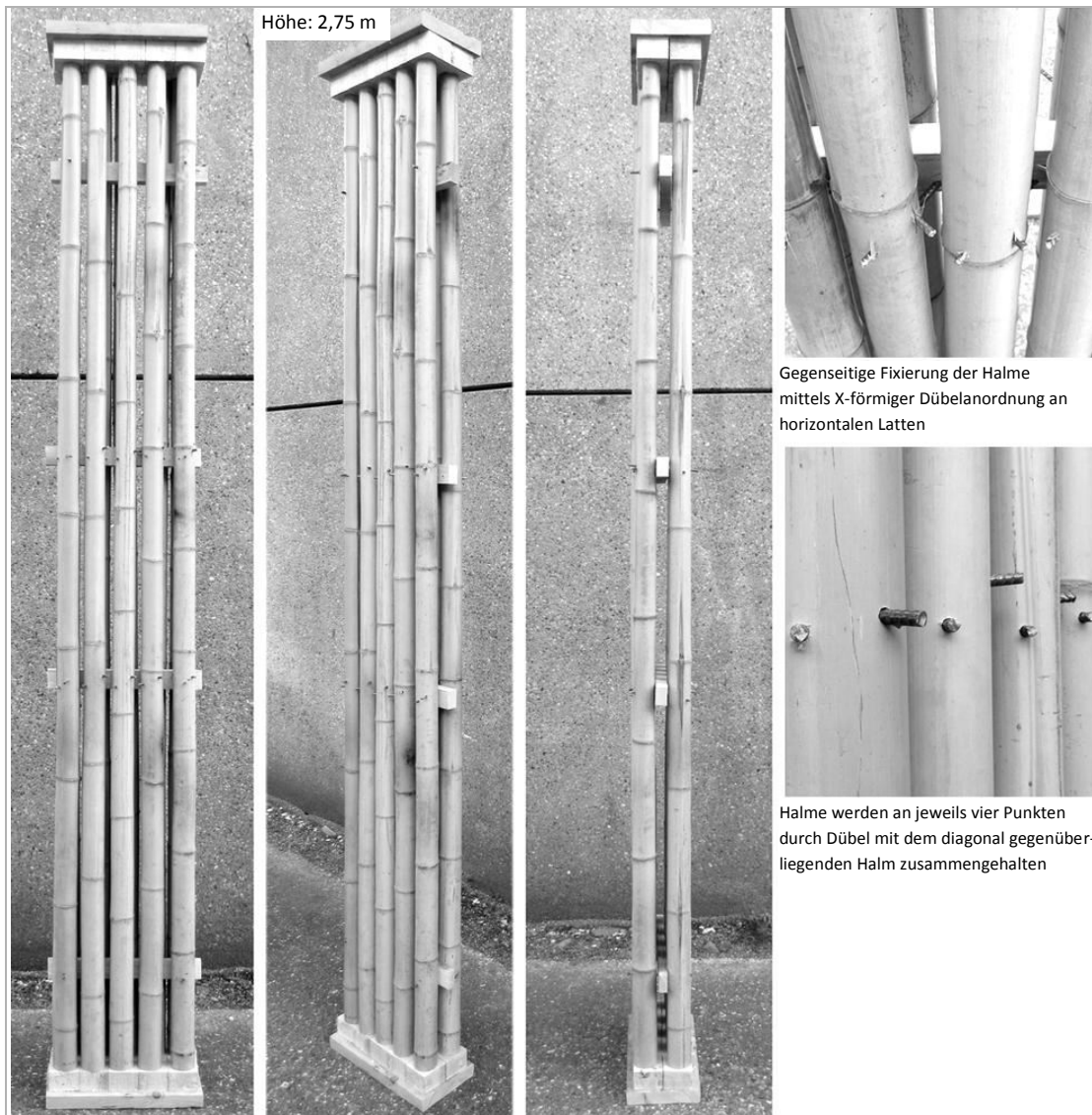


Abb. 153: Wand-Typ 2 mit paralleler Stabanordnung.

### Wand-Typ 2

Zehn Halme in paralleler Anordnung.

Versagen durch Ausweichen des Wandbauteils und Aufreißen mehrerer Internodien. Die Schäden im Halmmantel gehen von den Dübeln aus!

Hirnholzkontakt von Bambus und Holz an Schwellen

Höhe:	2,75 m
mittlere Halmgeometrie:	56/5,4 mm
mittlere Schlankheit:	$\lambda = 151$
Knicklast:	$F = 90 \text{ kN}$
Gesamtquerschnittsfläche	$A = 88 \text{ cm}^2$
Knickspannung:	$\sigma_k = 10,1 \text{ MPa}$
Länge der Wand	0,4 m
Lastkapazität	225 kN/m

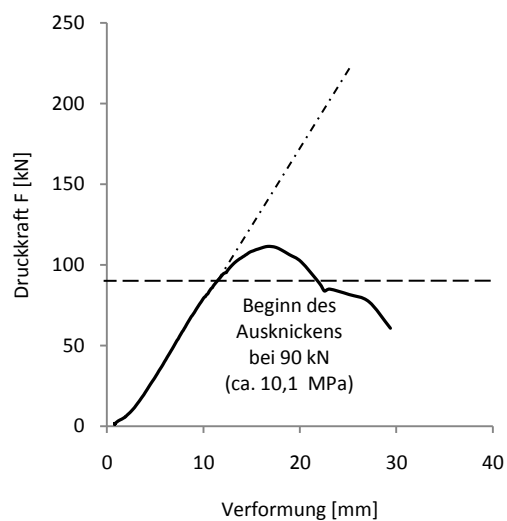


Abb. 154: Wand-Typ 2, Ergebnisse des Drucktests.

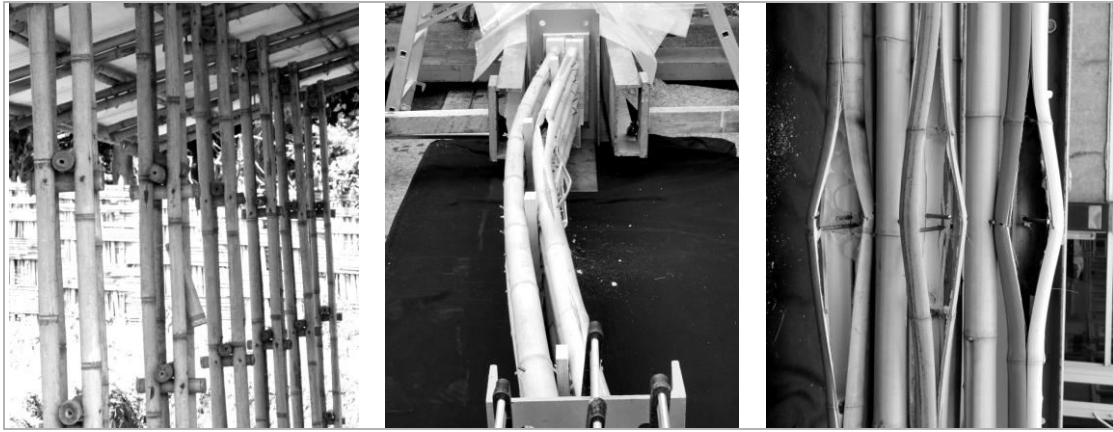


Abb. 155: Vorbild für den Wand-Typ 2 war eine Reihe von Vierbund-Stützen (links). Knicken von Wand-Typ 2 bei einer Last von 90 – 110 kN (mittig). Der Schaden geht von Dübellöchern aus (rechts).

### 10.3 Fazit

Die Versuche zeigen, dass die Konstruktion von mehrgeschossigen Gebäuden mit Wänden aus Bambushalmen ohne Probleme realisierbar wäre. Die Halme können in der Wand so dicht wie nötig angeordnet werden und damit die Aufnahme größerer Lasten ermöglichen. Ob in einreihiger Anordnung, doppelreihig oder linsenförmig – die Gestalt der Wand ist abhängig von den auftretenden Belastungen. Durch geeignete Halterung und Wandausformung kann selbst bei relativ dünnen Halmen die Schlankheit begrenzt und eine höhere Knickspannung erreicht werden.

Die Frage der Horizontalaussteifung von Gebäuden bedarf allerdings einer weiteren Klärung. Denkbar wären Diagonalen aus Stahl in der Art von Windrispenbändern, welche in die Wandelemente integriert eine Scheibenwirkung erzeugen könnten.

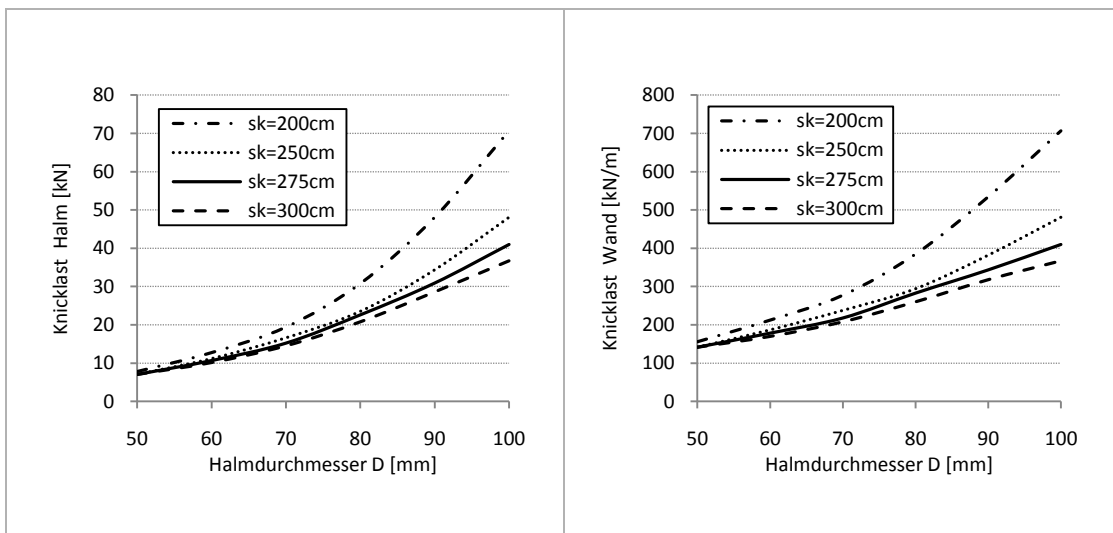


Abb. 156: Knicklasten Druckbeanspruchter Bambusbauteile errechnet nach der Knickspannungskurve von *Atrops* (14) (links). Maximale Druckkraft für Wände mit entsprechenden Halmen einfach gereiht (rechts).

# 11 Konzept einer mehrgeschossigen Bauweise aus Bambus

Aus den Erkenntnissen und Forderungen der bisherigen Abhandlung lässt sich ein Konstruktionsprinzip mit folgenden Eigenschaften ableiten:

- Die Konstruktionsweise sollte in modularer Art dem Holztafelbau ähneln.
- Die Elemente mit ihren Modulrändern und Auflagern sollten exakt definierten Abmessungen entsprechen.
- Das Tragsystem der Decke sollte ein unterspannter Träger mit kontinuierlicher Stützung des Obergurts sein.
- Aus den Fügeprinzipien sollten für Bambus ausschließlich Normalkraftbeanspruchungen resultieren.
- Zugkräfte sollten mittels großflächiger Leimverbindungen übertragen werden.
- Die Fügeprinzipien sollten sich nur auf die Stirnflächen der Bambushalme beziehen, da nur so die Varianzen der Halmgeometrie umgangen werden können.

Unter konsequenter Beachtung dieser Leitsätze ergibt sich das folgende Konstruktionsprinzip für eine vorgefertigte, mehrgeschossige Bauweise aus Bambus. Das in Abb. 157 gezeigte Prinzip der Deckenkonstruktion folgt im Wesentlichen PK400-U. Die dargestellten Wand-Elemente besitzen eine einreihige Halmstellung. (Die horizontale Aussteifung aus Windrispenbändern ist nicht dargestellt.)

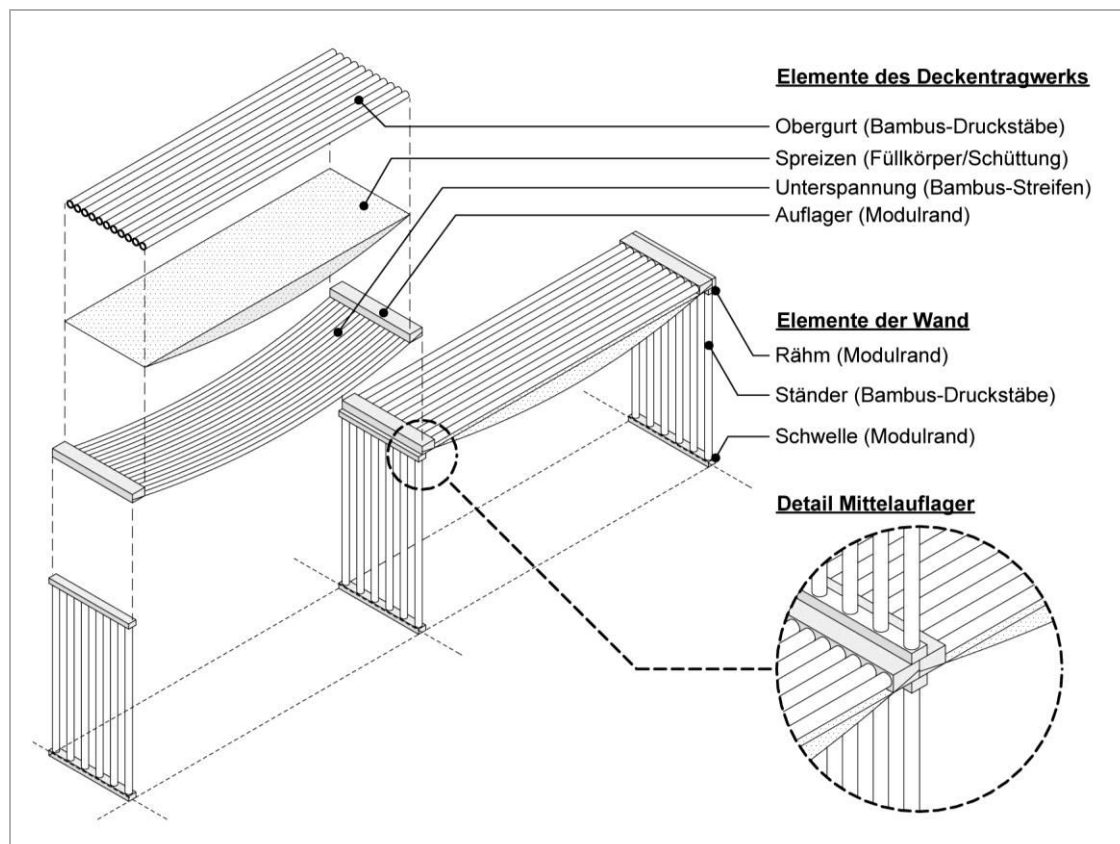


Abb. 157: Konstruktionsprinzip einer mehrgeschossigen Bauweise aus Bambus.

## 11.1 Materialbedarf

### 11.1.1 Mindestquerschnitte

Nach den experimentellen Untersuchungen soll nun für das in der Zielsetzung formulierte Deckentragwerk eine Bemessung der erforderlichen Mindestquerschnitte vorgenommen werden. Dazu wird zunächst das Eigengewicht der Deckenkonstruktion ermittelt. Die mittlere Rohdichte der Halmwand liegt bei 6 bis 8 kN/m<sup>3</sup>. Ein Halm mit einem Querschnitt 70/7 mm besitzt eine Masse von ca. 1 kg/m. Für das Deckenelement ergibt sich ein Eigengewicht von  $g = 3 \text{ kN/m}^2$  (Tab. 25).

Die maximale Nutzlast soll  $p = 5 \text{ kN/m}^2$  betragen. Auf der Lastseite wird ein Sicherheitsfaktor von  $\gamma = 1,4$  veranschlagt. Daraus ergibt sich eine Bemessungs-Last von  $q_d = 11,2 \text{ kN/m}^2$ . Die Spannweite beträgt  $l = 4 \text{ m}$ , der mittige Stich hat eine Höhe von  $f = 26 \text{ cm}$ .

Als mögliche Grenze der Belastbarkeit kommt das Übersteigen einer oder mehrerer der folgenden Festigkeiten infrage:

1. Druckfestigkeit der Bambus-Druckstäbe ( $f_{c,0,k,Bambus}$ ),
2. Druckfestigkeit des Holzes im Bambus-Kontaktbereich am Auflager ( $f_{c,o,k,Holz}$ ),
3. Scherfestigkeit des Holzes im Bereich der Leimfuge ( $f_{v,k,Holz}$ ),
4. Scherfestigkeit des Bambus im Bereich der Leimfuge ( $f_{v,k,Bambus}$ ),
5. Zugfestigkeit der Bambusstreifen im Bereich des reduzierten Querschnitts durch die geebnete Innenseite ( $f_{t,0,k,Bambus}$ ).

Bei gegebenen Materialfestigkeiten spielt die Größe der kraftübertragenden Fläche die entscheidende Rolle. Die erforderlichen Größen von Kontaktflächen und Querschnitten ergeben sich aus der Gegenüberstellung der resultierenden Kräfte mit den vorhandenen Festigkeiten.

$$\frac{F_d}{f_k} = A_{\text{erf}}$$

Am Auflager resultieren daraus folgende Kräfte (vgl. Abb. 158, Tab. 26).

Für die einzelnen Elemente des Deckenelements ergeben sich daraus folgende Mindestquerschnitte in den Kontaktbereichen (Tab. 27).

Bei den charakteristischen Festigkeiten zeigt sich, dass die Holzfestigkeit am Auflagerklotz die limitierende Größe darstellt. Dies wird auch aus den Versuchsergebnissen deutlich. Für einen statischen Nachweis des Deckenelements ist dies ein großer Vorteil, da auf bekannte Holzfestigkeiten zurückgegriffen werden kann. Bei den Bambusfestigkeiten spielt nur die Zugfestigkeit der Streifenschar eine Rolle. Die verwendeten Ansätze der Zugfestigkeit (35 MPa) sind jedoch weit unterhalb der Bruchspannung des Bambusmaterials (83 bis 335 MPa). Die Kontaktfläche von Druckstäben und Auflagerhölzern ( $A_\phi$ ) muss mindestens 84 cm<sup>2</sup> betragen. Die Leimfuge sollte mindestens 902 cm<sup>2</sup> groß sein. Für die geebneten Bambusstreifen kann eine Dicke des verbleibenden Restquerschnitts von 4 mm angenommen werden.

Deckenbauteil 1 x 4 m	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>V</i>	<i>p</i>	<b>G</b> (4m <sup>2</sup> )	<b>g</b> (1 m <sup>2</sup> )
	[m]	[m]	[m]	[Stk]	[m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/4m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Bambusdruckstäbe	3,76			6			0,23	0,057
Streifenschar	4,05	0,63	0,007		0,015	7,00	0,10	0,025
Auflagerhölzer	0,15	1,00	0,080	2	0,024	5,00	0,12	0,030
Leichtlehm-Füllkörper <sup>61</sup>	3,76	1,00	0,230	40	0,577	10,00	5,77	1,443
Schüttung <sup>62</sup>	3,76	1,00	0,057	1	0,213	14,00	3,00	0,750
Fußbodenaufbau (pauschal)	4,00	1,00	0,050	1	0,200	13,00	2,60	0,650
<b>Summe</b>							<b>≈12,00</b>	<b>≈3,00</b>

Tab. 25: Ermittlung des Eigengewichts eines 1 m breiten Streifens der Deckenkonstruktion.

<i>l</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	$\gamma$	<i>q<sub>d</sub></i>	<i>A<sub>V,d</sub></i>	<i>A<sub>H,d</sub></i>	<i>F<sub>BS,d</sub></i>	<i>F<sub>gl1,d</sub></i>
[m]	[m]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]		[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
4,0	0,26	3,0	5,0	8,0	1,4	11,2	<b>22,4</b>	<b>84,0</b>	<b>86,9</b>	<b>81,2</b>

Tab. 26: Deckenstreifen von 1 m Breite: Abmessungen, Lasten und resultierende Kräfte am Auflager.

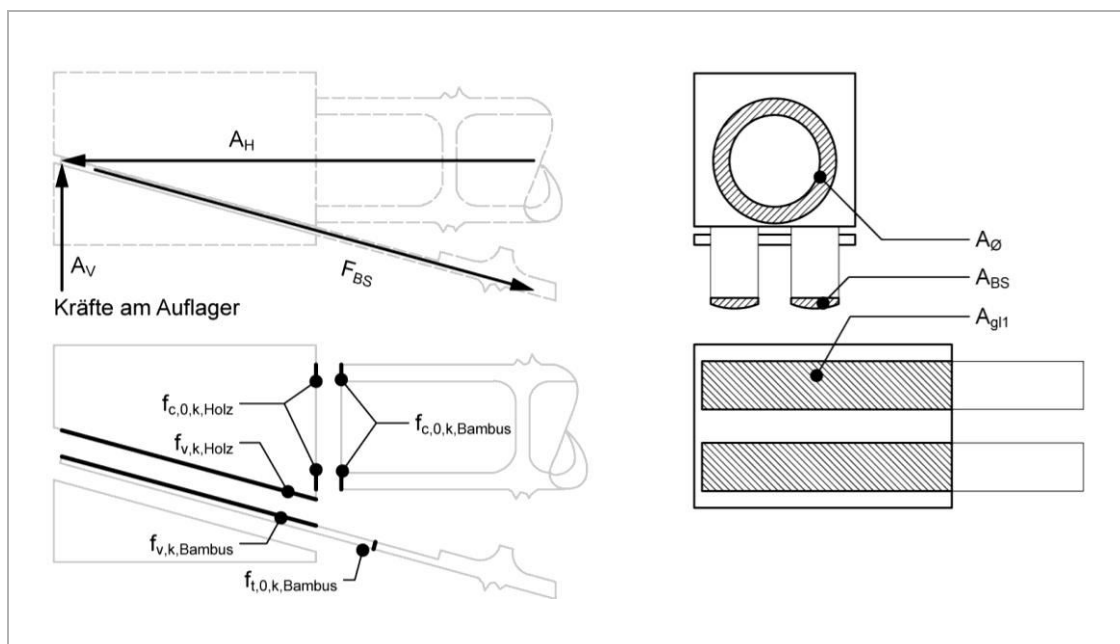


Abb. 158: Relevante Kräfte, Festigkeiten und Kontaktflächen am Auflager.

Position	Kraft <i>F<sub>d</sub></i>		Festigkeit <i>f<sub>k</sub></i>		Erforderliche Fläche <i>A<sub>erf</sub></i>	
		[kN]		[MPa]		[cm <sup>2</sup> ]
Bambus-Druckstäbe	<i>A<sub>H,d</sub></i>	84,0	<i>f<sub>c,0,k,Bambus</sub></i>	(*) 28,0	<i>A<sub>Ø</sub></i>	30,0
Hirnholz Auflagerklotz	<i>A<sub>H,d</sub></i>	84,0	<i>f<sub>c,0,k,Holz</sub></i>	10,0		<b>84,0</b>
Leimfläche Holz	<i>F<sub>gl1,d</sub></i>	81,2	<i>f<sub>v,k,Holz</sub></i>	0,9	<i>A<sub>gl1</sub></i>	<b>902,0</b>
Leimfläche Bambus	<i>F<sub>gl1,d</sub></i>	81,2	<i>f<sub>v,k,Bambus</sub></i>	(*) 4,0		203,0
Bambusstreifen	<i>F<sub>BS,d</sub></i>	86,9	<i>f<sub>t,0,k,Bambus</sub></i>	(*) 35,0	<i>A<sub>BS</sub></i>	<b>24,8</b>

Tab. 27: Ermittlung der erforderlichen Kontaktflächen. Der größere Wert der jeweiligen Fläche ist maßgeblich. (\*) charakteristische Festigkeiten von Bambus nach Trujillo (2007) (12).

<sup>61</sup> 0,23 m zwischen Bambushalm und Unterspannung.

<sup>62</sup> Schütthöhe 8 cm, abzüglich Halmvolumen

Die erforderliche Gesamtbreite der Bambusstreifen auf 1 m Deckenbreite beträgt folglich:

$$b = \frac{A_{BS}}{t} = \frac{24,8 \text{ cm}^2}{0,4 \text{ cm}} = 62 \text{ cm}$$

Das entspricht einer Belegung von etwa zwei Dritteln der Deckenstreifenbreite mit Bambusstreifen, was angesichts der variierenden Bambusstreifenbreiten als realistische Obergrenze angesehen werden kann, (vergleichbar mit der Ausführung von PK400-U1). Für die Herstellung der Streifen sind sechs schmale (obere) Halm-Abschnitte 40/4 erforderlich:

$$x = \frac{b}{\pi \cdot D} = \frac{62 \text{ cm}}{\pi \cdot 4 \text{ cm}} = 6 \text{ Halme } 40/4$$

Die erforderliche Länge der Leimfuge beträgt:

$$a_{gl} = \frac{A_{gl1}}{b} = \frac{902 \text{ cm}^2}{62 \text{ cm}} = 14,6 \text{ cm}$$

Wird für die Druckstäbe eine Größe von 70/7 angesetzt, ist pro Halm eine Querschnittsfläche von 13,9 cm<sup>2</sup> vorhanden. Es folgt hieraus eine Halm-Mindestanzahl von:

$$x = \frac{84 \text{ cm}^2}{13,9 \text{ cm}^2} = 6 \text{ Halme } 70/7$$

Alternativ wäre eine entsprechend größere Anzahl kleinerer Halme mit gleichem Gesamtquerschnitt denkbar.

### 11.1.2 Leichtlehm-Füllkörper

Die Nutzlast von 5 kN/m<sup>2</sup> entspricht einer äußerst geringen mechanischen Spannung von nur 0,005 MPa. Diese wirkt vertikal auf die Füllkörper ein. Die Füllkörper aus Leichtlehm können daher auch mit vergleichsweise geringer Rohdichte hergestellt werden. Eine Rohdichte von 600 kg/m<sup>3</sup> besitzt noch ausreichend Steifigkeit, um die flächigen Nutzlasten auf die Seilschar ohne merkliche Verformung abzuleiten.

Zur Generierung geringerer Rohdichten kann dem Leichtlehm mehr Stroh und dafür weniger Lehm beigemischt werden. Für 4 m<sup>2</sup> Bambus-Geschossdecke wird ein Füllkörper-Volumen von 0,60 m<sup>3</sup> benötigt. Dafür sind 50 kg Stroh und 310 kg Lehm erforderlich. Diese Lehmmenge entspricht 0,2 m<sup>3</sup> Aushub (Tab. 28).

Leichtlehm-Füllkörper	Menge für 4 m <sup>2</sup>	Menge für 1 m <sup>2</sup>
Füllkörper-Volumen	0,60 m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>
Masse der Leichtlehm-Füllkörper (600 kg/m <sup>3</sup> )	360 kg	90,0 kg
(davon Lehm) entspricht 0,2 m <sup>3</sup> Lehmaushub	310 kg	77,5 kg
(davon Stroh) entspricht 0,4 m <sup>3</sup> mäßig verdichteten Strohbällen	50 kg	12,5 kg

Tab. 28: Massenermittlung der Leichtlehm-Füllkörper.

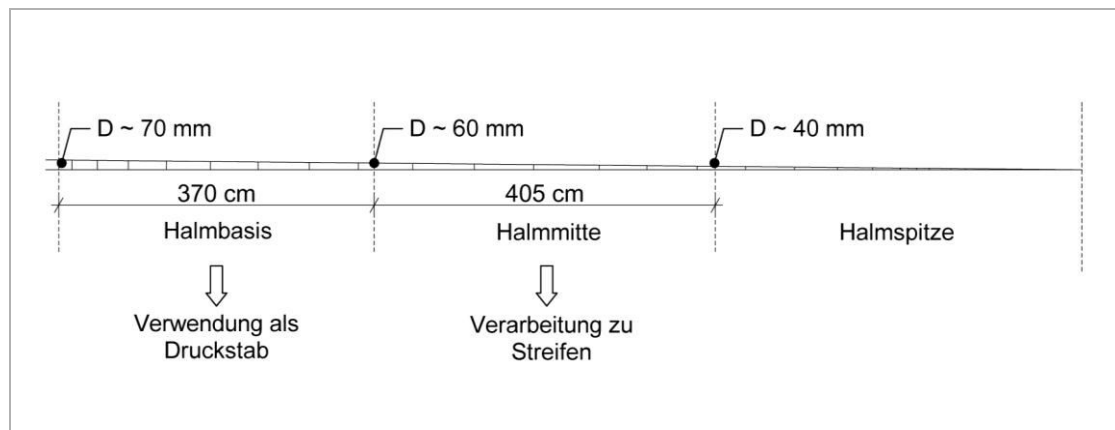


Abb. 159: Mindestabmessungen eines Halmes, damit Druck- und Zugelemente aus einem Halm gewonnen werden können.

### 11.1.3 Benötigte Menge an Bambushalmen

Die benötigte Anzahl von Bambushalmen zur Erstellung der Deckenkonstruktion hängt von Durchmesser und Länge der Halme ab. Wenn ein Halm von 70/7 mit 12 m Gesamtlänge vorausgesetzt wird, können die unteren zwei Drittel (8 m) davon strukturell verwendet werden. Die Wipfelbereiche des Halmes sind zu schmal, um in der derzeitigen Deckenkonstruktion eingesetzt zu werden. Vom dickeren Halmansatz an können Abschnitte von 3,70 m Länge als Druckstab verwendet werden. Die Bereiche der Halmmittle darüber können zu Streifen von 4,05 m Länge verarbeitet werden. Die nutzbare Halmlänge muss somit mindestens 7,75 m betragen und einen Durchmesser von  $D > 70$  mm am dickeren Ende besitzen. Am dünneren Ende reicht ein Durchmesser von 40 mm zur Erstellung der Streifen noch aus. Druck- und Zugelemente können also aus einem Halm gewonnen werden (Abb. 159). Für die Deckenkonstruktion von 4 m Spannweite werden je 1 m Deckenbreite folgende Halmmengen benötigt:

- Druckstäbe: 6 Halm-Basisstücke, 3,70m Länge ( $D > 70$  mm)
- Streifen: 6 Halm-Mittelstücke, 4,05m Länge ( $D > 40$  mm) ( $6 \cdot \pi \cdot D > 62$  cm )

Sechs ganze Halme von 7,75 m Länge werden für vier Quadratmeter benötigt. Daraus resultiert ein Bambusbedarf von 11,63 m<sup>2</sup> oder 1,5 Halmen je Quadratmeter Deckenfläche.

### 11.1.4 Verringerung des Holzanteils

Die Notwendigkeit der Verwendung von Holz in einer Bambus-Geschosdecke darf durchaus hinterfragt werden. Es wäre ebenso möglich, verleimte Bambuslamellen (LBL) oder Scrimber-Profile für die Vollquerschnitte der Auflagerblöcke zu verwenden. Die Druckfestigkeit des Materials ist deutlich höher als die von Nadelholz (32). Folglich könnten kleinere Auflagerquerschnitte gewählt werden. Der höhere Materialpreis von LBL könnte durch einen reduzierten Materialbedarf kompensiert werden.

Zur Vereinfachung des späteren Einbaus wäre es günstig, die Auflagerklötze zu größeren Auflagerelementen zusammzusetzen. Die Verbindung könnte mittels flankierender Querhölzer geschehen, welche in wechselnder Orientierung (nach der Art von Brett-Sperrholz) oben und unten an die Auflagerklötze angeleimt werden (Abb. 160).



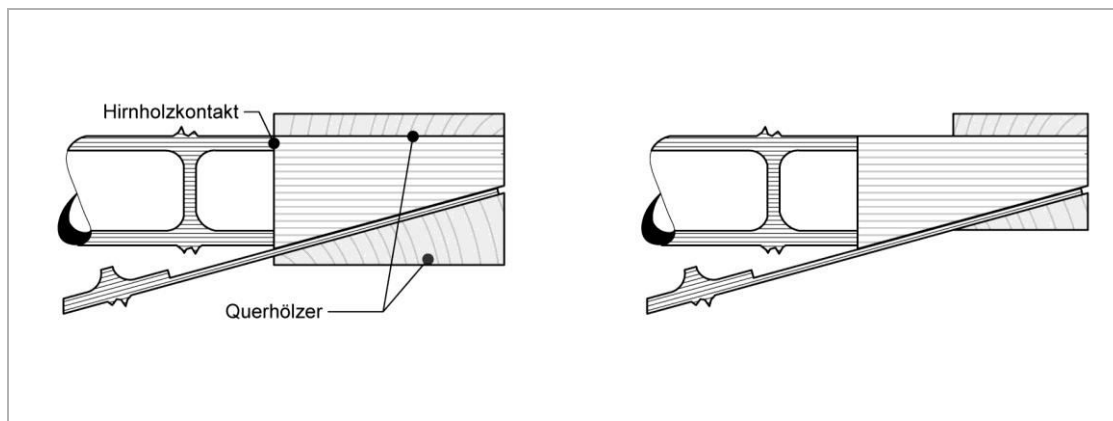


Abb. 160: Kombinierte Holzrichtungen an den Auflagern, links: Querhölzer fassen die einzelnen Auflagerklötze zu größeren Elementen zusammen, rechts: Vorschlag für reduzierten Holzaufwand.

## 11.2 Fertigung

Die Deckenelemente bestehen aus folgenden drei Grundkomponenten (Abb. 161):

### 1. Bambus-Druckstäbe

Aus Bambushalmen werden Abschnitte von exakt gleicher Länge mit planparallelen Stirnflächen herausgeschnitten. Eine synchron geführte Tandem-Kapp-Säge mit parallelen Sägeblättern und regelbarem Abstand ist hierfür von Vorteil.

### 2. Leichtlehm-Füllkörper

Die Herstellung der Füllkörper ist bereits im Zusammenhang mit PK400-U hinlänglich beschrieben worden (vgl. Kapitel 8.8.2.1). Besondere Maschinen werden hierfür nicht benötigt, wenngleich ein Rührwerk hilfreich sein kann. Sollte am Bauplatz kein Lehm zur Verfügung stehen, kann auch jeglicher andere Erdaushub in Säcken verwendet werden (vgl. PK375-U).

### 3. Bambus-Streifenschar

Bambushalme müssen zunächst auf die exakt gleiche Länge geschnitten und dann im Splitter der Länge nach gespalten werden. Die Streifenenden werden anschließend innenseitig geebnet. Alternativ zum Ebnen der Streifenenden kann der gesamte Streifen mittels eines „Slicers“ innenseitig geebnet werden<sup>63</sup>. Durch das tangentielle Spalten trennt der „Slicer“ Innen- und Außenzone der Bambusstreifen voneinander. Die Auflagerhölzer werden in drei Schichten verleimt, anschließend parallelrandig geschnitten, diagonal getrennt und an die Bambusstreifen geleimt (Abb. 160).

Für die serielle Fertigung können folgende Maschinen zum Einsatz kommen (Abb. 162):

- Tandem-Kapp-Säge (parallele Sägeblätter mit regelbarem Zwischenraum)
- „Splitter“ (Messer in radialer Anordnung mit oder ohne Motorvortrieb, durch die Halme axial gespalten werden.)
- Fräse, bzw. „Slicer“ zum Ebnen der Streifenenden

Das Verleimen der Bambusstreifen erfordert eine größere Präzision. Es muss eine gleichmäßige Belastung aller Streifen ermöglicht werden. Für die gleichmäßige Anordnung der Streifen und orthogonale Ausrichtung der Auflagerhölzer sollte ein Spannbett verwendet werden.

<sup>63</sup> Die Eignung der „Slicer“-Maschine muss hinsichtlich der resultierenden Oberflächenqualität noch erprobt werden. Zum Verleimen müssen die Enden der Halmstreifen ausreichend eben und gleichmäßig dick sein. Weiterhin dürfen die Fasern durch das tangentielle Spalten nicht unnötig geschädigt werden.

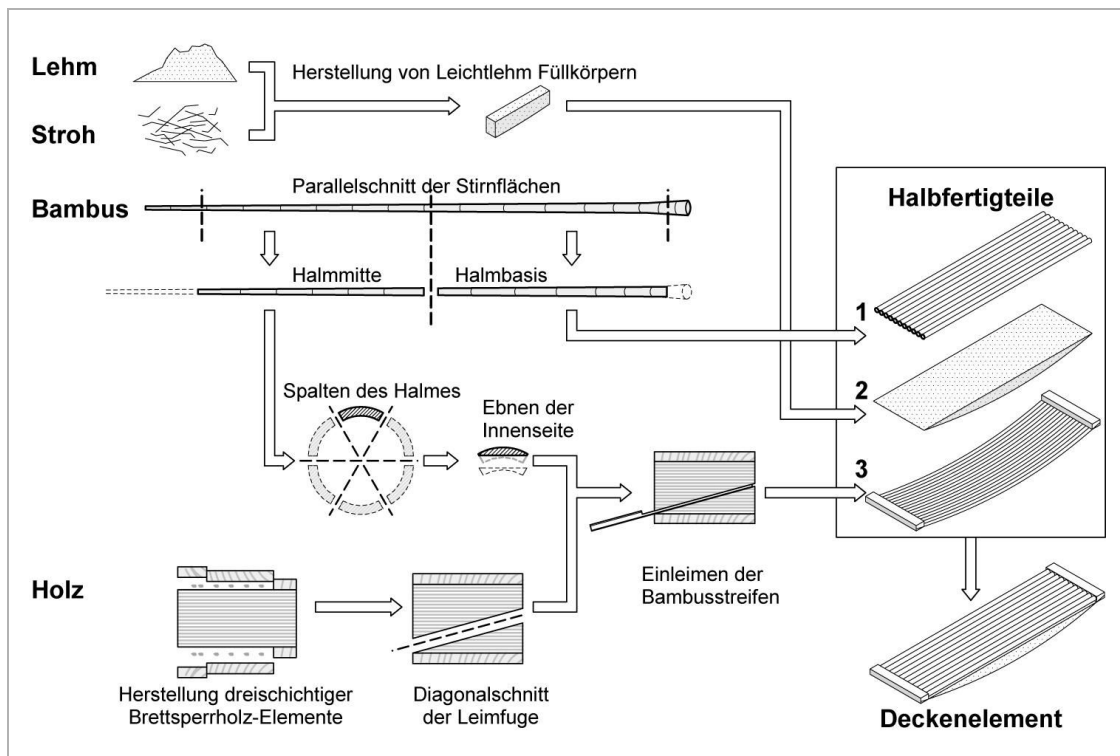


Abb. 161: Fluss-Diagramm der Deckenelementen-Herstellung: 1 = Druckstäbe, 2 = Füllkörper, 3 = Streifenschar.

## 11.3 Arbeitsaufwand

### 11.3.1 Fertigung der Leichtlehmsteine

Zur manuellen Herstellung von Bauteilen aus Stroh-Leichtlehm ist je Kubikmeter ein Arbeitsaufwand von sieben bis zehn Stunden anzusetzen. Zwei Drittel der Zeit werden zur Aufbereitung des Materials benötigt, die übrige Zeit wird zum Einbringen des Stroh-Lehm-Gemenges in die Schalung benötigt (29). Dieser, von *Volhard* für Leichtlehmwände angegebene Zeitanatz, deckt sich mit eigenen Bauerfahrungen und den beobachteten Werten bei der Herstellung der Leichtlehm-Füllkörper.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die serielle Herstellung der Füllkörper aufgrund der wiederkehrenden Form schneller ablaufen kann, als das Befüllen von Wänden mit Strohlehm in verschiedenen Arbeitshöhen. Die Arbeitsmethoden lassen sich auf die stets wiederkehrende Volumen-Form abstimmen und entsprechend rationalisieren, sodass der geringere Wert von sieben Stunden je Kubikmeter als realistisch angesehen wird. Je Quadratmeter Deckenfläche werden 0,14 Kubikmeter Leichtlehm-Füllkörper benötigt, deren Erstellung etwa eine Stunde dauert (Tab. 29). Das anschließende Trocknen an der frischen Luft braucht etwa drei bis fünf Wochen – dieser Prozess bedeutet aber keinen nennenswerten Arbeits-Mehraufwand.

Volumen der Leichtlehm-Füllkörper je Quadratmeter [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	Arbeitsaufwand zur Erstellung eines Kubikmeters Leichtlehm [h/m <sup>3</sup> ]	Arbeitsaufwand
0,14	7	<b>1,00 [h/m<sup>2</sup>]</b>

Tab. 29: Arbeitsaufwand zur Erstellung der Leichtlehm-Füllkörper für einen Quadratmeter Geschossdecke.

### 11.3.2 Fertigung der Seilschar und Bambusdruckstäbe

Die industrielle Herstellung der Halbfertigteile ist noch nicht erprobt. Aus der Beobachtung eigener Arbeitsweisen und existierender Betriebsabläufe in bambusverarbeitenden Betrieben können jedoch Zeitansätze für eine etwaige Fertigung mit entsprechenden Maschinen abgeleitet werden (Tab. 30). Zu diesem Zweck wurden bei einem Besuch in einer äthiopischen Bambus-Fabrik verschiedene Arbeiter bei ihrer Tätigkeit beobachtet und die Zeit zur Vollendung eines bestimmten, wiederkehrenden Arbeitsschrittes bestimmt. Bei den in Eigenarbeit ausgeführten Fertigungsschritten zur Herstellung der Prüfkörper sind die Zeiten experimentell validiert. Aufgrund der geringen Übung und laienhaften Ausführung der jeweiligen Arbeitsschritte sind diese als sehr konservativer Ansatz anzusehen. Eine Massenfertigung hat hier noch großes Optimierungspotenzial.

Arbeits-schritt	Tätigkeit	Minu-ten	Arbei-ter	Faktor je m <sup>2</sup>	Arbeitsaufwand [Min/m <sup>2</sup> ]
1 (*)	Bambushalm sägen (Tandem-Kappsäge)	0,15	2	1,50	0,45
2 (*)	Halm in sechs Streifen spalten (Splitter)	0,20	1	3,00	0,60
3 (**)	Streifenenden ebnen (Oberfräse)	0,16	1	9,00	1,44
4 (**)	Auflagerholz zuschneiden, 1 m (Kreissäge)	2,00	1	0,50	1,00
5 (*)	Auflagerhölzer verleimen, 1 m (Heißpresse)	5,00	1	0,50	2,50
6 (**)	Auflagerhölzer auftrennen, 1 m (Kreissäge)	2,00	1	0,50	1,00
7 (**)	Streifen anordnen + anleimen (Spannbett)	10,00	2	0,25	5,00
<b>Netto Arbeitsaufwand</b>					12,00
Nebentätigkeiten, Betriebsstockungen, Verzögerungen etc.				+100%	+12,00
Brutto Arbeitsaufwand in Minuten					=24,00
<b>Brutto Arbeitsaufwand in Stunden</b>					<b>0,40 [h/m<sup>2</sup>]</b>

Tab. 30: Arbeitsaufwand für die Fertigung von Unterspannung und Bambusdruckstäben.

(\*) Die Zeiten wurden in einem bambusverarbeitenden Betrieb dokumentiert.

(\*\*) Die Zeiten wurden beim Bau der Prüfkörper ermittelt.

### 11.3.3 Montage der Halbfertigteile

Für die Prüfkörperreihe PK400-U wurden die Arbeitsschritte der Montage einzeln betrachtet und zeitlich dokumentiert. Der Deckenausschnitt hatte eine Länge von 4,00 m und eine Breite von 0,50 m, was einer Fläche von  $A = 2 \text{ m}^2$  entsprach. Mit der Montage des Deckenstreifens waren zwei Personen 36 Minuten beschäftigt. Als Netto-Montagezeit ergeben sich somit 0,60 Stunden je Quadratmeter. Als Brutto-Arbeitsaufwand<sup>64</sup> (inklusive Nebentätigkeiten, Betriebsstörungen etc.) folgen daraus 1,20 Stunden je Quadratmeter (Tab. 31).

Arbeits-schritt	Tätigkeit	Arbeitsaufwand [Min/m <sup>2</sup> ]
1 (**)	Seilschar auflegen und Abschlusshölzer an Auflagern fixieren	5,00
2 (**)	Druckstäbe zwischen die Auflagerhölzer einfügen	3,00
3 (**)	Füllkörper seitlich unter die Druckstäbe einbringen	14,00
4 (**)	Folie (Kraftpapier) zwischen Füllkörper und Druckstäbe einbringen	2,00
5 (**)	Schüttung als Druckstab-Bettung einfüllen und verdichten	12,00
<b>Netto Arbeitsaufwand</b>		36,00
Nebentätigkeiten, Betriebsstockungen, Verzögerungen etc.		+100%
Brutto Arbeitsaufwand in Minuten		=72,00
<b>Brutto Arbeitsaufwand in Stunden</b>		<b>1,20 [h/m<sup>2</sup>]</b>

Tab. 31: Arbeitsaufwand zur Montage der vorgefertigten Bambus-Geschossdecke.

Geübte Arbeiter, größere und zusammenhängende Deckenflächen sowie verbesserte Montagetechniken können die tatsächlichen Montagezeiten weiter reduzieren. Vorteilhaft wäre

<sup>64</sup> Die betrachtete Haupttätigkeit macht nur etwa 50 % des Arbeitsaufwands aus. Hinzu kommen Nebentätigkeiten, zusätzliche Tätigkeiten und Verzögerungen bedingt durch Ablauf, Störungen, Erholung oder persönliche Gründe (50). Die betrachtete Haupttätigkeit wird daher im Resultat verdoppelt.

die Verwendung temporärer Spreizen, um die Füllkörper einfacher von oben einbringen zu können und damit das umständliche Einbringen von der Seite zu umgehen.

### 11.3.4 Gesamt-Arbeitsaufwand

Als Gesamt-Arbeitsaufwand ergeben sich in Summe 2,60 Stunden je Quadratmeter (Tab. 32).

Kapitel	Tätigkeit	Arbeitsaufwand [h/m <sup>2</sup> ]
11.3.1	Fertigung der Leichtlehmsteine	1,00
11.3.2	Fertigung der Seilschar und Bambusdruckstäbe	0,40
11.3.3	Montage der Halbfertigteile	1,20
<b>Gesamt-Arbeitsaufwand</b>		<b>2,60 [h/m<sup>2</sup>]</b>

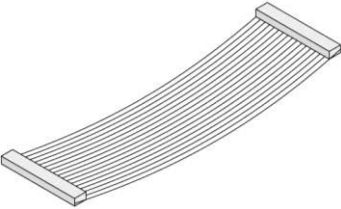
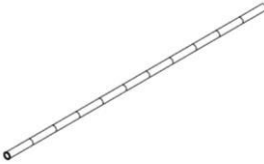

Tab. 32: Gesamt-Arbeitsaufwand für einen Quadratmeter Bambus-Geschossdecke.

## 11.4 Transport

### 11.4.1 Abmessungen

Je nach vorhandenen Transportkapazitäten ist eine Elementbreite von bis zu 2 m vorstellbar. Die Länge des Halbfertigteils richtet sich nach der Spannweite des Deckenelements. Die Seillinie der Bambusstreifen ist um etwa 1 % länger als die tatsächliche Spannweite. Hinzu kommt die Auflagerbreite von etwa 5 cm.

### 11.4.2 Gewicht

Halb-Fertigteile	Bambus-Streifenschar	Bambusdruckstäbe	Leichtlehm-Füllkörper
			
<b>Menge</b>	Seilschar mit Auflagerhölzern (4 x 1 m)	Einzelner Bambushalm (3,76 m)	Einzelner Lehmstein (14 dm <sup>3</sup> )
<b>Masse</b>	<b>22,0 kg</b>	<b>3,8 kg</b>	<b>14,5 kg</b>

Tab. 33: Masse einzelner Elemente, zur Bewegung per Hand geeignet.

Die Bambus-Streifenschar mit angeleimten Auflagerhölzern hat bei vier Meter Spannweite pro Meter Streifenbreite eine Masse von 22 kg. Auch größere Elemente von 4 x 2 m (44 kg) lassen sich ohne Probleme von zwei Arbeitern per Hand bewegen. Die Bambushalme (3,8 kg) und Leichtlehm-Füllkörper (14,8 kg) sind ebenso einfach von Hand zum Einbauort zu bewegen. Die Leichtlehmsteine können in einem Werk oder am Bauplatz aus Stroh und lehmigem Bodenaushub hergestellt werden. Wenn sie aus Bodenaushub hergestellt werden, kann der Straßentransport eines bedeutenden Gewichtsanteils der Decke entfallen. Die Flexibilität der Seilschar erlaubt es, dass die länglichen Elemente bei Bedarf auch durch verwinkelte Bereiche einer Baustelle manövriert werden können. Es muss jedoch bei Transport und Montage streng darauf geachtet werden, dass die Bambusstreifen nicht knicken, da die Fasern sonst brechen können. Als besonderer Vorteil macht sich das geringe Eigengewicht der einzelnen Elemente auf der Baustelle bemerkbar: Für das Abladen und die Montage der Bambus-Geschossdecke wird kein Kran benötigt.

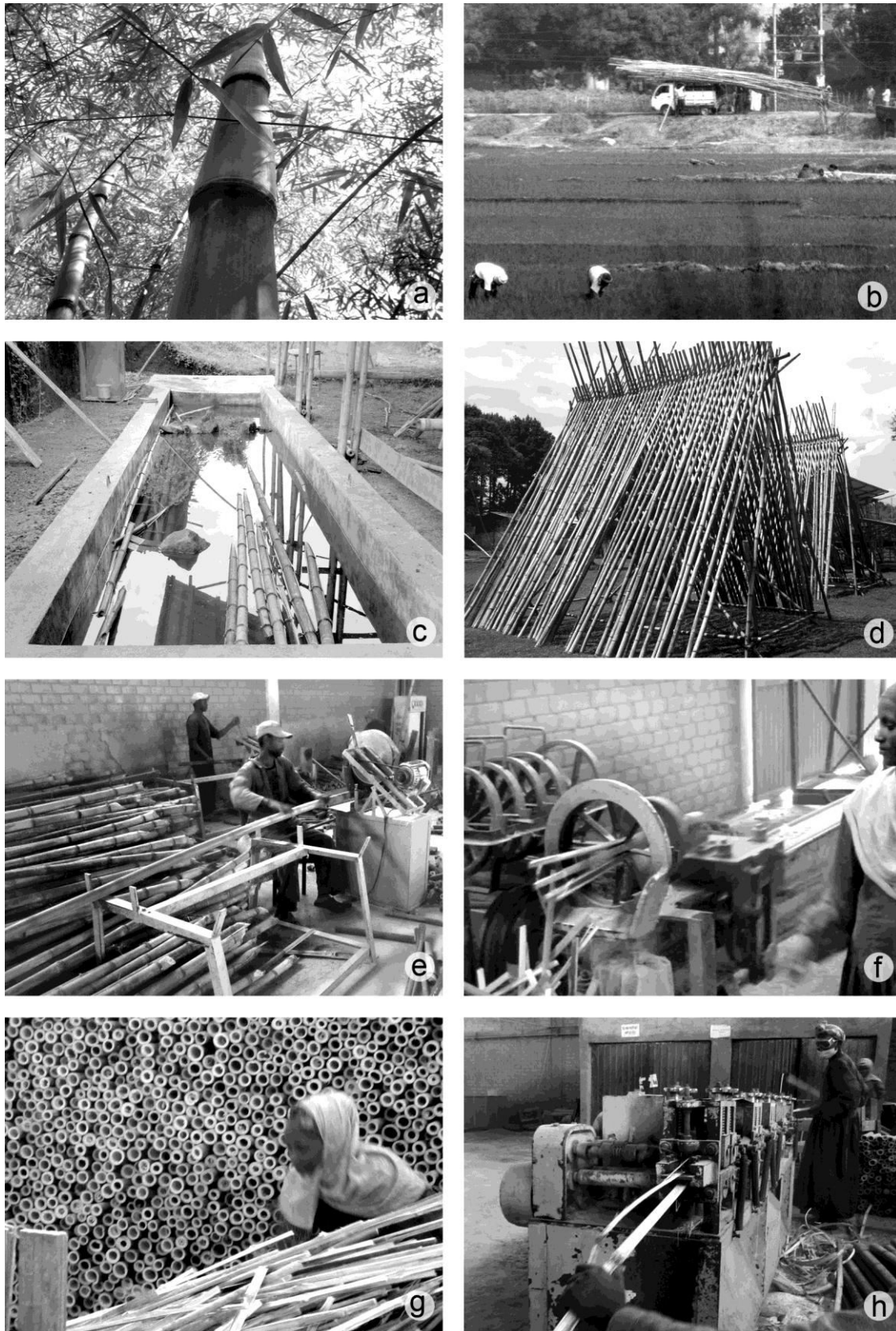


Abb. 162: Schritte der Bambusverarbeitung und zugehörige Maschinen: a) Bambushain, b) Abtransport von Bambushalmen zwischen Reisfeldern. c) Borax-Solebad zur Imprägnierung der Halme. d) Trocknen der Halme. e) Zuschnitt von Halmen mit Kappsäge. f) Spalten von Halmen mit dem „Splitter“. g) Halme im Hintergrund, Spalten im Vordergrund. h) Entfernen der inneren Halmwandschicht mit dem „Slicer“.

## 12 Aspekte der Nachhaltigkeit

Die direkten und indirekten Auswirkungen des Bauens auf Mensch und Umwelt sind weitreichend und komplex. Unter Aspekten der Nachhaltigkeit können die Bauauswirkungen in drei interagierende Themenfelder gegliedert werden: ökologisch, ökonomisch und sozial. Da die Erstellung eines Bauteils immer ein materialbezogener Prozess ist, soll dementsprechend zwischen Material-Bereitstellung und Material-Einsatz unterschieden werden (Tab. 34).

	ökologisch	ökonomisch	sozial
<b>Material-Bereitstellung</b>	Gewinnung und Bereitstellung	Materialkosten, Transportkosten	Auswirkungen der Materialgewinnung und ihrer Bereitstellung
<b>Material-Einsatz</b>	Prozessauswirkungen	Arbeitskosten	Arbeitsauswirkungen

Tab. 34: Ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen der Erstellung eines Bauteils.

Die Menge der benötigten Primärenergie für Bereitstellung und Einsatz der Baumaterialien ist dabei in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, da sich ein hoher Energieverbrauch ökonomisch, ökologisch und sozial nachteilig auswirken kann.

Die Herstellung von Baustoffen hat großen Anteil an der weltweiten Emission von Treibhausgasen. Zement und Stahl sind in der Herstellung besonders energieintensiv und für erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Im Jahr 2007 entfiel rund ein Sechstel der in China verbrauchten Energie auf die Herstellung von Gebäuden (33). Als Haupt-Energieträger kam dabei Kohle zum Einsatz.

In der folgenden Nachhaltigkeitsbetrachtung soll die vorgeschlagene Bambus-Deckenkonstruktion mit einer Stahlbeton-Deckenkonstruktion verglichen werden. Die Referenz-Decke aus Stahlbeton soll eine übliche Dicke von 20 cm und einen Bewehrungsgrad von 1,5% (entspricht etwa 23 kg/m<sup>2</sup>) haben. Es wird jeweils ein Quadratmeter der Decke betrachtet.

### 12.1 Ökologische Aspekte

Am Beispiel der Geschossdecke wird deutlich, wie sehr sich Stahlbeton und nachwachsende Baustoffe in den ökologischen Auswirkungen unterscheiden.

#### 12.1.1 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Seit einigen Jahren befinden sich Datenbanken im Aufbau, welche versuchen, den Betrag der grauen Energie einzelnen Baustoffen und Bauprozessen zuzuordnen. Die Werte sind oft grob verallgemeinernd oder erfassen den Ressourcenbedarf zur Ermöglichung einer Ware oder Dienstleistung nur unvollständig. So wird beim Straßentransport allein der Treibstoffverbrauch betrachtet – der Aufwand von Bau und Erhaltung der benötigten Straßen und Lastwagen wird aber vernachlässigt. Daneben muss zur Erhebung der Daten auf Angaben der Hersteller zurückgegriffen werden, welche häufig „optimistische“ Werte liefern. Insofern sind die Angaben stets unter Vorbehalt zu betrachten.

Eine der umfangreicheren Datenbanken ist dabei *Ökobaudat*<sup>65</sup>, auf die in der folgenden Bewertung zurückgegriffen werden soll. Von Interesse ist dabei zunächst der Gesamtaufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie<sup>66</sup> (PENRT) und die CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen<sup>67</sup> von Treibhausgasen. Die hier angeführten Betrachtungen beziehen sich auf die Herstellungsprozesse bis zur Fertigstellung des Bauteils („cradle to gate“).

### 12.1.1.1 Ökobilanz einer Geschosdecke aus Beton

Um Zementklinker zu gewinnen, muss unter großer Hitze der gebundene Kohlenstoff abgeschieden werden. CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementherstellung resultieren zu etwa zwei Dritteln aus diesem abgeschiedenen Kohlenstoff. Etwa ein Drittel resultiert aus der Erzeugung der benötigten Prozesstemperatur und Energie für mechanische Bearbeitung und Transport (34). Bei der Herstellung einer Tonne Zement werden etwa 700 kg CO<sub>2</sub> emittiert.

Neben dem Zementanteil trägt auch die enthaltene Stahlbewehrung zur schlechten CO<sub>2</sub>-Bilanz von Stahlbeton bei. Die Ökobilanzierung im verwendeten Datensatz geht von einem hundertprozentigen Recyclingstahl aus. Da der Stahl im Gebäude verbaut jedoch über viele Jahrzehnte der Wiederverwendung entzogen ist, muss – solange weltweit ein Bedarf nach Stahl besteht – neuer Stahl aus Roheisen hergestellt werden.

Bei der Roheisengewinnung wird dem Eisenerz (Eisenoxid) mithilfe von Koks (Kohlenstoff) der Sauerstoff entzogen. Die dabei entstehenden Emissionen an Kohlendioxid entsprechen 1,35 kg CO<sub>2</sub> je kg Roheisen<sup>68</sup>. Darüber hinaus ist der Abbau von Eisenerzen und Steinkohle mit all seinen Folgeprozessen notwendig, welche in dieser Bilanz nicht erfasst werden. Der verwendete Wert von 0,75 kg CO<sub>2</sub> je kg Stahl stellt somit einen unteren Grenzwert dar.

Für die benötigten Transporte zur Baustelle wird eine Distanz von 50 km für den Beton und 500 km für den Bewehrungsstahl angenommen.

Baustoff, Bezugsgröße	Einheit	Menge pro m <sup>2</sup>	Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar)		Globales Erwärmungspotenzial GWP	
			PENRT [MJ/Menge]	PENRT [MJ/m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/Menge]	CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/m <sup>2</sup> ]
<b>Beton</b> C 25/30	m <sup>3</sup>	0,200	909	181,800	211,000	42,200
<b>Betontransport</b> (50 km) 50 km * 0,480 t = 24,0 t*km	t*km	24,000	0,69	16,560	0,050	1,200
<b>Stahl (1,5 % Bewehrungsanteil)</b> (100% Recycling-Stahl)	kg	23,000	10,710	246,330	0,750	17,250
<b>Stahltransport</b> (500 km) 500 km * 0,023 t = 11,5 t*km	t*km	11,500	0,69	7,935	0,050	0,575
<b>Stahlbetondecke</b>				<b>452,63</b>		<b>61,23</b>

Tab. 35: Ökobilanz einer 20 cm Stahlbetondecke nach Ökobaudat.

Für die Herstellung der Referenz-Geschosdecke aus Stahlbeton werden in Summe 452,63 MJ/m<sup>2</sup> an nicht erneuerbarer Primärenergie benötigt. Durch die Herstellungsprozesse findet eine Kohlendioxid-Emission von (mindestens) 61,23 kg/m<sup>2</sup> statt.

<sup>65</sup> Ökobaudat. Online-Datenbank erstellt vom *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit* <http://www.oekobaudat.de> (Seite aufgerufen am 06.06.2017).

<sup>66</sup> Die benötigte Primärenergie wird typischerweise in MJ/kg oder MJ/m<sup>3</sup> angegeben.

<sup>67</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalent: Summe der beim Erstellungsprozess emittierten Treibhausgase. In ihrer klimaschädigenden Wirkung werden sie auf die Wirkung einer entsprechenden Menge Kohlendioxids umgerechnet.

<sup>68</sup> IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 3, Chapter 4, 2006 (60).

### 12.1.1.2 Ökobilanz einer Geschosdecke aus Bambus (wie PK400-U)

Bambus steht ohne besonderen Prozessaufwand zur direkten Verwendung als preiswertes, stabförmiges Element zur Verfügung. Das CO<sub>2</sub>-bindende Wachstum der Pflanze zeichnet Bambus gegenüber der stark CO<sub>2</sub>-emittierenden Herstellung von Stahl und Beton aus. Weil die vorgeschlagene Bambus-Geschosdecke noch nicht im industriellen Maßstab hergestellt wurde, liegen für die energetischen und ökologischen Aufwendungen noch keine Erfahrungswerte vor. Zur Beurteilung der Bambus-Anteile wird daher auf Teil-Werte von industriell gefertigten Bambus-Werkstoffplatten zurückgegriffen. Die verwendeten Daten stammen aus einer Bilanzierung chinesischer Bambus-Dielen für den europäischen Markt (35). Darin sind die benötigten Schritte vom Plantagen-Anbau über Fertigung und Transport nach Europa einzeln aufgeführt und mit jeweiligem Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet.

Weil für die Herstellung der vorgeschlagenen Geschosdecke (wie PK400-U) ein deutlich geringerer Bearbeitungsgrad der Bambushalme notwendig ist, werden aus den aufgeführten Positionen nur die jeweils benötigten Schritte als Auszug übernommen (Tab. 36). In der Bilanzierung beträgt die Distanz zwischen Bambus-Plantage und Fabrik 120 km und wird übernommen. Die als Referenz verwendeten Werte beziehen sich auf das fertige Produkt von Bambus-Dielen. Für ein Kilogramm der verleimten Bambus-Dielen werden 2,35 kg Halmmaterial verarbeitet. In der Bambus-Geschosdecke wird das Halmmaterial dagegen deutlich effektiver eingesetzt. Das mechanische Ebenen der Streifenschar muss nur im Bereich der Auflagerhölzer stattfinden. Die Übertragung der Werte auf die Bambus-Geschosdecke stellt daher einen konservativen Ansatz dar.

flattened bamboo board					Bambus-Geschosdecke (wie PK400-U)				
Description of process step	Amount	Unit	CO <sub>2e</sub> kg	Primärenergie Faktor MJ/Unit	Streifen		Druckstäbe		
					$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{CO_2e}{kg}$	$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{CO_2e}{kg}$	
1. Cultivation and harvesting from sustainably managed plantation - Gasoline consumption	0,006	liter/FU	0,009	35,0 MJ/liter <sup>69</sup>	0,1154	0,009	0,1154	0,009	
2. Transport from plantation to factory Eco-costs of a 5 tons truck (EURO3, transport of 780 FUs)	120	km/truck	0,048	2,0 MJ/(t*km) <sup>70</sup>	0,2400	0,048	0,2400	0,048	
3. Cutting stem segments longitudinally in half	0,007	kWh/FU	0,002	8,32 MJ/kWh <sup>71</sup>	0,0302	0,002			
4. Removing internal parts of the stem	0,079	kWh/FU	0,025	8,32 MJ/kWh	0,3613	0,025			
5. Removing outside parts of the stem	0,026	kWh/FU	0,008						
6. Shortening	0,006	kWh/FU	0,002	8,32 MJ/kWh	0,0274	0,002	0,0274	0,002	
Input data and results in CO <sub>2</sub> equivalent (carbon footprint, cradle to gate) of a flattened bamboo board. The FU used as the base element for this assessment is one 3-ply flooring board, 1210x125x18 mm with a weight of 1,819 kilograms.						$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{CO_2e}{kg}$	$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{CO_2e}{kg}$
					Summe je kg	<b>0,774</b>	<b>0,086</b>	<b>0,383</b>	<b>0,059</b>
					kg/m <sup>2</sup>	2,500	2,500	5,750	5,750

Tab. 36: Auszug aus der ökologischen Bewertung des Herstellungsprozesses eines dreischichtigen Bambus-Fußbodenelements. Daten nach van der Lugt und Vogtländer, 2015 (35) (links). Herleitung einzelner Werte für eine Bambus-Geschosdecke in der Art von PK400-U (rechts).

<sup>69</sup> Energiedichte Benzin: 35 MJ je Liter.

<sup>70</sup> 2,0 MJ/(t\*km) für einen Lieferwagen mit 5 Tonnen Zuladung und 85% Auslastung (nach Ökobaudat.de.)

<sup>71</sup> Primärenergieaufwand 8,319 MJ zur Generierung von 1 kWh elektrischer Energie (nach Ökobaudat.de)



Im Folgenden sind die einzelnen Herstellungsschritte und Komponenten der Bambus-Geschossdecke zusammengestellt (Tab. 37).

- Für die zusammengesetzten Auflagerhölzer wurden die Werte der Brettschichtholz-Herstellung verwendet, da das mehrschichtige Verleimen von Holz und Bambus durch den mehrschichtigen Aufbau von Brettschichtholz relativ gut abgebildet wird. Es zeigt sich, dass technische Trocknung, Sägen und Verleimen beim Brettschichtholz einen vergleichsweise hohen Primärenergieaufwand darstellen. Der Betrag der grauen Energie für Brettschichtholz beträgt immerhin 2.870 MJ/m<sup>3</sup>. Bezogen auf das gleiche Volumen ist die Herstellung von Brettschichtholz energetisch sogar aufwendiger als die Herstellung von Stahlbeton. Vom Betrag der grauen Energie für einen Quadratmeter der Bambus-Geschossdecke entfallen folglich 50 % auf die Auflagerhölzer.
- Bei der Bilanzierung wurde festgestellt, dass die bisher verwendete PE-Folie zwischen Füllkörpern und Schüttung mit rund 14 MJ/m<sup>2</sup> einen beträchtlichen Betrag an grauer Energie verkörpert. Die Funktion des Riesel-Schutzes kann (falls erforderlich) ohne weiteres durch eine Lage Kraftpapier (ggf. Altpapier oder Pappe) erfüllt werden, welche nur ein Zwanzigstel der grauen Energie benötigt und dabei quasi CO<sub>2</sub>-neutral ist.
- Von der Herstellung zum Einbauort wird eine Distanz von 100 km angenommen.
- Lehm für die Füllkörper bzw. Schüttung können am Bauplatz per Handaushub gewonnen und eingebaut werden und bedürfen daher keines Transports.

Bauteil / Prozess	Einheit	Menge pro m <sup>2</sup>	Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar)		Globales Erwärmungspotenzial GWP	
			PENRT [MJ/Menge]	PENRT [MJ/m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/Menge]	CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/m <sup>2</sup> ]
Bambuswachstum (Photosynthese) <sup>72</sup>	kg	8,250			-1,830	-15,10
Bambusbehandlung (Borax) <sup>73</sup>	Halm	1,500	1,58	2,37	0,116	0,17
Bearbeitung Streifenschar (vgl. Tab. 36)	kg	2,500	0,77	1,94	0,086	0,21
Bearbeitung Druckstäbe (vgl. Tab. 36)	kg	5,750	0,38	2,20	0,059	0,34
Auflagerhölzer Brettschichtholz (Nach Ökobaudat)	m <sup>3</sup>	0,006	2870,00	17,22	-650,000	-3,90
Strohballen 100 kg/m <sup>3</sup> (Nach Ökobaudat)	kg	12,500	0,55	6,98	-1,280	-16,00
Kraftpapier 0,80 g/m <sup>2</sup> (Nach Ökobaudat)	m <sup>2</sup>	1,000	0,82	0,82	-0,052	-0,05
Transport 100 km * 0,024 t = 2,4 t*km (Nach Ökobaudat)	t*km	2,400	2,00	4,80	0,147	0,35
<b>Bambus Geschossdecke</b>				<b>36,32</b>		<b>-33,97</b>

Tab. 37: Ökobilanz der Bambus-Geschossdecke.

Bambus, Holz und Stroh werden durch Photosynthese gebildet. Dabei wird Kohlendioxid zusammen mit Wasser in Sauerstoff, Wasser und Glukose umgewandelt. Aus der Glukose bildet die Pflanze Zellulose und Lignin, die beiden Hauptbestandteile des Halmes. Ein Kilogramm Bambusmaterial enthält 0,5 kg Kohlenstoff (35). Dies entspricht etwa dem Kohlenstoffgehalt von Holz (36). Das Molekulargewicht von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist um den Faktor 3,67 größer als das Atomgewicht von Kohlenstoff. Durch das Wachstum von einem Kilogramm Bambus wird folglich 1,83 kg CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen. In der Biomasse (23,75 kg/m<sup>2</sup>) eines

<sup>72</sup> Durch das Wachstum von Bambus wird der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen. Je Kilogramm Halm-Trockenmaterial werden 1,83 kg CO<sub>2</sub> gebunden. (35)

<sup>73</sup> Verwendung von etwa 0,2 kg Borax für die Tauch-Imprägnierung. 0,19 kWh je Halm nach *Siswanti, 2014* (58). Einbeziehung des Primärenergiefaktors: 0,19 kWh/Halm · 8,31 MJ/kWh = 1,581 MJ/Halm

Quadratmeters der Deckenkonstruktion sind somit 43,46 kg CO<sub>2</sub> eingespeichert. Die Bilanzierung der Decke ergibt, dass in Summe 33,97 kg CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen werden – darin sind die CO<sub>2</sub>-speichernden Aspekte bereits berücksichtigt. Die Differenz von 9,49 kg/m<sup>2</sup> muss somit auf CO<sub>2</sub>-emittierende Bearbeitungsprozesse entfallen (Tab. 38).

Anteile von Biomasse und Herstellungsprozessen an der CO <sub>2</sub> -Bilanz der Decke Bauteil / Prozess	Einheit	Menge pro m <sup>2</sup>	Globales Erwärmpotenzial GWP	
			CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/Menge]	CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/m <sup>2</sup> ]
Verbaute Biomasse				
Bambus	kg	8,25		
Stroh	kg	12,50		
Holz	kg	3,00		
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz Biomasse</b>		23,75	-1,83	<b>-43,46</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz anderer Prozesse</b>				<b>9,49</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz Deckenbauteil total</b>				<b>-33,97</b>

Tab. 38: Anteile von Biomasse und Herstellungsprozessen an der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Decke.

### 12.1.1.3 Gegenüberstellung der Ökobilanzen

In der Gegenüberstellung mit der Stahlbeton-Geschossdecke wird das Potenzial der Bambus-Geschossdecke klar erkennbar (Abb. 163). An Primärenergie werden 416,3 MJ/m<sup>2</sup> weniger benötigt. Das entspricht einer Differenz von -92,0 % gegenüber der Stahlbeton-Decke. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden gegenüber der Stahlbetondecke um 95,2 kg/m<sup>2</sup> reduziert (entspricht einer Veränderung von -155,5 %). Es wird nicht nur weniger emittiert sondern sogar Kohlendioxid eingespeichert. Die Konstruktion von Gebäuden mit Bambus-Geschossdecken stellt somit einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz dar.

	Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar)		Globales Erwärmpotenzial GWP	
	PENRT [MJ/m <sup>2</sup> ]		CO <sub>2</sub> -Äquiv. [kg/m <sup>2</sup> ]	
Stahlbeton-Geschossdecke (vgl. Tab. 35)	452,63		61,23	
Bambus-Geschossdecke (vgl. Tab. 37)	36,32		-33,97	
<b>Reduzierung der Umweltbelastungen durch Ersatz von Stahlbeton durch Bambus</b>	(-92,0 %)	<b>-416,30</b>	(-155,5 %)	<b>-95,20</b>

Tab. 39: Ökobilanzen der Geschossdecken in numerischer Gegenüberstellung.

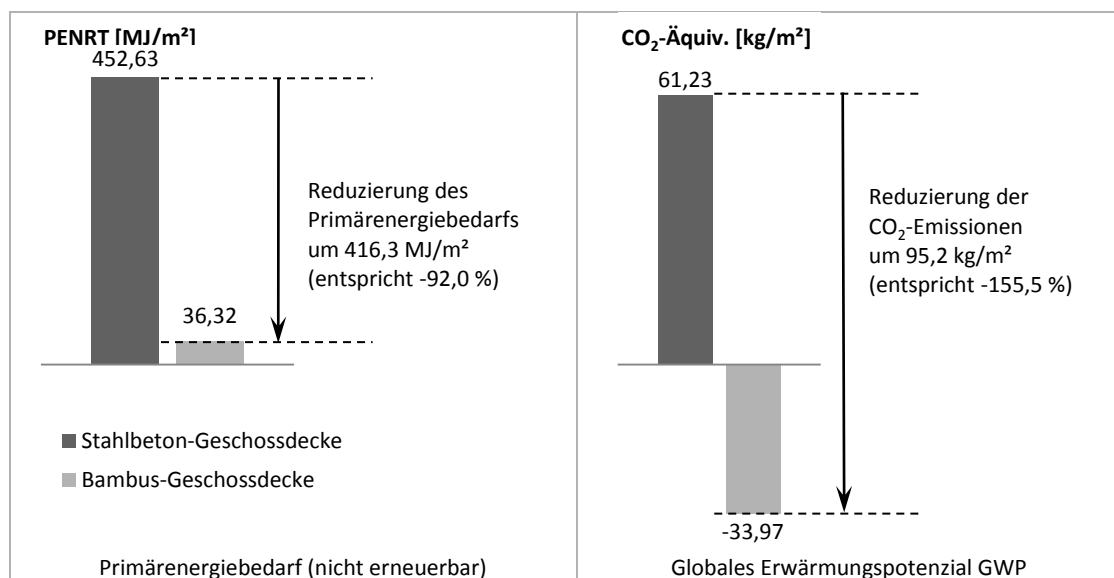


Abb. 163: Ökobilanzen der Geschossdecken in grafischer Gegenüberstellung.

## **12.1.2 Auswirkungen auf Boden und Wasserhaushalt**

### **12.1.2.1 Umweltauswirkungen durch die Gewinnung von Stahl und Beton**

Die Umweltauswirkungen der Stahlbeton-Herstellung reichen weiter als es der hohe Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen andeuten. Schon beim Abbau von Kalk, Sand, Kies, Erzen und fossilen Brennstoffen entstehen große Eingriffe an und unter der Erdoberfläche. Die Tagebaufläche ist der landwirtschaftlichen Nutzung auf unabsehbare Zeit entzogen. Die Absenkung des Grundwasserspiegels reduziert die Bodenfruchtbarkeit in weitem Umkreis um den Tagebau.

Der Abbau von Kalkgestein zur Zementherstellung greift oft ein in das hydrologische System von porösen Karstgesteinen: Zum einen durch Entfernen des schützenden Deckgesteins, was zu einer Verschmutzung von Quellwasser führen kann, zum anderen durch Störung des Gefüges, sodass wasserführende Schichten versiegen können (37). Im Erzabbau kontaminieren ausgespülte Schwermetalle das Wasser angrenzender Flüsse massiv. Saures Grubenwasser kann durch Senkung des PH-Werts das Ökosystem von Flüssen beeinträchtigen. Staubbelastungen mit zum Teil giftigen Anteilen finden sich in weitem Umfeld von Tagebauflächen (38). Die Bodenerosion und Verschlammung von Flüssen wird durch die enormen Erdbewegungen befördert. Die Rückwirkungen auf lokale Ökosysteme, die Verdrängung, Verarmung und Umsiedelung ansässiger Bevölkerungsgruppen durch Tagebau sind in ihren Folgen verheerend, aber oft unbeachtet.

### **12.1.2.2 Umweltauswirkungen durch die Gewinnung von Bambus und Holz**

Die extensive Nutzung von Bambus kann die Bodenfruchtbarkeit steigern: An steilen Hanglagen und an Ufern reduziert das Rhizom- und Wurzelgeflecht der Pflanze Bodenerosion entscheidend. Hangstraßen, welche durch Erdbeben bedroht sind, können effektiv durch Bambus-Pflanzungen gesichert werden. Je Hektar finden sich bis zu 350 km lebendes Rhizom (39). Die feiner differenzierten Wurzeln, welche vom Rhizom ausgehen, haben eine noch bedeutend größere Länge. Gerade die wichtigen oberen 30 cm des Bodens werden so gegen oberflächliches Auswaschen gesichert.

Ein ökologischer und gleichzeitig ökonomischer Vorteil von Bambus gegenüber der Nutzung von Holz ist, dass durch die Ernte des Halmes die Pflanze nicht getötet wird. Das Rhizom lebt unbeschadet weiter und bildet neue Halme aus. Ein künstliches Wiederaufforsten entfällt daher bei Bambus. Durch das selektive Ernten von drei- bis fünfjährigen Halmen, kann darüber hinaus der Eingriff ins Ökosystem – im Gegensatz zur Rodung – begrenzt werden. Ein weiterer Vorteil ist das geringe Eigengewicht der geschnittenen Halme, welche leicht per Hand zum Sammelpunkt und Abtransport gebracht werden können. Dieser vergleichsweise behutsame Eingriff minimiert bei der Halmernte die Zerstörung umliegender Vegetation und vermeidet das Anlegen breiter Ernte-Schneisen. Das Eigengewicht von Bäumen dagegen übersteigt den von Menschen zu bewegendes Maßstab deutlich. Durch die zunehmende Mechanisierung der Forstwirtschaft kommen immer schwerere Holz-Erntemaschinen zum Einsatz. Diese so genannten „Harvester“ und „Forwarder“ erzeugen durch ihr großes Gewicht (bis zu 40 Tonnen) und die zusätzlich wirkenden Hebelkräfte beim Aufgreifen der Baumstämme eine intensive und irreversible Schädigung des Waldbodens. Bereits die erste Überfahrt beeinträchtigt essentielle Bodenfunktionen (40).

Die große Blattoberfläche der immergrünen Bambuspflanzen reduziert die Aufschlagsgeschwindigkeit herabfallender Regentropfen, was die mechanische Verdichtung der Bodenoberfläche durch Regen vermindert. Hierdurch werden die Offenporigkeit des Bodengefüges und damit die Wasseraufnahmefähigkeit des Erdreichs erhalten, was zu einer Reduzierung des oberflächlich abfließenden Wassers führt.

Die humusbildende Schicht von Bambus-Laub am Boden ist nicht nur Raum für ein aktives Bodenleben, sondern stellt auch einen bedeutenden Wasserspeicher dar. Je Hektar und Jahr werden etwa 3,6 bis 3,9 Tonnen Mulch gebildet (39). Eine gute Wasserspeicherfähigkeit des Bodens ist in Zonen mit starker Topographie und ausgeprägter Regen- und Trockenzeit von großer Wichtigkeit. Extrem-Ereignisse wie Dürre oder Hochwasser werden durch den gebremsten Abfluss des Niederschlags abgemildert.

Im Schutz von Bambuspflanzungen wird die Austrocknung des Bodens durch Wind reduziert. Auch auf vergleichsweise unfruchtbaren Böden mit extremen Hanglagen, welche für landwirtschaftliche Nutzung nicht geeignet sind, wächst Bambus und bildet als Pionierpflanze Humus. Diese potenzielle Erweiterung der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche kann einer Flächenkonkurrenz im Anbau und damit Lebensmittelverteuerungen vorbeugen.

Trotz aller Vorteile der Bambus-Nutzung sollte ein Anbau von Bambus in Monokulturen in jedem Fall vermieden werden, da sonst das Auftreten von Schädlingen wahrscheinlicher wird. Auch darf die Ausweitung des Bambus-Anbaus nicht zu Lasten vorhandener Wälder gehen, da von diesen die Artenvielfalt in Flora und Fauna abhängt.

## **12.2 Ökonomische Aspekte**

### **12.2.1 Materialeffizienz**

Materialeffizient zu konstruieren bedeutet, hochwertige Materialien nur dort einzusetzen, wo sie benötigt werden. Stahl und Beton müssen angesichts des hohen Energieaufwands und enormer CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Baustoffherstellung als hochwertige und kostbare Materialien angesehen werden. Ihr Einsatz ist nicht grundsätzlich abzulehnen – sollte aber in diesem Bewusstsein möglichst sparsam erfolgen.

In einer biegebelasteten Geschossdecke wird Beton in der Druckzone und Stahl in der Zugzone eingesetzt. Bei dem wirkenden Biegemoment stehen sich Druck- und Zugkräfte mit gleichem Betrag und einem bestimmten Hebel gegenüber. Die Druckfestigkeit von Beton beträgt etwa 25 MPa, die Zugfestigkeit von Stahl beträgt dagegen 250 MPa. Zur Übertragung gleichgroßer Kraftbeträge muss die Querschnittsfläche des Betons also zehn Mal größer als die Querschnittsfläche des Bewehrungsstahls sein.

Die Baupraxis folgt aus verschiedenen Gründen anderen Regeln. Ein Bewehrungsgrad von bis zu 2 % ist üblich, was bedeutet, dass die Querschnittsfläche des Betons 50 Mal größer ist als der Bewehrungsquerschnitt. In Geschossdecken wird also fünf Mal mehr Beton verbraucht als es zur Übertragung des Biegemoments nötig wäre. Der wirkungslos in der Zugzone eingesetzte Beton reißt (Abb. 164). Es wird hieran deutlich, dass 80 % des verbauten Betonvolumens hoch aufbereitetes – aber statisch unwirksames – Füllmaterial ist. Als einzige Funktion mag der Korrosions- und Brandschutz der Stahlbewehrung angesehen werden.

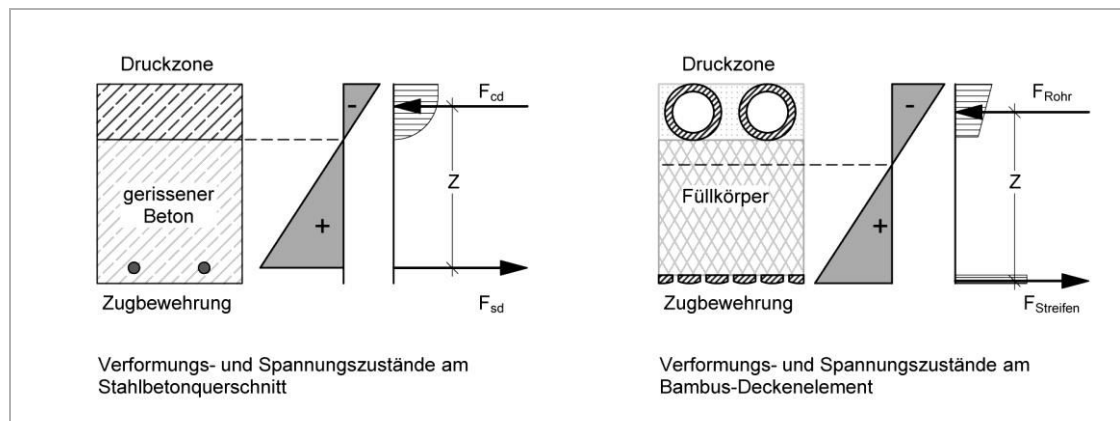


Abb. 164: Materialausnutzung und Spannungen der Bambusdecke im Vergleich zu einer Stahlbetondecke.

Stahlbeton-Massivdecken sind unter dem Aspekt der Materialeffizienz also extrem unwirtschaftlich, sie kommen aber aufgrund der einfacheren Schalform öfter zum Einsatz als Rippendecken oder Spannbeton-Hohldielen. Bei der Bambus-Geschossdecke wird das leistungsfähige Material weitaus effizienter angeordnet (Abb. 164):

- In der Druckzone befindet sich das hochfeste Bambusrohr mit einem für Druckspannungen optimierten Querschnitt.
- In der Zugzone liegt die zugfeste Streifenschar.
- Der Abstand von Druck- und Zugzone ist so weit es geht erhöht, um die Wirkung des inneren Hebels ( $z$ ) zu maximieren.
- Im statisch unwirksamen Zwischenraum befindet sich anspruchsloser Bodenaushub oder Stroh-Lehm als Füllmaterial mit der geringstmöglichen grauen Energie.
- Schubkräfte treten durch die Seillinie der Zugstreifen nicht auf.

### 12.2.2 Transporteffizienz

Die historische Entwicklung lokaler Architektur-Typologien war stets an örtlich vorhandene Materialien gebunden. Dies mag mit der Beschränktheit der Mittel erklärt werden, kann aber auch als Vorbild ressourcenschonenden Bauens dienen. Primärenergieaufwendungen und  $\text{CO}_2$ -Emissionen des verbrauchten Treibstoffs sind dem Straßentransport in Ökobilanzen direkt zuzuordnen. Darüber hinaus hat der straßengebundene Lastkraftverkehr aber eine Reihe weiterer Umweltauswirkungen und Folgen:

- Lärmbelastung
- Feinstaubbelastung (mehr Erkrankungen)
- Fahrbahnabnutzung (mehr Straßenreparaturen)
- Fahrzeugabnutzung (Neubau und Reparatur von Lastwagen)
- Anschwellen des Verkehrsaufkommen
  - Neubau und Verbreiterung von Straßen
  - Flächenbedarf für Abstellplätze/Fuhrpark
  - Beeinträchtigung der Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer
  - Beeinträchtigung der Lebensqualität der Straßenanrainer
  - Verkehrs-Stockungen (Zeitverlust)

Diese direkt erlebbaren und extrem belastenden Umweltauswirkungen des Transportwesens werden in bisherigen Ökobilanzen nicht berücksichtigt. Jeder gefahrene Kilometer und jede

transportierte Tonne wirken sich negativ auf Mensch und Umwelt aus. Je geringer Strecke und Transportmasse sind, desto geringer ist der benötigte Maschineneinsatz, desto kleiner und schonender kann auch das verwendete Transportmittel sein. Bei konsequenter Reduzierung des Transportbedarfs reicht ab einem bestimmten Punkt eine Schubkarre oder ein Maulesel aus.

⇒ *Ökonomisch und ökologisch gilt: Der beste Transport ist kein Transport.*

Im industriellen Massivbau sind jedoch andere Realitäten Alltag. In Deutschland betrug 2013 die Summe der auf Straßen bewegten Gütermassen 3.372 Mio. Tonnen<sup>74</sup>. Davon entfielen auf mineralische Baurohstoffe 521 Mio. Tonnen und auf mineralische Bauabfallstoffe 192 Mio. Tonnen<sup>75</sup>. Damit sind 21 % aller deutschen Straßentransporte auf den Umgang mit mineralischen Baumaterialien zurückzuführen. Der Transport findet im Massivbau aus folgenden Gründen statt:

- **Anfahrt**

Um mit Stahlbeton bauen zu können, müssen erhebliche Massen bewegt werden. Der Transport der Baumaterialien vom Gewinnungsort zum Einbauort ist dabei fast immer überregional bis international. Erze und Energieträger, welche für die aufwendige Herstellung der Baumaterialien benötigt werden, bilden einen Großteil interkontinentaler Rohstoff-Ströme. Für eine Stahlbetondecke von 20 cm Dicke müssen je Quadratmeter etwa 500 kg Masse zur Baustelle transportiert werden. Zement und Stahl müssen aus speziellen Werken bezogen werden, welche oft hunderte Kilometer entfernt oder im Falle von Entwicklungsländern überhaupt nicht im Land vorhanden sind. Sand und Kies bilden den Hauptteil der Bauteilmasse und müssen exakten Abstufungen der Korngrößen entsprechen. Diese speziellen Anforderungen verhindern fast immer die Verwendung von mineralischen Substanzen, welche schon unmittelbar am Bauplatz vorhanden sind.

- **Abfahrt**

Fundament-Aushub findet auf einer Stahlbetonbaustelle (außer zu etwaigen Gelände-Auffüllungen) keine Verwendung. Große Mengen an schwerem Erdmaterial werden somit zu unbrauchbarem Bauabfall, der aufwendig abgefahren werden muss. In Deutschland ist der Bausektor mit 209,5 Mio. Tonnen für 52,3 % des Brutto-Abfallaufkommens verantwortlich<sup>76</sup>. Mineralischer Abbruch und Bodenaushub stellen dabei die größten Abfallmengen dar. Auch wenn diese zu etwa 85 % wiederverwendet werden können, werden sie doch zunächst abtransportiert.

Eine Verwendung des anfallenden Bodenaushubs an Ort und Stelle als Baustoff könnte den schwergewichtigen Transport mineralischer Massen in zweifacher Hinsicht begrenzen. Der anfallende Bodenaushub ist kein Abfall, sondern dient als Baumaterial für die Füllkörper in der Bambus-Deckenkonstruktion. Dadurch, dass Bodenaushub grundsätzlich Eigentum des Bauherrn ist, steht dieses Baumaterial bereits kostenlos am Bauplatz zur Verfügung, was folglich einen weiteren ökonomischen Vorteil bedeutet. Für die einfache Herstellung der Leichtlehm-Füllkörper kann lehmiger Boden vorzüglich verwendet werden. Lehm findet sich

---

<sup>74</sup> Statistisches Bundesamt: Pressemitteilung Nr. 050 vom 13.02.2015.

<sup>75</sup> Umwelt Bundesamt: Pressemitteilung vom 28.01.2016.

<sup>76</sup> Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz, Wiesbaden, 2014.

insbesondere an Flüssen und Hanglagen, deren Umgebung häufig besiedelt ist. Aber auch sandiger oder steiniger Aushub kann verwendet werden, wie die Erfahrungen beim PK375-U in Äthiopien gezeigt haben (vgl. Abschnitt 8.7). Zur Baustelle müssen lediglich die Bambus-Druckstäbe, die Seilschar mit den Auflagerhölzern und das evtl. einzumengende Stroh transportiert werden. Diese rein pflanzlichen Materialien besitzen je Quadratmeter Deckenkonstruktion in Summe nur rund 24 kg Masse. Das Transportgewicht für die Erstellung der Bambus-Geschossdecke beträgt gegenüber der Stahlbetonkonstruktion weniger als 5 % (Tab. 40). Die Abfuhr des Bodenaushubs kann im Idealfall vollständig entfallen. Die negativen Auswirkungen des Transports können also massiv reduziert werden.

Transportmasse für die Herstellung einer <b>Stahlbeton-Geschossdecke</b>	[kg/m <sup>2</sup> ]	Transportmasse für die Herstellung einer <b>Bambus-Geschossdecke</b>	[kg/m <sup>2</sup> ]
0,2 m <sup>3</sup> Stahlbeton	500,00	6 Bambusdruckstäbe	5,75
		Streifenschar mit Auflagerhölzern	5,50
		Stroh für Füllkörper	12,50
<b>Summe</b>	<b>500,00</b>		<b>23,75</b>

Tab. 40: Transportmasse für die Herstellung des Bambus-Deckenelements bei Verwendung örtlich vorhandenen Bodenaushubs. Dagegen muss für eine 20 cm dicke Stahlbetondecke 500 kg Baustoff transportiert werden.

### 12.2.3 Beanspruchung der Infrastruktur durch Transport schwerer Baumaterialien

Aus betriebswirtschaftlichen Gründen werden oftmals Lastwagen mit größtmöglicher Ladekapazität gewählt, um die großen Massen an Baumaterialien zur Baustelle zu transportieren. Ein Transport-Betonmischer kann rund 20 Tonnen Beton auf einmal zur Baustelle bringen, woraus 40 m<sup>2</sup> Geschossdecke hergestellt werden können. Um 40 m<sup>2</sup> Geschossdecke aus der leichten Bambus-Konstruktion zu erstellen, muss nur eine Tonne Konstruktionsmaterial transportiert werden – ein kleiner Pritschenwagen reicht dafür aus. Das Gesamtgewicht des Betonmischers beträgt rund 40 Tonnen, während der Pritschenwagen nur etwa 4 Tonnen Gesamtgewicht besitzt.

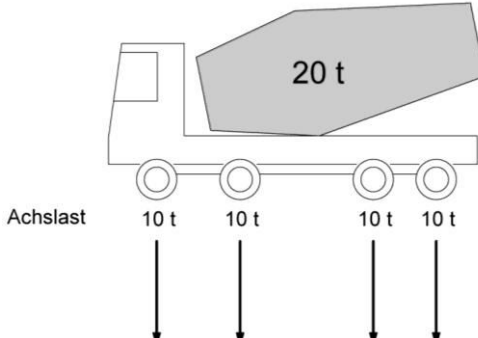
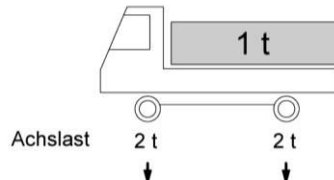
40 m <sup>2</sup> Stahlbeton-Geschossdecke	40 m <sup>2</sup> Bambus-Geschossdecke
$500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 40 \text{ m}^2 = 20 \text{ t}$	$24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 40 \text{ m}^2 \approx 1 \text{ t}$
<p>Transport-Betonmischer Gesamtmasse 40 t</p>  <p>Achslast: 10 t, 10 t, 10 t, 10 t</p>	<p>Pritschenwagen Gesamtmasse 3,5 - 5 t</p>  <p>Achslast: 2 t, 2 t</p>
10 t-Äqiv.: $\left(\frac{10}{10}\right)^4 + \left(\frac{10}{10}\right)^4 + \left(\frac{10}{10}\right)^4 + \left(\frac{10}{10}\right)^4 = 4$	10 t-Äqiv.: $\left(\frac{2}{10}\right)^4 + \left(\frac{2}{10}\right)^4 = 0,0032$
Relative Beanspruchung der Straße $\left(\frac{4}{0,0032}\right) = 1250$	Relative Beanspruchung der Straße $\left(\frac{0,0032}{0,0032}\right) = 1$

Abb. 165: Beanspruchung der Straße aus dem Materialtransport für 40 m<sup>2</sup> Geschossdecke. Durch den schwergewichtigen Transport des Betons wird die öffentliche Infrastruktur 1250 Mal stärker beansprucht.

Der Schwerlastverkehr ist einer der Hauptverursacher für Schäden an Straßen, Brücken, Böschungen und Gebäuden entlang der Straße. Die Beanspruchung der Infrastruktur kann nach dem so genannten „Vierte-Potenz-Gesetz“ abgeschätzt werden, wobei die schädigende Wirkung der Achslast des Fahrzeugs mit der vierten Potenz zur Geltung kommt. Die Beanspruchung wird dabei nach der äquivalenten Zahl der 10-Tonnen Achsübergänge ermittelt.<sup>77</sup> Um die gleiche Geschossdeckenfläche in Stahlbeton zu erzeugen, wird die Straße beim Materialtransport folglich 1250 Mal stärker beansprucht (Abb. 165). Der betriebswirtschaftliche Gewinn des Fuhrunternehmens resultiert in einem massiven volkswirtschaftlichen Schaden, da die Kosten der Straßenreparatur zu Lasten der Allgemeinheit gehen. Unter diesem Aspekt stellt das Bauen mit Stahlbeton einen gemeinschädigenden Vorgang dar.

#### 12.2.4 Gewichtseffizienz

Die Geschossdecke hat mit eingefügten Füllkörpern und Schüttung ein Eigengewicht von etwa 3 kN/m<sup>2</sup>. Bei Verwendung der Leichtlehm-Füllkörper (mit einer Rohdichte von 6 kN/m<sup>3</sup>) beträgt das Eigengewicht nur noch 2,50 kN/m<sup>2</sup>. Das ist nur halb so viel, wie bei einer Stahlbetondecke (5 kN/m<sup>2</sup>). Aus diesem reduzierten Eigengewicht der Konstruktion folgt, dass die Fundamente des Gebäudes entsprechend kleiner dimensioniert werden können. Für die Gründung ergeben sich folgende Vorteile:

- + schnellere Bauzeit
- + günstigere Baukosten
- + weniger Erdarbeiten und Bodenaushub
- + geringerer Materialverbrauch (Beton) zum Bau der Fundamente<sup>78</sup>

#### 12.2.5 Zeiteffizienz

Als Vorteile der Bambus-Geschossdecke gegenüber einer Geschossdecke in konventioneller Stahlbeton-Bauweise erscheinen im Arbeitsablauf:

- + Die Montage der Bambus-Halfertigteile ist ohne Kran möglich.
- + Schalungsarbeiten können vollständig entfallen.
- + Jegliche Feuchtigkeit im Bauwerk wird vermieden.
- + Eine Nachbehandlung des Betons entfällt.
- + Der Arbeitsprozess ist nicht dem engen Zeitfenster des abbindenden Betons unterworfen. Montage kann jederzeit unterbrochen oder fortgesetzt werden.
- + Die Decke ist sofort tragfähig und begehrbar.
- + Ausbaurbeiten folgender Gewerke werden nicht verzögert.

#### 12.2.6 Kosteneffizienz

Der Preis für Bambushalme in China beträgt rund 40 \$ je Tonne am Erzeugerort (41). Das entspricht einem Preis von etwa 0,40 \$ für einen 10 kg Halm von 70/7mm Querschnitt an der Basis und 10 bis 12 m Länge. Ein Halm äthiopischen Hochlandbambus von vergleichbarer Größe kostet in Äthiopiens Hauptstadt Addis Abeba im Einkauf 17,00 Birr (etwa 0,70 \$). Der Preis steigt durch die notwendige Borax-Behandlung<sup>79</sup> auf rund 2,50 \$. Für die Geschossde-

---

<sup>77</sup> RStO 12 (Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, 2012)

<sup>78</sup> Für die Gründung der Bambus-Konstruktion kann Stahlbeton zum Einsatz kommen. In Bereichen mit Erdkontakt und Feuchtebelastung hat Beton durchaus seine Berechtigung.

<sup>79</sup> Borsalzbedarf etwa 0,2 kg/Halm. Preis für Borax rund 3 bis 5 \$/kg (Stand Mai 2017)



cke werden 1,5 Halme pro Quadratmeter benötigt (vgl. Kapitel 11.1.2). Aus den nicht zur Deckenherstellung geeigneten Halmbereichen, können Produkte in anderen Maßstabsgrößen hergestellt werden (zum Beispiel Gewebematten, Streichhölzer, Zahnstocher). Reststücke können zur Erzeugung von Bambus-Holzkohle gebraucht werden. Bambushalme können einer restlosen Verwertung zugeführt werden, was die anteiligen Kosten für das Deckenelement weiter senken könnte. Der Preis für Holz und Leim ist von allen Posten der höchste. Hier besteht durch Materialreduktion noch Einsparungspotenzial. Im Folgenden werden die geschätzten Materialkosten für einen Quadratmeter der Bambus-Geschossdecke aufgeführt (Tab. 41). Die Materialkosten betragen in Summe etwa 9 \$/m<sup>2</sup>.

Bauteil	Material	Menge pro m <sup>2</sup>	Einheitspreis [\$]	Gesamtpreis [\$/m <sup>2</sup> ]
Bambusdruckstäbe	3,75m Bambus behandelt 70/7	1,5 Stk.	2,50	3,75
Bambus-Streifenschar	4,05m Bambus-Streifen 0,62 m			
	Holz inklusive Leim	0,006 m <sup>3</sup>	700,00	4,20
Leichtlehm-Füllkörper (6-10kN/m <sup>3</sup> )	Stroh	12,5 kg	0,06	0,75
	Lehm (Bodenaushub)	0,05 – 0,2 m <sup>3</sup>	-	-
Schüttung	Schüttung ( Bodenaushub)	0,2 m <sup>3</sup>	-	-
	Kraftpapier (ggf. alte Zeitungen)	1,0 m <sup>2</sup>	0,30	0,30
<b>Materialpreis für 1 m<sup>2</sup> Bambus-Geschossdecke</b>				<b>\$ 9,00</b>

Tab. 41: Massenermittlung und Materialkostenschätzung für einen Quadratmeter der Bambus-Geschossdecke.

### 12.2.6.1 Materialkosten einer Stahlbeton-Geschossdecke

Stahl und Zement sind international gehandelte Rohstoffe, die Preisbildung orientiert sich am Weltmarkt und ist von der konjunkturellen Lage abhängig. Entscheidend für den lokalen Marktpreis ist die Distanz zum Produktionsort. Das bedeutet, dass Stahl in Entwicklungsländern oftmals teurer ist als in Industrienationen, obwohl die Kaufkraft deutlich geringer ist. Äthiopien etwa importiert einen Teil des Betonstahls aus der Türkei. Der Stahl wird auf dem Seeweg nach Kenia oder Djibouti gebracht und vom dortigen Hafen mit Lastwagen rund 1000 km ins Land gefahren. Setzt man einen Stahlpreis von 800 \$ je Tonne an, so betragen die Materialkosten der Stahlbeton-Geschossdecke 44,40 \$/m<sup>2</sup>. Das ist fast fünfmal so viel, wie für die Konstruktion aus Bambus (Tab. 42.)

Bauteil	Kostenansatz	Menge pro m <sup>2</sup>	Einheitspreis [\$]	Gesamtpreis [\$/m <sup>2</sup> ]
Bewehrungsstahl	800 \$/Tonne	23 kg	0,800	18,40
Beton	100 \$/m <sup>3</sup>	0,2 m <sup>3</sup>	100,0	20,00
Schalmaterial	Abnutzung, Verschnitt, Rand	1,0 m <sup>2</sup>	pauschal	6,00
<b>Materialpreis für 1 m<sup>2</sup> Stahlbeton-Geschossdecke</b>				<b>\$ 44,40</b>

Tab. 42: Massenermittlung und Materialkostenschätzung für einen Quadratmeter Stahlbeton-Geschossdecke.

Eine Differenz von 35,40 \$/m<sup>2</sup> mag zunächst gering erscheinen – bezogen auf die Kaufkraft in manchen Entwicklungsländern stellen diese Materialmehrkosten jedoch einen verhältnismäßig großen Betrag dar. In Äthiopien etwa entspricht der Betrag von 35,40 \$ dem halben Monatseinkommen eines Hilfsarbeiters<sup>80</sup>. Auf westeuropäische Einkommensverhältnisse übertragen würden diese Materialmehrkosten für einen Quadratmeter einer Kaufkraft von rund 800 \$ entsprechen<sup>81</sup>. Um auch für Geringverdiener bezahlbaren Wohnraum zu ermöglichen, dürfen diese preislichen Relationen nicht vernachlässigt werden.

<sup>80</sup> Stundenlohn eines Hilfsarbeiters in Addis Abeba: 10 Birr (Mai 2017). Entspricht etwa 0,43 \$/h \* 82 h = 35,26 \$

<sup>81</sup> Mindestlohnansatz in Deutschland 2017: 8,50 €/h \* 82 h = 700 €. Entspricht einem Betrag von rund 800 \$.

### 12.2.7 Flächenertrag und Flächenbedarf für den Bambusanbau

Das vorgeschlagene Konstruktionsprinzip kann mit relativ dünnen Halmen ( $D > 60 \text{ mm}$ ) ausreichend Tragfähigkeit und Steifigkeit der Deckenplatte erzeugen. Dies macht die Nutzung von kleineren Bambusarten mit dicht wachsenden Halmen und einem entsprechend günstigeren Halmpreis möglich. Intensiv bewirtschaftete Bambusplantagen können je Hektar einen Jahresertrag von 15 bis 20 Tonnen Halmmaterial erbringen (42). Der Halmertrag von extensiv bewirtschaftetem Hochland-Bambus in Äthiopien (*Arundinaria alpina*) beläuft sich dagegen auf 8,6 Tonnen je Hektar und Jahr. Jährlich wachsen etwa 1000 neue Halme. Die Länge der Halme beträgt 12 bis 20 m, der Durchmesser 5 bis 13 cm (43). Vorausgesetzt, dass 60 % der geernteten Halme als Baumaterial infrage kommen, könnten aus diesen 600 Halmen etwa  $400 \text{ m}^2$  Deckenkonstruktion pro Jahr errichtet werden. Wird ein Hektar Bambuswald ( $10.000 \text{ m}^2$ ) über 25 Jahre bewirtschaftet, ergäbe die Erntemenge  $10.000 \text{ m}^2$  Deckenfläche. Jedem Quadratmeter Bambuswald stünde somit ein Quadratmeter Deckenfläche gegenüber.

### 12.2.8 Gegenüberstellung ökologischer und ökonomischer Aspekte

Im Folgenden werden die ökologischen und ökonomischen Aufwendungen der Bambus-Geschossdecke mit einer Stahlbetondecke ins Verhältnis gesetzt (Abb. 166). Es wird deutlich, dass die Bambus-Konstruktion mit weniger Aufwand zu erzeugen ist.

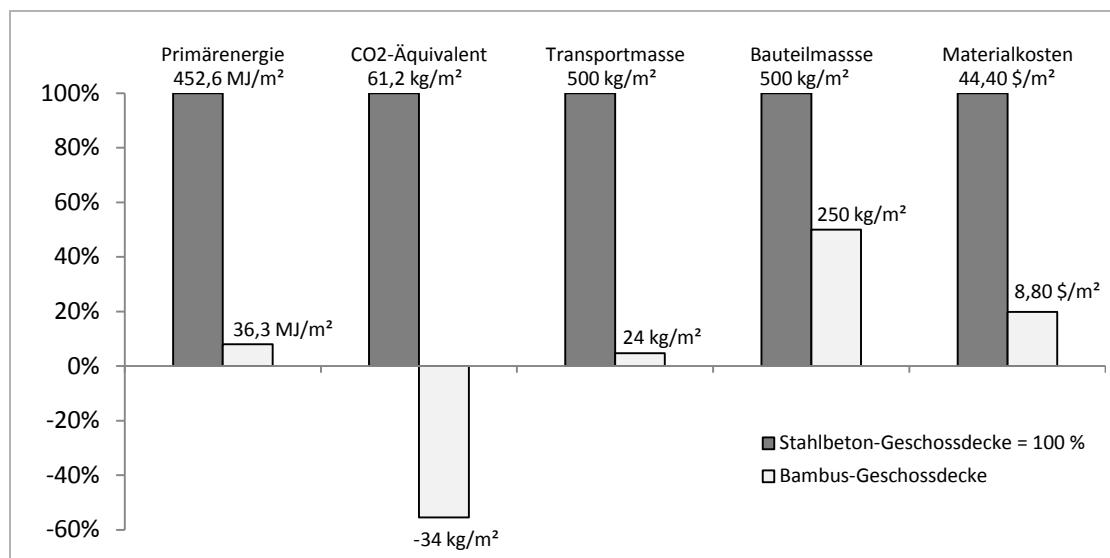


Abb. 166: Stahlbeton- bzw. Bambus-Geschossdecke in der Gegenüberstellung ihrer jeweiligen ökologischen und ökonomischen Auswirkungen (Stahlbetondecke als Referenz = 100 %).

## **12.3 Soziale Aspekte**

### **12.3.1 Primärenergiebedarf und humanitäre Auswirkungen**

Eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs ist nicht nur aus Klimaschutzgründen anzustreben. Es ergeben sich ökonomische und politische Abhängigkeiten von Energielieferanten, Emissionen von Giftstoffen bei der Gewinnung und Nutzung der Energieträger, Auseinandersetzungen um die Kontrolle von Lagerstätten und Transportrouten der Energieträger. Flucht, Unterdrückung und Katastrophen sind unlösbar mit der Bereitstellung großer Energiemengen verbunden. Aus diesem Grunde ist der Primärenergiebedarf nicht allein unter ökologischen, sondern auch unter humanitären und sozialen Aspekten von Bedeutung.

### **12.3.2 Günstiger Wohnraum**

Durch die Verwendung lokal vorhandener und preisgünstiger Materialien kann die vorgeschlagene Bambus-Geschossdecke einen Beitrag leisten, um schnell und preiswert mehrgeschossigen Wohnbau in Städten zu realisieren. Ein entsprechendes Angebot von Wohnraum ist die Voraussetzung, um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden. Nur so kann es gelingen, Menschen mit geringem und geringstem Einkommen die entwürdigenden Auswirkungen der Obdachlosigkeit zu ersparen. Die Fehlentwicklungen des Massenwohnungsbaus der Vergangenheit sollten dabei aber vermieden werden. Diese Problematik ist unabhängig vom Baustoff von Bedeutung. Die städtebaulichen Entgleisungen aus Ziegel im 19. Jahrhundert und aus Stahlbeton im 20. Jahrhundert bedürfen keiner Wiederholung aus Bambus im 21. Jahrhundert.

### **12.3.3 Einkommen im ländlichen Raum**

Die Verwendung von Stahlbeton setzt die Nutzung von Stahl- und Zementwerken voraus. Aus Gründen der Rentabilität sind diese Anlagen der Schwerindustrie stets von größtem Maßstab und beliefern einen entsprechend großen Abnehmerkreis. Hieraus resultiert eine starke Bündelung monetärer Ströme und entsprechende Marktmacht. Diese Kapitalkonzentration in privaten Händen ist per se ein Kennzeichen sozialer Ungerechtigkeit.

Eine Reihe von Entwicklungsländern verfügt über keine eigene Zement- oder Stahlindustrie und ist auf Importe angewiesen, was sich in der Außenhandelsbilanz negativ bemerkbar macht. Energiekosten machen einen Großteil der Herstellungskosten von Zement und Stahl aus, der Anteil der Lohnkosten am Produktionsort ist demgegenüber begrenzt. Die hohen Materialkosten von Stahlbeton stellen in der Folge nur einen geringen Beitrag zur Generierung von Einkommen in der Bevölkerung dar.

Die extensive Bewirtschaftung von Bambus-Beständen führt dagegen zu lokalen Verdienstmöglichkeiten, vor allem im bäuerlichen Bereich. Die Geldströme sind entsprechend der Anzahl beteiligter Kleinbauern breit gefächert (Abb. 167). Weil die Ernte nicht auf großes Gerät angewiesen ist, ist die Wirtschaftlichkeit unabhängig von der bewirtschafteten Fläche gegeben. Auch kleine und kleinste Bambusbestände an Feldrändern können in die Wertschöpfungskette eingebunden werden. Gerade diese kleinteilige Streuung bietet das Potenzial biologische Vielfalt in einer Kultur-Landschaft zu erhalten. Die einfache Verarbeitung kann in dezentralen Werken stattfinden und damit für eine Verbesserung der Arbeits- und Lebensperspektiven in dörflichen Gemeinden sorgen wie sozio-ökonomische Untersuchungen in Chinas Bambusregionen gezeigt haben (42), (44).

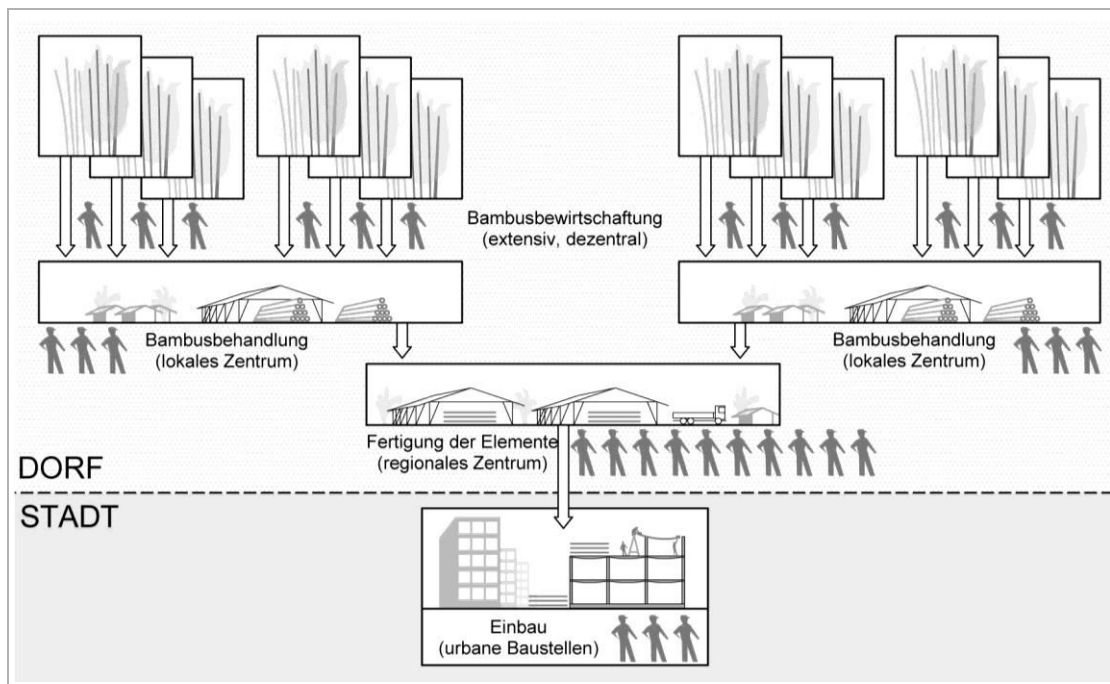


Abb. 167: Verlagerung der Fertigungsprozesse in den ländlichen Raum. Auf diese Weise wird Einkommen für Arbeiter und Kleinbauern geschaffen und Lebensperspektiven außerhalb der großen Städte geboten. Im Idealfall könnte eine Verbesserung der Lebensumstände im ländlichen Raum der Landflucht entgegenwirken.

Bei der Verwendung von Bambus für den Bau von Gebäuden können sich diesbezüglich mehrere positive Aspekte bemerkbar machen:

- RURALE ARMUT als ökonomische Triebfeder von Landflucht kann durch die vermehrte Nutzung und damit einhergehende ökonomische Aufwertung von Bambus gelindert werden.
- URbane Obdachlosigkeit als Resultat der Landflucht kann durch günstige und einfach zu fertigende Hochbauten aus Bambus verringert werden.

Bambus besitzt somit das besondere Potenzial, Ursache und Wirkung der Landflucht abzumildern.

## 12.4 Anwendungsszenario und Ressourcenbedarf

Der einleitend prognostizierte Bedarf an Wohnraum in indischen Städten beträgt mindestens 12 Mrd. m<sup>2</sup> bis zum Jahr 2050. Wenn lediglich 10 % dieser Fläche (entsprechend 1,2 Mrd. m<sup>2</sup>) als Geschossdecken aus Bambus anstelle von Stahlbeton errichtet würden, könnte dadurch ein bedeutender Umfang an Ressourcen eingespart und Emissionen vermieden werden (Tab. 43).

Bedarf je Quadratmeter Deckenfläche			Gesamtbedarf bei 1,2 Mrd. m <sup>2</sup> Deckenfläche		entspricht	
CO <sub>2</sub> -Emissionen	-0,095	t/m <sup>2</sup>	-114.235.494	t	5,7 %	der im Jahr 2012 von Indien <sup>82</sup> emittierten Menge an CO <sub>2</sub> (2 Mrd. t/a)
Primärenergiebedarf	-416,3	MJ/m <sup>2</sup>	-499.561.859.779	MJ	-14.692.996	Tonnen Steinkohle (34 MJ/kg)
Stahlbedarf	-0,023	t/m <sup>2</sup>	-27.600.000	t	-43.200.000	Tonnen Eisenerz (50 % Eisengehalt) zzgl. Koks
Transportbedarf Baustelle	-0,476	t/m <sup>2</sup>	-571.200.000	t	-28.560.000	Lastwagenladungen (20 t)
Bambusbedarf	+1,5	Halme je m <sup>2</sup>	+1.800.000.000	Halme	90.909	Hektar Bambusbestand (33 Jahre Bewirtschaftung, 600 Halme/Jahr)

Tab. 43: Ressourceneinsparungspotenzial falls 10 % der benötigten Geschossdecken anstelle von Stahlbeton in Bambus errichtet werden.

Indien hat einen Bambus-Bestand von 11,36 Mio. Hektar (45). Um in den nächsten 33 Jahren (bis 2050) 1,2 Mrd. m<sup>2</sup> Geschossdecken in Bambus zu errichten, würde schon die Bewirtschaftung von 0,8 % des indischen Bambusbestands ausreichen (Tab. 44). Der Bambusbestand in Indien ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, weshalb Verknappungen hier kein Problem darstellen sollten.

Geschossdecken-Fläche	Zeitraum in Jahren	Deckenfläche pro Jahr	Deckenfläche je Hektar Bambuswald pro Jahr	Bambus-Flächenbedarf	Gesamtbestand von Bambus in Indien <sup>83</sup>	Prozentualer Bedarf an bewirtschafteter Bambusfläche	
[m <sup>2</sup> ]	[a]	[m <sup>2</sup> /a]	[m <sup>2</sup> /(ha*a)]	[ha]	[ha]	[%]	
10 % Anteil	1.200.000.000	33	36.363.636	400	90.909	11.360.000	0,80 %

Tab. 44: Bewirtschaftete Bambusfläche zur Deckung des indischen Bedarfs.

Die Ressourcen und technischen Möglichkeiten stehen zur Verfügung, um mit der Konstruktion einen Ersatz für Stahlbeton-Geschossdecken darzustellen.

<sup>82</sup> Weltbank

[www.data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=IN](http://www.data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=IN) (Seite aufgerufen am 29.05.2017)

<sup>83</sup> Food and Agricultural Organisation of the United Nations (45)

# 13 Zusammenfassung

## 13.1 Fazit

Die Betrachtung des Bambus-Habitus zeigt, dass sämtliche Parameter der Halmgeometrie natürlichen Varianzen unterworfen sind. Allein die Länge eines Bambusstabes lässt sich durch Schneiden einfach und exakt kontrollieren. Die Querschnitte der Stabenden können lediglich nach Größe sortiert werden.

Aus den makro- und mikrostrukturellen Eigenschaften der Pflanze lässt sich die Eignung und Angemessenheit jeglicher Fügeprinzipien ableiten. Viele der weitläufig praktizierten Füge-techniken offenbaren sich unter diesem Blickwinkel als konstruktiv ungenügend und dem Material nicht angemessen. So haben die Verwendung stabförmiger Verbindungsmittel und die Stapelung von Halmen stets eine systematische Schädigung des Bambusrohrs zur Folge. Normalkraftbeanspruchung ist gegenüber allen anderen Belastungsarten zu bevorzugen. Druckkräfte sollten über den vollen Stirnkontakt, Zugkräfte mithilfe genügend großer Leimfugen eingeleitet werden. Alle anderen Arten der Lasteinleitung können die Materialfestigkeit nicht voll ausnutzen, da entweder das Fügeprinzip oder die Röhrenform des Halmes begrenzend wirken.

In den experimentellen Untersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass bei richtiger Halmanordnung und Füge-technik Deckenkonstruktionen erzeugt werden können, deren Steifigkeit und Tragfähigkeit weit über die gestellten Anforderungen hinausgehen. Das effektive Flächenträgheitsmoment des Deckentragwerks wurde im Verhältnis zum Flächenträgheitsmoment der aufgewendeten Halme um das Siebenfache gesteigert. Auf den Einsatz von Beton und Stahl kann dabei vollständig verzichtet werden. Als Hilfsmaterialien kommen Holz, Stroh und Lehm zum Einsatz. Der Holzanteil kann bei Bedarf auch durch "laminated bamboo lumber" (LBL) ersetzt werden. Die Ansprüche an das verwendete Bambusmaterial sind ausgesprochen gering, eine Vorsortierung ist nur in begrenztem Maße nötig. Es können fast alle Halmgrößen mit  $D > 60$  mm benutzt werden, solange die Gesamtquerschnittsfläche der Druckstäbe ausreicht, um die auftretenden Druckkräfte ins Auflagerholz zu übertragen.

Die Fertigung der modularen Deckenelemente kann mit bekannten Mitteln (Kreissäge, Splitter und Oberfräse) einfach und seriell vorgenommen werden, während der Transport und der Einbau der Halbfertigteile aufgrund des geringen Eigengewichts ohne Kraneinsatz möglich ist. Dadurch sind der Maschinen- und Energieaufwand sehr begrenzt, was diese Konstruktionsweise vor allem für Schwellen- und Entwicklungsländer zu einer effizienten und sinnvollen Alternative zum Stahlbeton machen könnte.

Im Vergleich zu einer Geschossdecke aus Stahlbeton ist die Herstellung in vielfacher Hinsicht umweltfreundlicher. Die Umweltbelastungen werden deutlich reduziert: das Transportgewicht um 95 %, der Primärenergiebedarf um 92 % und die CO<sub>2</sub>-Emissionen sogar um 155 % (statt einer Emission findet ein Einspeichern von Kohlendioxid im pflanzlichen Baustoff statt).

Die Verlagerung eines Teils der Konstruktionsarbeit von der Baustelle ins Vorfertigungswerk könnte es ermöglichen, Arbeitsplätze und Verdienstmöglichkeiten im ländlichen Bereich zu schaffen, was der Landflucht entgegenwirken kann. Gleichzeitig könnten Montagezeiten, Lärm-, Verkehrs- und Staubbelastungen am Einbauort drastisch reduziert werden.

Zusammen mit einer entsprechenden Wandkonstruktion kann die Deckenkonstruktion einen kostengünstigen und rationellen Geschosswohnungsbau ermöglichen, welcher als Grundvoraussetzung zur Stillung des enormen Bedarfs an städtischem Wohnraum in weiten Teilen der Welt angesehen werden muss.

Die vorgeschlagenen Fertigungsschritte sind einfach, die verwendeten Materialien besitzen derzeit keine besondere Nachfrage, sind in nahezu unbegrenzten Mengen verfügbar und mit geringstem Energieaufwand bereitzustellen. Demgegenüber hat das konstruktive Ergebnis – in Quadratmetern städtischen Wohnraums ausgedrückt – eine beständig anwachsende Nachfrage. Aus dieser Konstellation kann sich sehr schnell ein ökonomischer Erfolg der hier vorgeschlagenen Bauweise ergeben. Die Nutzung von Bambus als sich selbst erneuernde und damit unerschöpfliche Ressource, stellt im Gegensatz zu Stahlbeton einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz dar.

Die Vereinfachung der Fügepunkte führt zu einer effizienten Materialausnutzung, welche ein ökologisch und ökonomisch sinnvolles, mehrgeschossiges Bauen ermöglicht.

### **13.2 Ausblick**

Welches sind die nächsten Schritte zur Umsetzung der konzipierten Konstruktionsweise? Zunächst müssen tragende Wandelemente aus Bambus geschaffen werden, welche die Lasten einer mehrgeschossigen Bauweise sicher in den Baugrund leiten können. Die Voraussetzungen sind vorhanden, denn Druckkräfte lassen sich mit Bambushalmen denkbar einfach übertragen.

Die Realisierung wird – stärker noch als beim Holzbau – von der Beantwortung der Brandschutzfrage abhängen. Angesichts der dünnwandigen Halme kann bei Bambus von einer „Abbrand-Dicke“ mit Resttragfähigkeit nicht die Rede sein. Hieraus wird deutlich, dass sämtliche tragende Bauteile vollständig mit nichtbrennbaren Baustoffen eingekleidet werden müssen. In dieser Hinsicht sind die schmalen Bambusstreifen der Unterspannung mit den Bewehrungsstäben in Stahlbetondecken vergleichbar, die ebenfalls vollständig im Massivbauteil eingebettet sein müssen. Ob die Überdeckung aus Beton, Gipsplatten oder armiertem Lehmputz besteht, ist letztlich eine Detailfrage. Fest steht: Flammen und Hitze dürfen nicht auf Bambus einwirken.

Untersuchungen zeigen aber, dass auch mit 2 cm Lehmputz auf Stroh-Leichtlehm die Brandwirkung in der Tiefe des Bauteils stark begrenzt werden kann (29). Beidseitig verputzte Strohballenwände können den Brandüberschlag für mehr als 90 Minuten verhindern. Die Lösung der Brandschutzfrage ist also auch im Material-Repertoire der natürlichen Rohstoffe möglich.

# 14 Anhang

## 14.1 Index der verwendeten Symbole

A	Fläche
$A_{\emptyset}$	Querschnittsfläche eines Halmes
$a_{gl}$	Länge der Leimfläche
$A_{gl}$	Leimfläche
$A_H$	Horizontalkraft am Auflager A
$A_S$	Scherfläche
$A_V$	Vertikalkraft am Auflager A
b	Breite
$b_{gl}$	Breite der Leimfläche
$B_H$	Horizontalkraft am Auflager B
$B_V$	Vertikalkraft am Auflager B
$CO_2$	Kohlendioxid
cm	Zentimeter
D	Außendurchmesser eines Halmes
d	Innendurchmesser eines Halmes
F	Kraft
f	Stich, Durchhang
$f_{c,90,k}$	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{t,0,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in Faserrichtung
$f_{t,90,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{v,0,k}$	charakteristischer Wert der Scherfestigkeit in Faserrichtung
$f_{v,90,k}$	charakteristischer Wert der Scherfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$\sigma_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung
G	Eigengewicht (Summe)
g	Eigengewicht (flächig)
GPa	Gigapascal
h	Höhe
ha	Hektar = 10.000 m <sup>2</sup>
I	Flächenträgheitsmoment
$I_{eff}$	effektives Flächenträgheitsmoment
$I_{input}$	Flächenträgheitsmoment der aufgewendeten Bambushalme
i	Trägheitsradius
$k_I$	Verhältnis von $I_{eff} / I_{input}$
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
kWh	Kilowattstunde
l	Länge, Spannweite
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Quadratmeter
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
N	Newton
n	Faktor ergibt sich aus Laststellung und E-Modul
PENRT	Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar
t	Wanddicke
V	Querkraft
Vol	Volumen
x	Anzahl von Bambushalmen
$\emptyset_d$	Durchmesser Dübel
	parallel zur Faser
⊥	orthogonal zur Faser



## 14.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht ausgewählter mechanischer Kennwerte nach Janssen (8), Widjowijatnoko (11), Trujillo (12). ...	23
Tab. 2: Bambuseigenschaften und deren Auswirkungen auf die Druckfestigkeit des Materials .....	23
Tab. 3: Halmgeometrie eines 5 m langen Halmabschnitts der Art <i>Phyllostachys pubescens</i> . ....	41
Tab. 4: Vorhandene Bambus-Zugspannungen $\sigma_{t,0}$ beim Versagen verschiedener Fügepunkte .....	62
Tab. 5: Der Erstellungsaufwand für LBL-Balken. ....	79
Tab. 6: Übersicht der untersuchten Prüfkörper mit jeweiliger Spezifizierung.....	98
Tab. 7: Werte der verwendeten Halmquerschnitte.....	100
Tab. 8: Flächenträgheitsmomente gedachter Scharen von Halmen.....	102
Tab. 9: Querschnittswerte der verwendeten Druckstäbe. ....	118
Tab. 10: Laststellung am PK375-U unter Volllast bzw. halbseitiger Laststellung. ....	133
Tab. 11: Verformung des Feldes unter der jeweiligen Laststellung. ....	133
Tab. 12: Beschreibung der Reihe PK400 .....	137
Tab. 13: Ermittlung des Eigengewichts von Lehmsteinen und Schüttung .....	137
Tab. 14: Eigengewichtsermittlung des Lasteinleitungsgeschirrs .....	141
Tab. 15: Verformung bei vollflächiger Laststellung. ....	143
Tab. 16: Verformung bei halbseitiger Laststellung .....	144
Tab. 17: Verformung der Prüfkörper PK400-U1 bis PK400-U3 .....	145
Tab. 18: Übersicht der am Auflager wirkenden maximalen Kräfte zum Zeitpunkt des Bruchs. ....	146
Tab. 19: Übersicht der jeweiligen Leimbreite ( $b_{gl}$ ) und Leimfläche ( $A_{gl}$ ) der Bambusstreifen an den Auflagern. ....	147
Tab. 20: Kontaktbereich von Bambusdruckstäben und Auflagerhölzern mit herrschenden Druckspannungen .....	151
Tab. 21: Rechenwerte für Einfeldträger nach Schneider Bautabellen (28) und Rechenwerte für Bambus .....	155
Tab. 22: Numerische Kennwerte der in dieser Arbeit betrachteten Konstruktionen. ....	156
Tab. 23: Prüfkörper aus Kapitel 8 und Deckenkonstruktionen anderer Forschungsarbeiten .....	158
Tab. 24: Verteilung von Halmmaterial in der Druck- und Zugzone.....	160
Tab. 25: Ermittlung des Eigengewichts eines 1 m breiten Streifens der Deckenkonstruktion. ....	168
Tab. 26: Deckenstreifen von 1 m Breite: Abmessungen, Lasten und resultierende Kräfte am Auflager .....	168
Tab. 27: Ermittlung der erforderlichen Kontaktflächen.....	168
Tab. 28: Massenermittlung der Leichtlehm-Füllkörper. ....	169
Tab. 29: Arbeitsaufwand zur Erstellung der Leichtlehm-Füllkörper für einen Quadratmeter Geschossdecke.....	172
Tab. 30: Arbeitsaufwand für die Fertigung von Unterspannung und Bambusdruckstäben.....	173
Tab. 31: Arbeitsaufwand zur Montage der vorgefertigten Bambus-Geschossdecke. ....	173
Tab. 32: Gesamt-Arbeitsaufwand für einen Quadratmeter Bambus-Geschossdecke. ....	174
Tab. 33: Masse einzelner Elemente, zur Bewegung per Hand geeignet. ....	174
Tab. 34: Ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen der Erstellung eines Bauteils. ....	176
Tab. 35: Ökobilanz einer 20 cm Stahlbetondecke nach Ökobaudat. ....	177
Tab. 36: Bewertung d eines Bambus-Fußbodenelements nach <i>van der Lugt und Vogtländer (33)</i> .....	178
Tab. 37: Ökobilanz der Bambus-Geschossdecke. ....	179
Tab. 38: Anteile von Biomasse und Herstellungsprozessen an der CO <sub>2</sub> -Bilanz der Decke. ....	180
Tab. 39: Ökobilanzen der Geschossdecken in numerischer Gegenüberstellung. ....	180
Tab. 40: Transportmasse für die Herstellung des Bambus-Deckenelements .....	185
Tab. 41: Massenermittlung und Materialkostenschätzung für 1 m <sup>2</sup> Bambus-Geschossdecke. ....	187
Tab. 42: Massenermittlung und Materialkostenschätzung für 1 m <sup>2</sup> Stahlbeton-Geschossdecke .....	187
Tab. 43: Ressourceneinsparungspotenzial .....	191
Tab. 44: Bewirtschaftete Bambusfläche zur Deckung des indischen Bedarfs.....	191

## 14.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arbeiten am Schulbau <i>Tipu Sultan Merkez</i> in Pakistan (ZRS Architekten, Berlin).....	2
Abb. 2: Weltweite Verbreitungsgebiete von Bambus (Recht; Wetterwald, 1992).....	3
Abb. 3: Anteil der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung, 2015 (www.landkartenindex.de).....	3
Abb. 4: Fortschritt und Urbanisierung – eine Frage des Baustoffs? .....	5
Abb. 5: Übersicht der Zielgrößen.....	8
Abb. 6: Methodik.....	9
Abb. 7: Taxonomische Einordnung von Bambus. ....	11
Abb. 8: Statisches System und Schnittgrößen des lebenden Bambushalmes.....	14
Abb. 9: Der ringförmige Querschnitt eines Bambushalmes .....	14
Abb. 10: Das flexible Ausweichen der Bambuspflanze .....	14
Abb. 11: Bezeichnung der grundlegenden Merkmale eines Bambusrohres.....	18
Abb. 12: Festigkeiten im Halmmantel lassen sich auf das Vorhandensein der Fasern zurückführen.....	20
Abb. 13: Längsschnitt am Nodium zeigt deutlich die Abweichung des Faserverlaufs .....	22
Abb. 14: Schematischer Vergleich einer bewehrten Betonstütze mit dem Faserverlauf am Nodium. ....	22
Abb. 15: Horizontalschnitte von 5 mm Dicke durch ein Nodium.....	22
Abb. 16: Längsschnitt durch einen Bambushalm am Nodium .....	22
Abb. 17: Unterschiedlichen Maßstabsstufen im Aufbau der Halmwand (Bilder b - d nach <i>Liese</i> (9)). ....	24
Abb. 18: Zugspannungen quer zur Faser können in zwei Richtungen unterschieden werden. ....	25
Abb. 19: Bambushalme unter dem Einfluss tangentialer Zugspannung .....	25
Abb. 20: Knickspannungslinien von Bambushalmen nach J. L. Atrops (14). ....	26
Abb. 21: Gegenüberstellung der verfügbaren Querschnittsfläche mit vorhandenen Schnittgrößen.....	27
Abb. 22: Rohdichte bei Bambus nach Janssen (8). ....	28
Abb. 23: Quell- und Schwindverhaltens der inneren und äußeren Mantelzonen .....	29
Abb. 24: Wirkung der vorherigen, kontrollierten Auftrennung beim Trockenschwindversuch. ....	29
Abb. 25: Rissbildung aufgrund von Trockenschwinden .....	29
Abb. 26: Verschiedene Schwindrisse infolge von Austrocknung .....	32
Abb. 27: Größe des Spaltwinkels $\alpha$ in Abhängigkeit von der relativen Wanddicke $R_1/t$ .....	32
Abb. 28: Abweichung von der Rotationssymmetrie des Rohrquerschnitts am Nodium. ....	35
Abb. 29: Abweichung von der Rotationssymmetrie durch Trocknungsrisse .....	35
Abb. 30: Längenvergleich der Internodien an verschiedenen Abschnitten eines Halmes.....	35
Abb. 31: Entwicklung der Internodienlängen nach McClure (7) .....	36
Abb. 32: Krümmung des Halmes durch abgehende Blattstiele. ....	37
Abb. 33: Verschiedene Gründe für variierende Durchmesser von Bambushalmen. ....	38
Abb. 34: Verschiedene Gründe für variierende Dicken der Halmwand .....	39
Abb. 35: Entwicklung des Flächenträgheitsmoments entlang der Halmlänge .....	40
Abb. 36: Die einzeln aufgestellten Abschnitte eines 500 cm langen Bambushalmes.....	41
Abb. 37: Darstellung der einzelnen geometrischen Kenngrößen und deren relative Entwicklung .....	42
Abb. 38: Schematische Darstellung möglicher Krafteinleitung am Bambusquerschnitt .....	43
Abb. 39: Tabellarische Aufzählung der verschiedenen Krafteinleitungsarten und ihre Bewertung .....	43
Abb. 40: Polyurethan-Haftbrücke nach <i>Garrecht</i> (15). Holzfittings nach <i>Acre-Villalobos</i> (16). ....	45
Abb. 41: Stapelung von Halmen .....	48
Abb. 42: Halmwandverformung infolge der Überschreitung der Querdruckfestigkeit .....	49
Abb. 43: Zerstörung des Halmes durch Querpressung .....	50
Abb. 44: Stabförmige Verbindungsmittel besitzen geringe Lochleibungsflächen. ....	51
Abb. 45: Versagen der Scherflächen.....	52
Abb. 46: Rundung der Schaftfläche des Dübels erzeugt Querzugspannungen im Bambushalm.....	53
Abb. 47: Drehmoment des Bohrkopfs schädigt den Faserverbund der Halmwand .....	54
Abb. 48: Die Dübelspitze beschädigt leicht die Halmwand. ....	54
Abb. 49: Kraftumlenkung am Dübellloch führt zu Spannungskonzentrationen .....	54
Abb. 50: Halmwandversagen im Bereich von Dübellöchern .....	54
Abb. 51: Der Abstand von Dübel und Nodium und die daraus resultierende Querzugspannung .....	57
Abb. 52: Die Kombination von Bambus und Mörtel führt zu gegenseitiger Schädigung .....	57
Abb. 53: Schädigung des Halms durch Mörtelfüllung der Halmkammer.....	57
Abb. 54: Einschnittige Verbindungen .....	59
Abb. 55: Einschnittige Verbindungen können Halm-Toleranzen ausgleichen. ....	59

Abb. 56: Zweischnittige Verbindungen lassen sich geometrisch schlechter kontrollieren.....	60
Abb. 57: Maßabweichungen der Halmquerschnitte führen zur Schrägstellung.....	60
Abb. 58: Verschiedene Arten der Lagerung: punktuell, linienförmig, vollflächig.....	63
Abb. 59: Bambus als eingespannter Stab oder als Biegebalken mit Gleichstreckenlast.....	65
Abb. 60: Arten des Versagens: „local crushing“ und „splitting“ nach Chung (21).....	66
Abb. 61: Die Einzelsteifigkeit zweier kombinierter Halme und deren Gesamtsteifigkeit.....	67
Abb. 62: Bambus-Halbschalen mit Aufbeton nach Guzman 2007 (24).....	69
Abb. 63: Kraft-Weg-Diagramme nach Guzman (24).....	69
Abb. 64: Aufgeschnittene Bambushalme nach Ghavami (18).....	70
Abb. 65: Kraft-Weg-Diagrammenach Ghavami (18).....	70
Abb. 66: Nachgiebig verbundene Bambushalme als Träger.....	72
Abb. 67: Schulgebäude Tipu-Sultan-Merkez, Pakistan. (ZRS Architekten und Ingenieure, Berlin).....	73
Abb. 68: Längs- und Querschnitt durch die Deckenkonstruktion des Schulgebäudes TSM.....	74
Abb. 69: Modellvorschlag aus Schilfrohr für das Fügen vorgefertigter Deckenelemente.....	75
Abb. 70: Blick auf die Stirnfläche eines LBL-Querschnitts.....	77
Abb. 71: Herstellung von Laminated Bamboo Lumber aus runden Bambushalmen.....	77
Abb. 72: Der Herstellungsprozess von LBL bringt einen enormen Materialverlusten mit sich.....	77
Abb. 73: Das Material eines Balkens unter Gleichstreckenlast.....	77
Abb. 74: Eine Gegenüberstellung bei LBL-Profilen.....	79
Abb. 75: Entwicklungstendenz für LBL nach Rittiron (26).....	79
Abb. 76: Bewertung der Referenz-Deckentragwerke.....	80
Abb. 77: Die Verarbeitung von Rundholz und Bambushalmen.....	82
Abb. 78: Der massive Holzbalken und der hohle Bambushalm.....	83
Abb. 79: Auswirkungen auf Aufwand.....	86
Abb. 80: Die Geometrie des Inhalts ist für die Stapelung von Containern unbedeutend.....	88
Abb. 81: Der Container – ein universelles Raum-Modul. Corner-Fittings.....	88
Abb. 82: Im räumlich orthogonalen Raster können Module exakt gefügt werden.....	88
Abb. 83: Definition der „Stabachse“ und Abgrenzung gegenüber der „ideellen Stabachse“.....	89
Abb. 84: Im Gegensatz zur Stabachse ist die ideelle Stabachse unabhängig von der Halmgeometrie.....	90
Abb. 85: Die tatsächliche Halmkubatur und ihre kubische Abstraktion.....	92
Abb. 86: Halme richten sich mit ihren ideellen Stabachsen an einem orthogonalen Raumraster aus.....	92
Abb. 87: Abstraktion der Halme als kubische Bausteine eines orthogonalen Raumrasters.....	92
Abb. 88: Der Schritt zum Tafелеlement mit exakt definierten Abmessungen.....	92
Abb. 89: Benötigte Kräfte, um den Stab in die Bogenform zu bringen und zu halten.....	94
Abb. 90: Benötigte Kräfte zur Erzeugung eines Linsenträgers aus geraden Stäben.....	95
Abb. 91: Bewertung statischer Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für eine Bambus-Geschossdecke.....	97
Abb. 92: Aufbau des PK230-4x1. Vier Halme als Trägerschar mit mittiger Lasteinleitung.....	100
Abb. 93: PK230-4x1 Verformung unter mittiger Punktlast.....	100
Abb. 94: Kraft-Weg-Diagramm des PK230-4x1.....	100
Abb. 95: Aufbau des PK230-D.....	104
Abb. 96: Verformung und Versagen des PK230-D.....	104
Abb. 97: Deutung des Tragwerks als Vierendeel-Träger. Alle Teile erfahren eine Biegebelastung.....	104
Abb. 98: Gegenüberstellung der Verformung von PK230-D und PK230-4x1.....	104
Abb. 99: Qualitative Herleitung der wirksamen Lochleibungskräfte.....	106
Abb. 100: Querschnitt durch den nachgiebig verbundenen Träger.....	107
Abb. 101: Kubischer Stab-Abschluss.....	110
Abb. 102: Aufbau für den Keilzinken-Belastungstest.....	112
Abb. 103: Schnittgrößen im Bereich der Keilzinken-Verbindung.....	112
Abb. 104: Zwei Arten der Keilzinkenausrichtung.....	112
Abb. 105: Anpressdruck an den Außenzinken.....	112
Abb. 106: Nachgiebigkeit und Bruchspannung der Keilzinkenverbindung – liegend und stehend.....	114
Abb. 107: Auswirkung der Keilzinkenrichtung auf die Bruchspannung.....	114
Abb. 108: Versagen der liegenden Keilzinkenverbindung.....	114
Abb. 109: Aufbau des PK230-U mit Längs- und Querschnitt durch den Prüfkörper.....	116
Abb. 110: Geometrie und Fügeprinzip am Auflager.....	116
Abb. 111: Spalten und Ebenen der Bambusstreifen für den PK230-U.....	116

Abb. 112: Wirksame Leimfläche zwischen Auflagerholz und Bambusstreifen am PK230-U. ....	118
Abb. 113: Aufbau des PK230-U.....	119
Abb. 114: Kraft-Weg-Diagramm beim Versuch PK230-U.....	122
Abb. 115: Resultierende Kräfte an den Auflagern des PK230-U.....	122
Abb. 116: Lage- und Kräfteplan am Auflager B.....	122
Abb. 117: Kräftegleichgewicht der Leimfugen und Kräfteplan der Auflagerreaktionen.....	122
Abb. 118: Schadensanalyse von PK230-U.....	124
Abb. 119: Mögliche Arten des Versagens im Bereich der Leimfuge.....	125
Abb. 120: Versuchsreihe PK-GL2 (Leimverbindung zweischnittig), Streifen beidseitig geebnet.....	126
Abb. 121: Versagensprinzip bei PK-GL2-90 und PK-GL2-22.....	126
Abb. 122: Gegenüberstellung der Versuchsreihen PK-GL2-90 und PK-GL2-22.....	126
Abb. 123: Versuchsreihe PK-GL1 mit einseitiger Leimverbindung.....	128
Abb. 124: Gegenüberstellung der Messergebnisse der beiden Prüfkörper-Gruppen.....	130
Abb. 125: Die Bruchspannung bei PK-GL1-16 und PK-GL1-90.....	130
Abb. 126: Versagensprinzip bei PK-GL1-90 und PK-GL1-16.....	130
Abb. 127: Aufbau des Deckenprüfkörpers PK375-U.....	132
Abb. 128: Geometrie am Auflager. Hirnholzkontakt von Auflagerhölzern und Bambusdruckstäben.....	132
Abb. 129: Spalten der Halme in Streifen.....	132
Abb. 130: Konstruktionsschritte des PK375-U.....	134
Abb. 131: Belastungstest am PK375-U.....	135
Abb. 132: Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Prüfkörperreihe PK400-U.....	137
Abb. 133: Stroh-Leichtlehm Steine.....	137
Abb. 134: Herstellung der Leichtlehm-Füllkörper.....	138
Abb. 135: PK400-U1 und PK400-U2.....	140
Abb. 136: PK400-U3.....	140
Abb. 137: Längsansicht des Versuchsaufbaus PK400-U.....	142
Abb. 138: Querschnitt des Versuchsaufbaus PK400-U.....	142
Abb. 139: Verformung der Prüfkörper-Oberkante unter kontinuierlicher Flächenlast.....	143
Abb. 140: Verformung unter halbseitiger Flächenlast.....	144
Abb. 141: Kräftegleichgewicht am Auflager.....	146
Abb. 142: Auswertung der Versagens-Ursachen bei PK400-U1-3.....	147
Abb. 143: Belastungstest und anschließende Schadensbilder bei der Versuchsreihe PK400-U.....	148
Abb. 144: PK400-3 Versagen des Auflagerholzes unter Scher- und Druckspannung.....	151
Abb. 145: Bruch-Scherspannung der betrachteten Leim- und Deckenprüfkörper.....	153
Abb. 146: Die Verformung unter Scherspannung bei Decken- und Leimprüfkörpern.....	153
Abb. 147: Gegenüberstellung der jeweiligen Prüfkörper.....	157
Abb. 148: Übersicht der Prüfkörper und ihrer jeweiligen $k_{J}$ -Werte.....	157
Abb. 149: Prozentuale Veränderung von $I_{input}$ zu $I_{eff}$ .....	157
Abb. 150: Vorfertigung von Wandelementen aus Bambus (Bilder nach Hidalgo-Lopez (13)).....	161
Abb. 151: Wand-Typ 1 mit linsenförmiger Stabanordnung.....	163
Abb. 152: Wand-Typ 1, Ergebnisse des Drucktests.....	163
Abb. 153: Wand-Typ 2 mit paralleler Stabanordnung.....	164
Abb. 154: Wand-Typ 2, Ergebnisse des Drucktests.....	164
Abb. 155: Vorbild für den Wand-Typ 2 war eine Reihe von Vierbund-Stützen.....	165
Abb. 156: Knicklasten Druckbeanspruchter Bambusbauteile nach <i>Atrops</i> (14).....	165
Abb. 157: Konstruktionsprinzip einer mehrgeschossigen Bauweise aus Bambus.....	166
Abb. 158: Relevante Kräfte, Festigkeiten und Kontaktflächen am Auflager.....	168
Abb. 159: Mindestabmessungen eines Halmes.....	170
Abb. 160: Kombinierte Holzrichtungen an den Auflagern.....	171
Abb. 161: Fluss-Diagramm der Deckenelementen-Herstellung.....	172
Abb. 162: Schritte der Bambusverarbeitung und zugehörige Maschine.....	175
Abb. 163: Ökobilanzen der Geschossdecken in grafischer Gegenüberstellung.....	180
Abb. 164: Materialausnutzung und Spannungen.....	183
Abb. 165: Beanspruchung der Straße aus dem Materialtransport für 40 m <sup>2</sup> Geschossdecke.....	185
Abb. 166: Stahlbeton- bzw. Bambus-Geschossdecke in der Gegenüberstellung.....	188
Abb. 167: Verlagerung der Fertigungsprozesse in den ländlichen Raum.....	190

## 14.4 Literaturverzeichnis

1. **F.A.O.** *World bamboo resources - A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. Rom : FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2007.
2. **Taylor, M und Tam, C.** *Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry*. Paris : International Energy Agency, 2016.
3. **Jünger, Friedrich Georg.** *Die Perfektion der Technik*. Frankfurt am Main : Vittorio Klostermann, 1946.
4. **Giedion, Sigfried.** *Mechanization Takes Command*. Oxford : Oxford University Press, 1948.
5. **Mattheck, Claus.** *Design in der Natur: Der Baum als Lehrmeister*. s.l. : Rombach Druck- und Verlagshaus, 1992.
6. **Strasburger, Eduard und Denfer, Dietrich.** *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 1967.
7. **McClure, F.A.** *The Bamboos - a fresh perspective*. Cambridge, Massachusetts : Harvard University Press, 1966.
8. **Janssen, Jules J.A.** *Mechanical Properties of Bamboo*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1991.
9. **Liese, Walter.** *The Anatomy of Bamboo Culms*. s.l. : INBAR technical Report No. 18, 1998.
10. **ISO-22157-2.** *Bambo - Determination of physical and mechanical properties, part 2 Laboratory manual*. Geneve : International Organization for Standardization, 2004.
11. **Widyowijatnoko, Andry.** *Traditional and innovative joints in bamboo construction*. Dissertation an der RWTH Aachen : s.n., 2012.
12. **Trujillo, David.** Bamboo structures in Colombia. *The Structural Engineer*. März 2007, S. 25-30.
13. **Hidalgo-Lopez, Oscar.** *Bamboo - the gift of the gods*,. Bogota : Eigenverlag des Autors, 2003.
14. **Atrops, J.L.** *Elastizität und Festigkeit von Bambusrohren*. 1969.
15. **Hidalgo-Lopez, Oscar.** *Manual de construcción con bambú*. Madera, Colombia : Universidad Nacional de Colombia.
16. **Garrecht, H., Schneider, J. und Ott, A.** Steigerung der Tragfähigkeit der Knotenanschlüsse der Bambusrohre für das Deutsch-Chinesische Haus der Expo 2010 durch Optimierung des Bambus-Beton-Verbundes. *Bauingenieur Band 85*. Juli 2010, S. 353-360.
17. **Acre-Villalobos, Oscar.** *Fundamentals of the design of Bamboo structures*. 1993.
18. **Dunkelberg, K.** *Bambus als Baustoff, Studien zur Bauforschung Nr.II*. s.l. : Koldewey Gesellschaft, 1980.

19. **Janssen, Jules J.A.** *Bamboo in building structures*. Dissertation an der TH Eindhoven : s.n., 1981.
20. **Ghavami, K.** *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*. Rio de Janeiro : Dissertation, Department of Civil Engineering, Pontificia Universidade Catolica, 2004.
21. **Janssen, Jules J.A.** *Building with Bamboo - A handbook*. London : I.T. Publications, 1988.
22. **Garzón Caicedo, Jenny Varinia.** *Optimización de estructuras en guadua: trabajo estructural de uniones a tracción*. Bogota : Universidad Nacional de Colombia, 1996.
23. **Chung, K.F.** *Desing of bamboo scaffolds, INBAR technical Report No. 23.*, 2002.
24. **Glenn, H.E.** Bamboo Reinforcement in Portland Cement Concrete. *Engineers Bulletin* 4/1950. 1950.
25. **Atrops, J.L.** *Bambus und Bambusbeton: Bambus als Zuschlag- und Bewehrungsersatz*. Köln : s.n., 1983.
26. **Guzman-Chavez, David Javir.** *Evaluation of Bamboo for Building Elements satisfying housing criteria*. Dissertation an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne : s.n., 2007.
27. **Ziegert-Seiler.** *Tipu-Sultan-Merkez School, Statische Berechnungen zum Deckentragwerk*. 2011.
28. **Rittironk, Supreedee.** *Investigating laminated bamboo lumber as a viable structural material in architectural applications*. s.l. : Dissertation an der University Ann Arbor, 2009.
29. **Volhard, Franz.** *Leichtlembau, alter Baustoff - neue Technik*. Karlsruhe : C.F. Müller GmbH, 1983.
30. **Schneider, Klaus-Jürgen.** *Bautabellen für Architekten*. Düsseldorf : Werner Verlag, 2014.
31. **AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.** *NSR-98, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. 2002.
32. **Sharma, Bhavna.** *Engineered bamboo for structural applications*. 2015. S. 66-73.
33. **Chang, Yuang, Ries, Robert und Wang, Yaowu.** The embodied energy and enviromental emissions of construction projects in China: An economic input - output LCA model. *Energy Policy*. 2010, Bd. 38, 11.
34. **VDZ.** *CO2-Monitoring-Abschlussbericht 1990 – 2012*. Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke, 2013.
35. **van der Lugt, P. und Vogtländer, J. G.** *The Enviromental Impacts of Industrial Bamboo Products*. Beijing : INBAR, 2015.
36. **Wegener, G.** *Ökobilanzen*. s.l. : Informationsdienst Holz, 1997.
37. **Ekmekci, Mehmet.** *Impact of Quarries on Karst Groundwater Systems*. Walingford : IAHS Press, 1990.

38. **Horvath, B. und Gruize, K.** Impact of metalliferous ore mining activity on the environment in Gyongyosoroszi, Hungary. *Science of The Total Environment*. 1996, Bd. 184, 3.
39. **Zhou, Ben-Zhi.** Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *Journal of Forestry Research*. 2005, 16.
40. **Schäfer, J.** Befahren von Waldböden - ein Kavaliersdelikt? *Der Waldwirt*. 29, 2002.
41. **Deli, Xiong.** *Present Situation and Development Countermeasures of Paper-pulp Bamboo Resources in Hubei Province*. Wuhan : Hubai Forestry Institute, 2003.
42. **Jianghua, Xiao.** *Implement the Ecosystem Management in Bamboo Plantation to Improve the Synthetical Benefits*. Xianning : International Network for Bamboo and Rattan, 2003.
43. **Xuhe, Chen.** *Promotion of Bamboo for Poverty Alleviation and Economic Development*. Xianning : International Network for Bamboo and Rattan, 2003.
44. **Suijun, Chen.** *Bamboo product processing industry and income of bamboo farmers*. Xianning : International Network for Bamboo and Rattan, 2003.
45. **Loboviko, Maxim.** *World Bamboo Resources*. Rom : Food and Agricultural Organisation of the United Nations, 2007.
46. **Wachsmann, Konrad.** *Wendepunkt im Bauen*. Würzburg : Krausskopf Verlag , 1959.
47. **Otto, Frei.** *IL 31 Bambus*. s.l. : Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, 1985.
48. **Mattheck, Claus.** *Denkwerkzeuge nach der Natur*. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
49. **Polónyi, S.** Zuviel Stahl im Beton. *Beton und Stahlbetonbau, Heft 109*. September 2014, S. 628-636.
50. **Hofstadler, Christian.** *Scholarbeiten -Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008.
51. **INBAR.** *Technical Report no. 16*. 2004.
52. **UNFPA.** *State of World Population 2007*. New York : United Nations Population Fund, 2007.
53. **Wachsmann, Konrad.** *Holzhausbau Technik und Anwendung*. s.l. : Birkhäuser, 1995.
54. **Renjie, Zhao.** *Technological Innovative Course and Prospect of Bamboo-based Panel of China*. Xianning : International Network for Bamboo and Rattan, 2003.
55. **Pereira, Marco Antonio dos Reis.** *Mechanical Characteristics of the Glued Laminated Bamboo*. 2012. S. 135-150.
56. **Xiao, Yan.** *Modern Bamboo Structures*. London : Taylor and Francis, 2008.

57. **Ghavami, K. und Acha, E. A.** *Bamboo Permanent Shutter Concrete Slab Subjected to Bending*. Bath, UK : s.n., 2009. S. Paper 148.
58. **Zuraida, Siswanti.** *The assesment of marginal prevention costs on bamboo presavation method*. s.l. : Procedia Enviromental Sciences 28, 2015.
59. **Miller, A. J.** *Energy Implications of the Transportation of Building Materials*. Brighton : Department of Construction, Geography and Surveying, University of Brighton, 1998.
60. **IPCC (Intergouvernmental Panel on climate change).** *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol. 3 (Chapter 4)*. s.l. : Institute for Global Enviromental Strategies (IGES), 2006.



## 14.5 Internetquellen

- Landkartenindex  
[www.landkartenindex.de](http://www.landkartenindex.de)  
Seite aufgerufen am 21.06.2015
- USDA (United States Department of Agriculture) GRIN (Germplasm Resources Information Network) <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/family.pl?1465>  
Seite aufgerufen am 30.08.2015
- The World Factbook, Central Intelligence Agency, 2015  
<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/in.html>  
Seite aufgerufen am 06.03.2016
- Ökobaudat  
<http://www.oekobaudat.de>  
Seite aufgerufen am 22.05.2017
- Statista  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/221215/umfrage/wohnflaeche-je-einwohner-in-china-nach-stadt-und-land/>  
Seite aufgerufen am 01.06.2017
- Weltbank  
[www.data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=IN](http://www.data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=IN)  
Seite aufgerufen am 29.05.2017
- Intergovernmental Panel on climate change  
[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)  
Seite aufgerufen am 31.05.2017
- constructioninethiopia.com  
<https://constructioninethiopia.com/construction-market/construction-materials-in-ethiopia>  
Seite aufgerufen am 01.06.2017

## 14.6 Normen

- ISO 22156:2004 Bamboo – Structural design
- ISO 22157:2004 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties
- DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- DIN EN 1991-1-1: Eurocode 1: Einwirkungen Auf Tragwerke
- DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
- DIN EN 302: Klebstoffe für tragende Holzbauteile

