

T E C H N I S C H E U N I V E R S I T Ä T B R A U N S C H W E I G
Institut für Baukonstruktion und Holzbau
Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

Abschlussbericht

DFG-Geschäftszeichen: KE 901/4-1

Entwicklung einer Traglasttheorie für Holztafeln

Im Mai 2009

1. Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

DFG-Geschäftszeichen: KE 901/4-1

1.2 Antragsteller

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

1.3 Institut/Lehrstuhl

Technische Universität Braunschweig
Institut für Baukonstruktion und Holzbau iBHolz
Schleinitzstraße 21a
38106 Braunschweig
Tel.: (0531) 3917801
Fax: (0531) 3918193
e-mail: m-h.kessel@tu-bs.de

1.4 Aus DFG-Mitteln bezahlte wissenschaftliche Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Christoph Hall
Beschäftigungszeitraum: Oktober 2007 bis April 2009

1.5 Thema des Projekts

Entwicklung einer Traglasttheorie für Holztafeln

1.6 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

01. August 2004 bis 30. April 2009

1.7 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Bauingenieurwesen, Baustatik, Holztafelbau

1.8 Verwertungsfelder

Statische Berechnung von Gebäuden in Holztafelbauart,
Grundlage für weitere Forschungsprojekte im Holztafelbau

1.9 Am Projekt beteiligte Kooperationspartner

-

2. Zusammenfassung

2.1 Allgemeinverständliche Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und der erzielten Fortschritte gegenüber dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Antragstellung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde das physikalisch nichtlineare Tragverhalten von Tragwerken in Holztafelbauart untersucht, die bis zum Erreichen der Traglast, also bis zum endgültigen Versagen des Tragwerks, belastet werden. Ausgangspunkte dieser Arbeit waren die aus dem Stahlbau bekannte Fließgelenktheorie und das vereinfachte Verfahren nach Schubfeldtheorie, das zurzeit zur Abschätzung der Tragfähigkeit von Holztafeln verwendet wird [1].

Zur Berechnung der Traglast eines Tragwerks in Holztafelbauart wurde in dieser Arbeit ein Berechnungsverfahren auf Basis des Weggrößenverfahrens entwickelt. Dabei wird zunächst die elastische Grenzlast an einem statischen Modell berechnet, um die Stellen im Tragwerk zu finden, an denen der Verbund zwischen Rippen und Beplankung plastiziert. Anschließend wird die Traglast iterativ durch wiederholte Anwendung der in dieser Arbeit hergeleiteten Interaktionsgleichungen berechnet.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren erübrigt es sich, Tafeln als reine Stabwerke zu modellieren, in denen die Schubfelder zu Querkraftgelenken idealisiert werden, so wie es im Forschungsantrag zunächst vorgesehen war.

2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten und Beschreibung möglicher Anwendungen

Eine Traglastberechnung von Holztafeln kann mit dem in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren und den Interaktionsgleichungen durchgeführt werden.

Die S_{90} -M-Interaktion und die S_0 -M-Interaktion wurden in dieser Forschungsarbeit bereits hergeleitet und angewendet. Die Beschreibung der S_{90} - S_0 -M-Interaktion steht jedoch noch aus. Diese ist unverzichtbar für eine allgemeine Übertragbarkeit des gezeigten Berechnungsverfahrens auf beliebige Tafelgeometrien und Belastungen.

Alle angeführten Herleitungen basieren bisher auf der Annahme, dass Rippen und Beplankung starr sind. Die Zulässigkeit dieser Annahme ist durch FEM-Berechnungen (mit steifen Rippen und Beplankungen) zu überprüfen und ggf. sollte eine Erweiterung der Herleitungen dahingehend stattfinden, die Biegesteifigkeit der Rippen und die Schubsteifigkeit der Beplankungen zu berücksichtigen.

Weiterhin könnte das entwickelte Berechnungsverfahren auf Basis des allgemeinen Weggrößenverfahrens in Matrixschreibweise formuliert werden, um es für eine numerische Berechnung nutzbar zu machen. Ein numerisches Berechnungsverfahren bietet auch die Möglichkeit, die Traglasten räumlicher mehrgeschossiger Tragstrukturen in Holztafelbauweise zu berechnen.

3. Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangslage

Gebäude in Holztafelbauart bestehen aus Dach-, Decken- und Wandtafeln, die u. a. in ihrer Ebene scheibenartig beansprucht werden. Die Berechnung dieser Beanspruchungen erfolgt bisher an einfachen statischen Modellen, wie z. B. dem in [1] beschriebenen Schubfeldmodell. Nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren mit dem Schubfeldmodell werden ebene Teilsysteme aus dem Gesamtsystem herausgeschnitten. Die Teilsysteme sind so zu wählen, dass stets ein ideales Schubfeld zu bemessen ist, dessen Verbund zwischen Rippen und Beplankung ausschließlich parallel zum Beplankungsrand bzw. in Richtung der Rippenachsen beansprucht wird ($s_{v,0}$). Beispielsweise werden bei der Bemessung der Wandtafel in Bild 3-1 von den fünf vorhandenen Tafelfeldern ausschließlich die drei Tafeln ohne Öffnungen als statisch wirksam angesetzt. Die beiden Tafelfelder mit Öffnungen bleiben vereinfachend unberücksichtigt, obwohl sie sich im realen Tragwerk an der Lastabtragung beteiligen. Infolge der Nichtberücksichtigung einzelner Tafelfelder werden die Kompatibilitätsbedingungen der als statisch wirksam angesetzten Teilsysteme untereinander nicht berücksichtigt. An den Schnittstellen ergeben sich dadurch Zwängungen in unbekannter Größe. Erst ein Nachgeben des Verbundes, also eine Art Plastizieren, kann real einen Spannungszustand ermöglichen, wie er im statischen Modell angenommen wird.

Die tatsächlich vorhandenen zusätzlichen Beanspruchbarkeiten und damit Steifigkeiten der Wand werden durch das Schubfeldmodell nicht abgebildet. Hierzu zählen die Beanspruchung des Verbundes rechtwinklig zur Rippenachse, die Wirkung der Rippen als Biegeträger und Kopplungskräfte.

Folglich könnten die an den vereinfachten Modellen nachgewiesenen Tragfähigkeiten als eine untere Schranke angesehen werden, wenn der Nachweis der Anwendbarkeit der Traglasttheorie auf diese Systeme erbracht werden kann. Daher ist es erforderlich, die Traglasttheorie für die Holztafelbauart zu entwickeln.

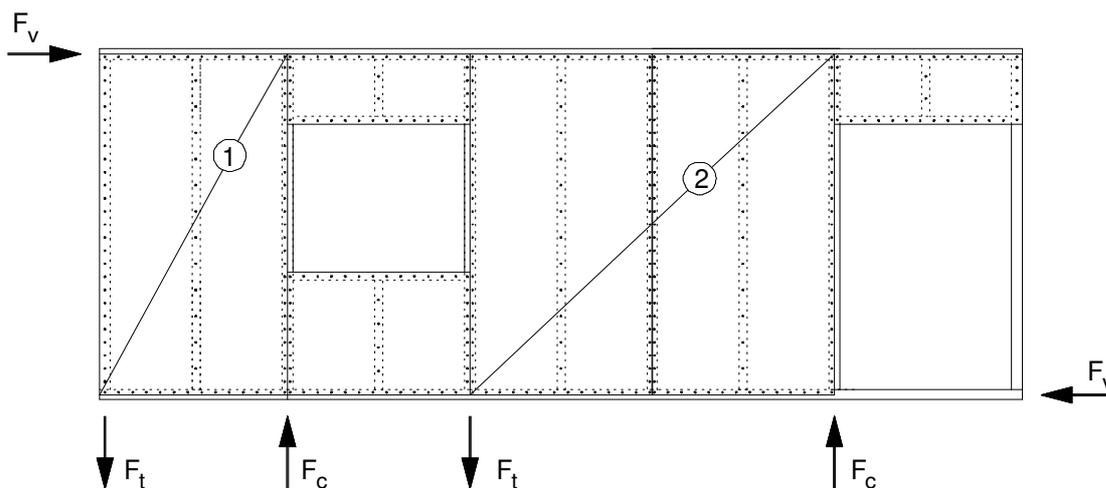


Bild 3-1: Wand mit Öffnungen bestehend aus einer Gruppe von Wandtafeln

Durch die Anwendung der Traglasttheorie im Holztafelbau wird eine nachvollziehbare Beschreibung des tatsächlichen Tragverhaltens im Grenzzustand möglich, die eine Aussage über die Größe des Fehlers im Sinne einer Fehlerabschätzung ermöglicht. Dadurch sind auch die Anwendungsgrenzen bekannt. Im Unterschied zu einer nur unbewusst bei der

Vereinfachung der Modelle angewendeten Traglasttheorie birgt die bewusste Anwendung nur noch die im Rahmen des Sicherheitskonzeptes akzeptierten Risiken.

Das Schubfeldmodell ist statisch bestimmt. Somit kann der Spannungszustand des Modells allein aus den Gleichgewichtsbedingungen ermittelt werden. Dies macht das Schubfeldmodell für eine schnelle „händische“ Berechnung attraktiv.

Eine Bemessung nach der zu entwickelnden Traglasttheorie für Holztafeln wird dagegen erheblich umfangreicher sein als die Bemessung nach dem Schubfeldmodell. Die Ursache dafür liegt einerseits im anzunehmenden statischen Modell, das vielfach statisch unbestimmt ist, andererseits in der Erfassung des nichtlinearen Tragverhaltens des Verbundes und damit der Nichtlinearität der Tafel(-gruppe).

Ein wesentliches Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es folglich, die Traglasttheorie im Holztafelbau herzuleiten und für eine mit angemessenem Aufwand durchführbare Bemessung aufzubereiten. Dies wäre z. B. in Form von Bemessungstabellen für typische Tafelgeometrien oder in Form einer Bemessungssoftware auf Basis eines Tabellenkalkulationsprogrammes möglich. Die Grundlage für die Erstellung der Bemessungstabellen und –software bildet eine Abwandlung des allgemeinen Weggrößenverfahrens.

Durch eine solche Aufbereitung ist auch die Vergleichbarkeit der Traglasttheorie mit vereinfachten Verfahren, mit der Finiten-Element-Methode und mit Versuchen gegeben.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Traglasttheorie stellen Tafeln mit freien Plattenrändern dar, die nicht mit vereinfachten Verfahren, wie z. B. dem Schubfeldmodell, berechnet werden können. In DIN 1052:2008 ist das Tragverhalten für Tafeln mit freien Plattenrändern lediglich empirisch in Form von pauschalen Tragfähigkeitsabminderungen berücksichtigt. Die Abminderung der Tragfähigkeit von Dach- und Deckentafeln mit freien Plattenrändern um $1/3$ gegenüber Tafeln mit allseits schubsteifen Plattenrändern stützt sich auf Versuche, die eine Verringerung der Tragfähigkeit um etwa $1/3$ ergaben. Eine Methode zur Berechnung der plastischen Tragfähigkeit existiert bislang nicht. Rein elastische Berechnungen ergeben einen erheblich größeren Abfall der Tragfähigkeit bei freien Plattenrändern um bis zu $3/4$. Dieser Widerspruch zeigt, dass eine linear-elastische Theorie das Tragverhalten solcher Tafeln nicht ausreichend genau wiedergibt und zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt

Trotz der sicherheitstechnischen Relevanz der vereinfachten Verfahren in DIN 1052:2008 fehlt ihre theoretische Absicherung durch eine geschlossene Theorie im Sinne einer Traglasttheorie. Gegenwärtig dienen die plastischen Reserven in ausreichendem Maße zur Abdeckung der Unzulänglichkeiten der vereinfachten Bemessungsverfahren, da z. B. trotz der ständigen Verletzung der Verträglichkeitsbedingungen bislang keine Schäden bekannt geworden sind.

Weiterhin erlauben die vereinfachten Verfahren es nicht, den wichtigen Einfluss plastizierender Zuganker sowie abhebender Lager zu berücksichtigen.

Durch die Ableitung von Bemessungsverfahren aus einer geschlossenen Traglasttheorie könnte das Tragverhalten ganzer ebener Holztafel-Systeme einschließlich möglicher Öffnungen ohne aufwendige nichtlineare FEM-Analysen zutreffender abgeschätzt und darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit der Holztafeln durch begründete und nicht zufällige Nutzung der plastischen Reserven erhöht werden.

Hierzu werden die bekannten Verfahren der Plastizitätstheorie aus dem Stahl- und Stahlbetonbau auf die besonderen Bedingungen der Tafelbauart angewendet.

Wegen des speziellen Tragverhaltens von Holztafeln:

- Verbundbauteile aus Rippen und Beplankung in unterschiedlicher Anordnung,
 - Plastizieren typisch in den Anschlüssen bzw. Stößen der Platten,
 - kinematischer Mechanismus in der Regel durch Schubverformungen oder durch Nachgeben der Lager,
 - teilweise sprödes Bruchverhalten der übrigen Bauteile,
- sind die Lösungsverfahren zur Ermittlung der Traglast aus dem Stahlbau (Fließgelenktheorie) nicht direkt anwendbar und müssen entsprechend erweitert werden. Abschließend müssen die Grenzen der Traglasttheorie für Holztafeln herausgearbeitet und zusammenfassend dargestellt werden.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten sind zusammen mit den erzielten Ergebnissen in Abschnitt 3.3 beschrieben. Es wurden folgende wesentliche Arbeiten durchgeführt:

- Entwicklung eines Werkstoffgesetzes für den Verbund von Rippen und Beplankung von Holztafeln
- Untersuchung des nichtlinearen Tragverhaltens von Holztafeln, insbesondere hinsichtlich einer Interaktion der Schnittgrößen innerhalb des Verbundes der Tafeln
- Erarbeitung eines Berechnungsverfahrens für Holztafeln zur Berechnung der elastischen und der plastischen Grenzlasten

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das Tragverhalten von Tafeln wird wesentlich von der Steifigkeit des Verbundes von Rippen und Beplankung geprägt, da im Verbund relativ zu den übrigen Bauteilen (Rippen, Beplankung) die größten Verformungen auftreten. Der Verbund wird in der Regel durch stabförmige Verbindungsmittel, das sind Nägel, Klammern oder Schrauben, hergestellt. Für die Traglasttheorie sind nur Verbindungen mit Verbindungsmitteln geeignet, die ein ausgeprägt duktilen Verhalten gewährleisten.

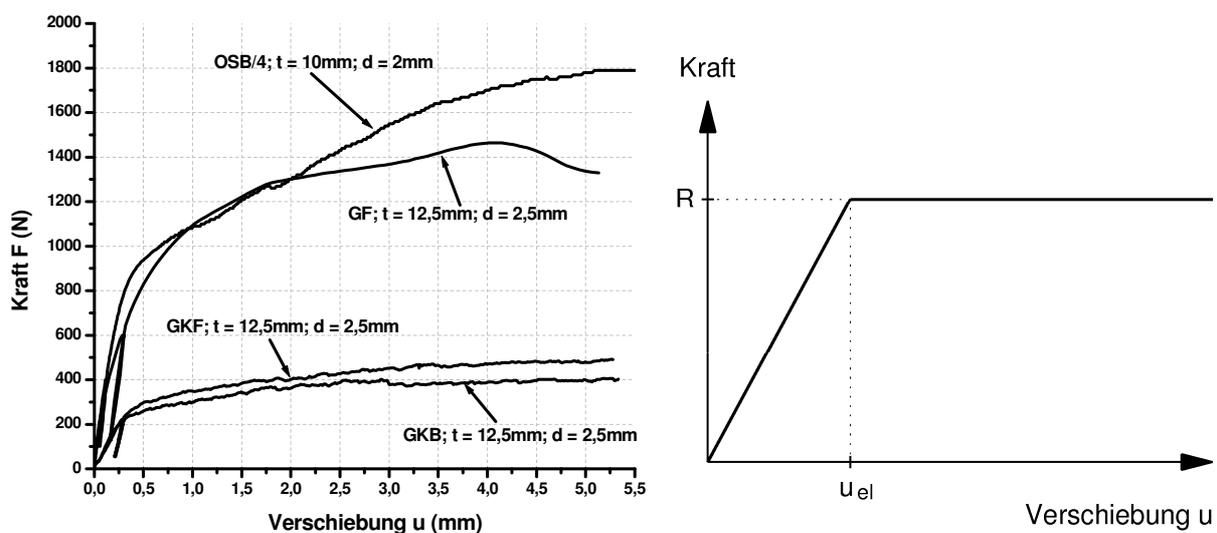


Bild 3-2: Kraft-Verschiebungsdiagramm einer Lochleibungsprüfung nach EN383 (links) [2] und vereinfachtes linear-elastisch-ideal-plastisches Kraft-Verschiebungsdiagramm (rechts)

Das der Traglasttheorie zugrunde zu legende Werkstoffgesetz des Verbundes musste folglich so gewählt werden, dass es einerseits das nichtlineare Tragverhalten der Verbindungsmittel in guter Näherung abbildet, dass es andererseits jedoch die aus der Traglasttheorie herzuleitenden Berechnungsgleichungen nicht zu umfangreich werden lässt und somit für die praktische Berechnung unattraktiv macht. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse aus [2] und unter Berücksichtigung des Abschnitts 12.2.1 der DIN 1052, nach dem für Verbindungsmittel, die auf Abscheren beansprucht werden, ein idealplastisches Kraft-Verformungsverhalten angenommen werden darf, wurde vereinfachend ein linear-elastisch-ideal-plastisches Werkstoffgesetz des Verbundes angenommen (Bild 3-2).

Zunächst wurde der Verbund zwischen Rippe und Beplankung unter Beanspruchungen senkrecht und parallel zum Beplankungsrand und unter Momentenbeanspruchung allgemein im elastischen und im plastischen Zustand beschrieben und die daraus resultierenden Schubflüsse s_0 parallel und s_{90} senkrecht zum Plattenrand erläutert.

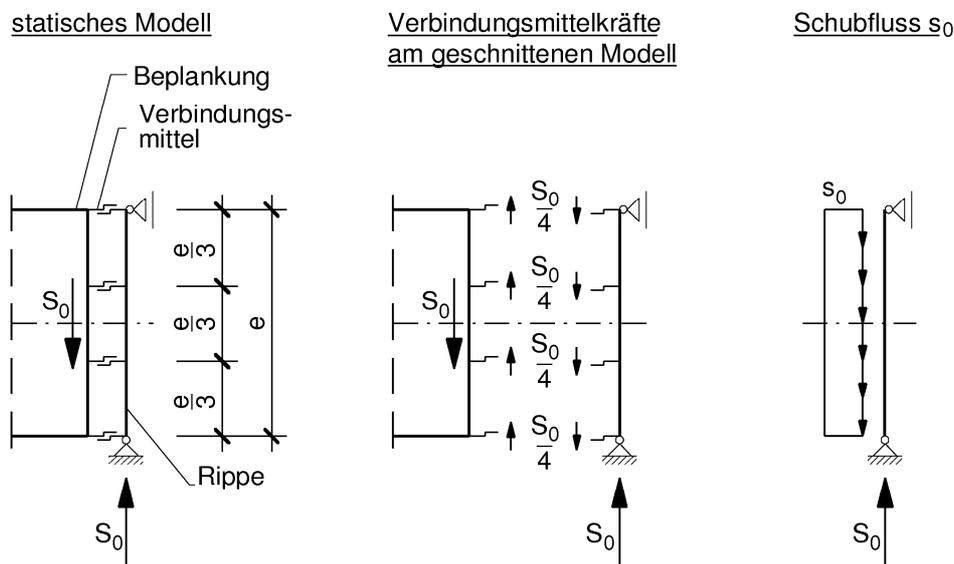


Bild 3-3: Verbund unter Beanspruchung parallel zum Beplankungsrand

Beispielhaft ist in Bild 3-3 der Verbund unter einer Beanspruchung S_0 parallel zum Beplankungsrand mit dem zugehörigen Schubfluss s_0 dargestellt.

Weiterhin wurden die **S_{90} -M-Interaktion** und die **S_0 -M-Interaktion im elastischen und im plastischen Zustand untersucht**. Unter Annahme des vereinfachten Werkstoffgesetzes nach Bild 3-2 (rechts) konnten die Interaktionsgleichungen für den plastischen Zustand formuliert werden:

$$S_{90}\text{-M-Interaktionsgleichung: } \left(\frac{S_{90,pl,M}}{S_{90,pl}} \right)^2 + \frac{M_{pl,S90}}{M_{pl}} = 1$$

$$S_0\text{-M-Interaktionsgleichung: } \left(\frac{S_{0,pl,M}}{S_{0,pl}} \right)^{2,3} + \left(\frac{M_{pl,S0}}{M_{pl}} \right)^{2,3} \leq 1$$

mit $S_{90,pl,M}$ = vorhandene Kraft senkrecht zum Beplankungsrand bei Interaktion mit $M_{pl,S90}$

- $S_{90,pl}$ = maximal aufnehmbare plastische Kraft senkrecht zum Beplankungsrand ohne Interaktion
- $M_{pl,S90}$ = vorhandenes Moment bei Interaktion mit $S_{90,pl,M}$
- $S_{0,pl,M}$ = vorhandene Kraft parallel zum Beplankungsrand bei Interaktion mit $M_{pl,S0}$
- $S_{0,pl}$ = maximal aufnehmbare plastische Kraft parallel zum Beplankungsrand ohne Interaktion
- $M_{pl,S0}$ = vorhandenes Moment bei Interaktion mit $S_{0,pl,M}$
- M_{pl} = maximal aufnehmbares plastisches Moment ohne Interaktion

Ausgehend von einer Relativverschiebung u und einer Relativverdrehung φ der Rippe gegenüber der Beplankung (Bild 3-4) wurden Gleichungen zur Berechnung der maximal aufnehmbaren Kraft $S_{0,pl}$ parallel zum Beplankungsrand und des maximal aufnehmbaren Momentes M_{pl} hergeleitet.

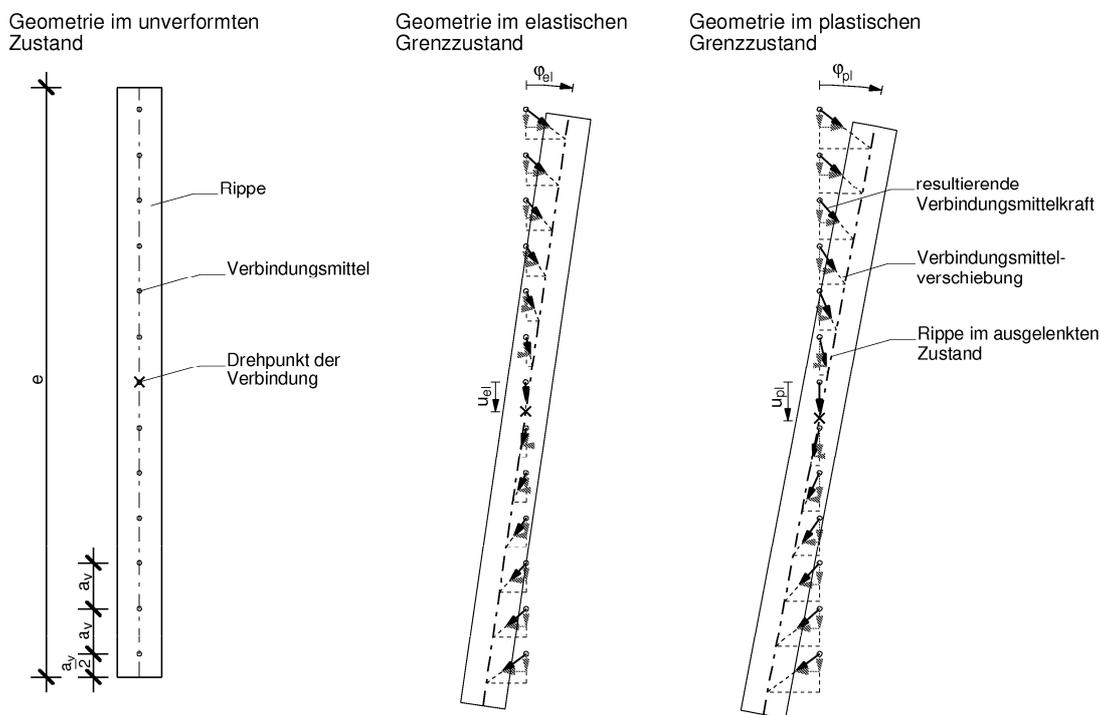


Bild 3-4: Verbindungsmittelverformungen und -kräfte im elastischen und im plastischen Grenzzustand

$$S_{0,pl,M} = 2 \cdot \frac{R}{a_v} \cdot \frac{u_{pl}}{\varphi_{pl}} \cdot \ln \frac{\sqrt{\frac{L^2}{4} \cdot \varphi_{pl}^2 + u_{pl}^2} + \frac{L}{2} \cdot \varphi_{pl}}{u_{pl}}$$

$$M_{pl,S0} = \frac{R}{a_v \cdot \varphi_{pl}} \cdot \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{L^2}{4} \cdot \varphi_{pl}^2 + u_{pl}^2} - \frac{u_{pl}^2}{\varphi_{pl}} \cdot \ln \frac{\sqrt{\frac{L^2}{4} \cdot \varphi_{pl}^2 + u_{pl}^2} + \frac{L}{2} \cdot \varphi_{pl}}{u_{pl}} \right)$$

- mit $S_{0,pl,M}$ = vorhandene Kraft parallel zum Beplankungsrand bei Interaktion mit $M_{pl,S0}$
- $M_{pl,S0}$ = vorhandenes Moment bei Interaktion mit $S_{0,pl,M}$
- R = elastische Beanspruchbarkeit des Verbindungsmittels (vgl. Bild 3-2 rechts)
- a_v = Verbindungsmittelabstand (vgl. Bild 3-4)

in den Randrippen berechnet werden. Mit den Gleichungen des Prinzips der virtuellen Verschiebungen ergibt sich die Traglast $F_T = 1110 \text{ N}$. Diese ist rund 40% größer als die elastische Grenzlast $F_{el} = 779 \text{ N}$. Der Vergleich mit einer FEM-Berechnung zeigte eine sehr gute Übereinstimmung.

Um die Interaktionsgleichungen zur Berechnung der Traglast an Holztafeln mit beliebiger Geometrie anwenden zu können, wurde ein **Berechnungsverfahren auf Basis des allgemeinen Weggrößenverfahrens** entwickelt.

Die Berechnung mit dem entwickelten Berechnungsverfahren ist in folgende Schritte gegliedert:

1) Darstellung der zu berechnenden Tafelgruppe als statisches Modell

Horizontale und vertikale Rippen werden als Stäbe (Balkenelemente), die Beplankung wird statisch als Scheiben modelliert. Zwei gegenüberliegende Rippen (z. B. Kopf- und Fußrippe einer Wand) laufen über die gesamte Länge der Tafelgruppe durch.

Festhaltungen (z. B. Verdübelung der Fußrippe mit der Stahlbeton-Deckenplatte oder vertikale Verankerungen) werden durch entsprechende Auflager an den Rippenenden berücksichtigt.

Die Kraftübertragung erfolgt i. d. R. von einer Rippe über die Beplankung zu anderen Rippen und von diesen wiederum in die Auflager. Dies ist dadurch gegeben, dass die Rippen mit den Beplankungen über Verbindungsmittel (Nägel oder Klammern) verbunden sind.

Vereinfacht verfügen die einzelnen Verbindungsmittel im Verbund zwischen Rippe und Beplankung über ein linear-elastisch-ideal-plastisches Materialverhalten (vgl. Bild 3-2).

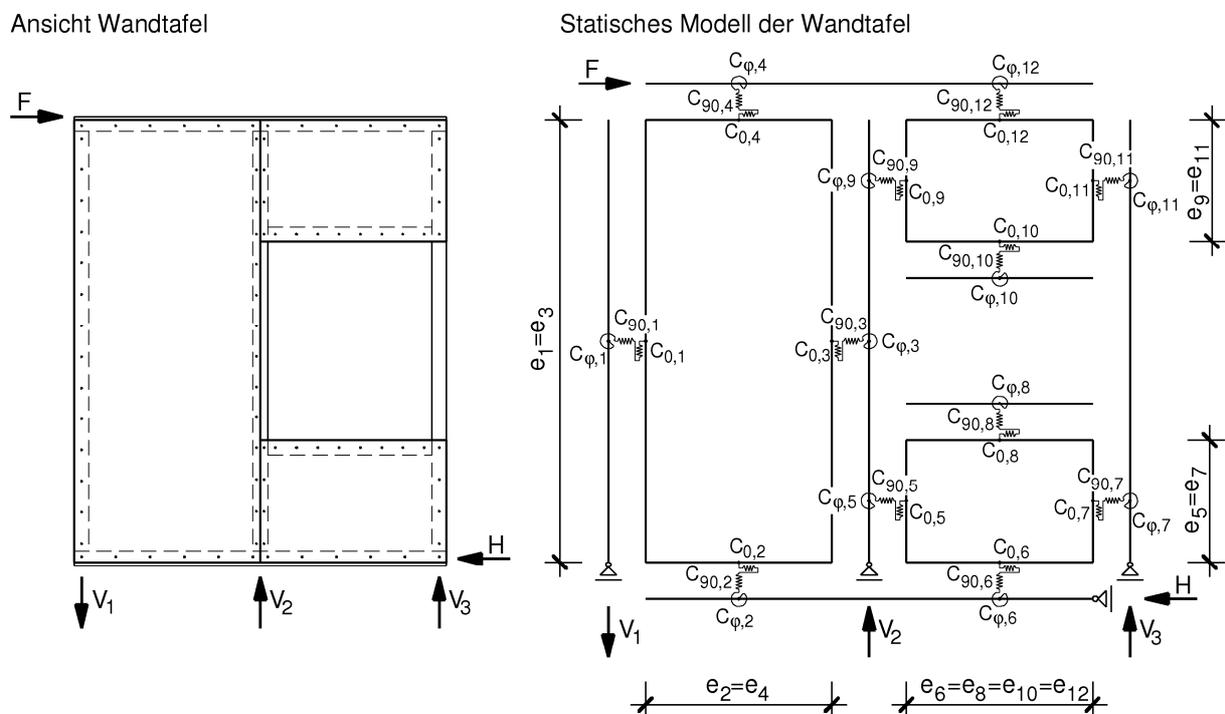


Bild 3-6: Beispiel für eine Wandtafel mit 12 Verbinden, die durch Federsteifigkeiten modelliert werden

Innerhalb einer Gruppe von Tafeln bestehen unterschiedlich lange Verbunde zwischen den einzelnen Beplankungselementen und den Rippen. Die Länge e_i eines jeden Verbundes ist abhängig von der Länge des Beplankungsrandes der angeschlossenen Beplankung.

Für jeden Verbund können im elastischen Bereich durch Kombination der einzelnen Verbindungsmittelfedersteifigkeiten k drei resultierende Federsteifigkeiten angegeben werden. Dies sind die Dehnfedersteifigkeit C_0 parallel zum Beplankungsrand, die Dehnfedersteifigkeit C_{90} senkrecht zum Beplankungsrand und die Drehfedersteifigkeit C_φ . Die drei Federsteifigkeiten C_0 , C_{90} und C_φ wirken in der Mitte des Beplankungsrandes, also im Schwerpunkt des Verbundes zwischen Rippe und Beplankung (Bild 3-6).

2) Kinematisch bestimmtes Hauptsystem festlegen

Analog zum allgemeinen Weggrößenverfahren [3] sind die unbestimmten Rippenverschiebungen, Rippenverdrehungen, Beplankungsverschiebungen, Beplankungsverdrehungen und die Zahl der linear unabhängigen Verschiebungszustände der Gesamtstruktur zu definieren, um den Grad m der kinematischen Unbestimmtheit des Gesamtsystems und daraus ein kinematisch bestimmtes Hauptsystem festzulegen.

3) Einheitsverformungszustände eintragen

Eintragen der m Einheitsverformungszustände w^j ($j = 1 \dots m$) und der zugehörigen Schnittgrößen $S_{90,el,i}$, $S_{0,el,i}$ und $M_{el,i}$ in jeweils eine Systemskizze. Dabei entspricht $i = 1 \dots n$ der Anzahl der Verbunde. In Bild 3-6 ist $n = 12$. Die Schnittgrößen werden in den Federn freigeschnitten und sind folglich aus den elastischen Federsteifigkeiten $C_{0,i}$, $C_{90,i}$ und $C_{\varphi,i}$ zu berechnen.

4) Gleichungssystem aufstellen

Anschreiben der Rippen-Gleichgewichtsbedingungen, der Beplankungs-Gleichgewichtsbedingungen und der Verschiebungs-Gleichgewichtsbedingungen in der Reihenfolge $j = 1 \dots m$.

Bei Beachtung dieser Reihenfolge ergibt sich ein symmetrisches Gleichungssystem für die Faktoren γ_j der Einheitsverformungszustände.

5) Gleichungssystem lösen

Lösen des linearen Gleichungssystems nach den γ_j .

6) Schnittgrößen $S_{90,el,i}$, $S_{0,el,i}$ und $M_{el,i}$ im elastischen Zustand infolge einer Einheitslast berechnen

Die elastischen Schnittgrößen infolge einer äußeren Einheitslast werden aus der Superposition berechnet. Z. B. ist $S_{0,el,i} = \sum(\gamma_j \cdot S_{0,j})$ an der Stelle i .

7) Elastische Grenzlast und plastische Federn ermitteln

Bis zum Erreichen der elastischen Grenzlast, d. h. bis zum Fließen des ersten Verbindungsmittels sind die Schnittgrößen $S_{90,el,i}$, $S_{0,el,i}$ und $M_{el,i}$ proportional zur äußeren Last. Folglich kann die elastische Grenzlast durch Faktorisieren der äußeren Einheitslast aus Schritt 6) berechnet werden.

Aus dem elastischen Grenzzustand ist ersichtlich, an welchen Stellen der Verbund zwischen Rippe und Beplankung plastiziert.

8) Anwendung der Interaktionsgleichungen

Durch Anwendung der Interaktionsgleichungen an den Stellen, an denen der Verbund plastiziert, können die plastischen Schnittgrößen $S_{90,pl,i}$, $S_{0,pl,i}$ und $M_{pl,i}$ berechnet werden.

9) (Iterative) Berechnung der Traglast

Durch Anschreiben des Gleichgewichts einzelner Bauteile (Rippe, Beplankung) kann die Traglast nun berechnet werden. Ist das Gleichgewicht nach Anwendung der Interaktionsgleichungen nicht mehr in allen Teilen erfüllt, dann ist der Verschiebungszustand im plastischen Grenzzustand solange iterativ zu verändern, bis wieder Gleichgewicht in allen Teilen herrscht.

Die Anwendung des Berechnungsverfahrens auf eine ideale Tafel, deren Rippen untereinander nicht verbunden sind, (Bild 3-7 links) liefert dieselbe Gleichung zur Berechnung der Traglast wie das vereinfachte Verfahren nach Schubfeldtheorie:

$$F_T = \frac{e_{hor}}{a} \cdot R$$

mit F_T = Traglast der Tafel

e_{hor} = Länge des Verbundes zwischen Kopfrippe und Beplankung (vgl. Bild 3-7)

a_v = Verbindungsmittelabstand

R = elastische Beanspruchbarkeit (Fließgrenze) eines Verbindungsmittels (vgl. Bild 3-2 rechts)

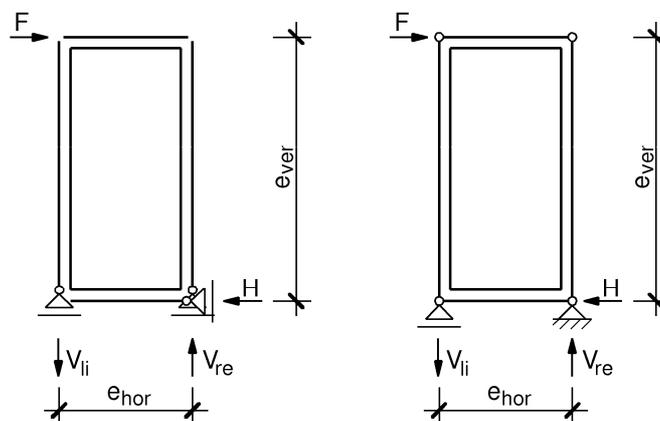


Bild 3-7: Tafel, deren Rippen nicht untereinander verbunden sind (links), und mit gelenkig verbundenen Rippen (rechts)

Damit konnte gezeigt werden, dass das vereinfachte Verfahren für die Tafel, deren Rippen untereinander nicht verbunden sind, gültig ist.

Dagegen ist das vereinfachte Verfahren nach Schubfeldtheorie auf die Tafel mit gelenkig verbundenen Rippen (Bild 3-7 rechts) nicht anwendbar. Hier ist die Berechnung der elastischen Grenzlast und der Traglast mit dem in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren möglich. Durch Iteration des Verschiebungszustandes mit den beiden Freiheitsgraden „Verdrehung der vertikalen Rippen“ und „Verdrehung der Beplankung“ kann die Traglast F_T berechnet werden.

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

In zukünftigen Arbeiten müssen die in dieser Forschungsarbeit bereits hergeleiteten und angewendeten S_{90} -M- und S_0 -M-Interaktionen um eine S_{90} - S_0 -M-Interaktion ergänzt werden. Diese Ergänzung ist unverzichtbar für eine allgemeine Übertragbarkeit des gezeigten Berechnungsverfahrens auf beliebige Tafelgeometrien und Belastungen.

Alle angeführten Gleichungen basieren bisher auf der Annahme, dass Rippen und Beplankung starr sind. Die Zulässigkeit dieser Annahme ist zu überprüfen und ggf. sollte eine Erweiterung der Herleitungen dahingehend stattfinden, die Biegesteifigkeit der Rippen und die Schubsteifigkeit der Beplankungen zu berücksichtigen.

Weiterhin muss das in dieser Arbeit auf Basis des allgemeinen Weggrößenverfahrens entwickelte Berechnungsverfahren in Matrixschreibweise formuliert werden, um es einer programmtechnischen Umsetzung näher zu bringen. Eine solche Umsetzung ist spätestens dann zwingend erforderlich, wenn das Verfahren der Arbeit von zur Kammer [4] folgend durch die dritte Dimension erweitert wird und dadurch auch räumliche Tafelstrukturen berechenbar werden, wie sie im Geschossbau grundsätzlich auftreten.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahrens ist in einer zukünftigen Arbeit der Einfluss der Verankerungen auf das Tragverhalten von Holztafeln zu untersuchen. Duktile Verankerungen werden dabei durch Federn mit elastischen oder elastisch-plastischen Werkstoffgesetzen modelliert. Spröde versagende Verankerungen werden durch den Ausfall starrer Auflager im statischen Modell berücksichtigt (iterative Berechnung).

3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

-

3.6 Verwertungspotential

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren und seinen Interaktionsgleichungen ist eine Traglastberechnung von Holztafeln mit und ohne Öffnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit möglich. Das Verfahren stellt eine in sich geschlossene Theorie dar, mit der das Tragverhalten von ebenen Tafeln und Tafelgruppen nachvollziehbar beschrieben werden kann. Es erspart die Durchführung aufwendiger nichtlinearer FEM-Analysen. Das Verfahren legt wegen der sehr schnell anwachsenden Zahl von Freiheitsgraden (pro Plattenrand 3) und des iterativen Prozesses die Programmierung nahe.

Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens kann die Wirtschaftlichkeit der Verwendung von Holztafeln durch begründete und nicht wie bisher durch zufällige Nutzung der plastischen Reserven erhöht werden. Gleichzeitig gewährleistet seine Anwendung die Einhaltung der im Sicherheitskonzept des Bauwesens akzeptierten Risiken im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

3.7 Beteiligte Wissenschaftler

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel (Antragsteller)

Dipl.-Ing. Christoph Hall (Projektmitarbeiter):

Interaktionsgleichungen; Berechnungsverfahren für Holztafeln zur Berechnung der elastischen und der plastischen Grenzlasten

4. Publikationen

Kessel M. H., *Zur Steifigkeit von Holztafeln*, Tagungsband 21. Hildesheimer Informationstag Holzbau (21. HITH), HAWK Hildesheim (2009)

Kessel M. H., Hall C., *Bearing Load Theory for Diaphragms*, CIB-W18-Meeting 42, Dübendorf (CH) (24. – 27.08.2009) – in Vorbereitung

Anlage 1: Literaturverzeichnis zum Abschlussbericht

- [1] Kessel M. H. (2004): Erläuterungen zu den Abschnitten 8.7 und 10.6 der DIN 1052-2004. Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung DGfH.
- [2] Kessel M. H., Huse M., Augustin R. (2001): Einfluss der Verbindungsmittelabstände auf die Tragfähigkeit von Wandtafeln, Schlussbericht an die AGIP beim MWK des Landes Niedersachsen, Labor für Holztechnik (LHT) Hildesheim
- [3] Duddeck H., Ahrens H. (1998): Statik der Stabtragwerke, Beton-Kalender 1998, Teil I, Ernst & Sohn
- [4] zur Kammer T. (2006): Zum räumlichen Tragverhalten mehrgeschossiger Gebäude in Holztafelbauart, Dissertation an der TU Braunschweig