

# Ein Beitrag zur Modellbildung von Fachwerken im Ingenieurholzbau

M-4-05/2014



Quelle: WIEHAG GmbH

**Matthias Rebhan**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Matthias Rebhan, BSc

# Ein Beitrag zur Modellbildung von Fachwerken im Ingenieurholzbau

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



## Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Personen bedanken, die mich während meiner Studienzeit unterstützt, gefordert und gefördert haben.

Als erstes möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie bedanken, ohne deren Hilfe und Unterstützung die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Insbesondere möchte ich mich bei meinem Betreuer DI Andreas Ringhofer für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung und Ausarbeitung dieser Arbeit bedanken. Für die vielen Gespräche und Diskussionen, durch welche er mir half, die Arbeit voranzutreiben und meine Gedanken und Vorstellungen auf den richtigen Weg zu führen. Es war mir eine Freude mit dir zusammenzuarbeiten!

Für die Grundsteinlegung und die Idee zu meiner Arbeit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer bedanken, der mir mit seinen Ratschlägen den Holzbau näher brachte und mich für eine genauere Beschäftigung mit diesem Baustoff faszinierte.

Für die zur Verfügungstellung der Software RStab, mit der die Parameterstudien durchgeführt wurden, möchte ich mich beim Unternehmen Dlubal bedanken.

Ein ganz herzliches Dankeschön möchte ich an dieser Stelle noch an meine Studienkollegen (besonders Gruppe 1) richten, durch deren Beitrag mein Studium zu einer unvergesslichen Zeit wurde.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mir das Studium ermöglicht hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Danke für eure Unterstützung und die Hilfe!





## Kurzfassung

Durch wesentliche Entwicklungen in der Anslusstechnik sowie in der Fertigung großer Leimholzquerschnitte, sind weitgespannte Holzfachwerke heutzutage eine ästhetische wie wirtschaftliche Alternative zu Lösungen in Stahl oder Stahlbeton. Mit größer werdender Dimension und Bedeutung dieser Bauwerke steigen auch die Anforderungen, deren Tragverhalten im Zuge der baustatischen Berechnung adäquat beschreiben zu können.

Basierend auf dem ideellen Fachwerkträger wird im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss bestimmter Parameter wie etwa die Gestaltung der Anschlusspunkte (Vollgelenk, Halbgelenk, realer Anschluss), daraus resultierender Exzentrizitäten sowie Effekten Theorie 2. Ordnung in der Modellbildung unterschiedlicher Fachwerktypen und Spannweiten untersucht.

Ergebnisse dieser Parameterstudie sind u. a. Empfehlungen zur effizienten Vorbemessung vorwiegend normalkraftbeanspruchter Fachwerkkomponenten und deren Anschlüsse.

## Abstract

Due to significant developments in connection technology and the production of large composite lumber sections, long-span wood trusses are an aesthetic and economic alternative to solutions in steel or reinforced concrete nowadays. With increasing dimensions and relevance of these structures, the need to be able to describe the structural behavior in the course of structural analysis adequately is rising. Based on the ideal truss the influence of certain parameters, such as the design of the connection points (fully jointed, half-jointed, real socket), resulting eccentricities and effects of 2nd order theory in the modeling of different truss types and widths in this work.

Results of this parameter study include recommendations for an efficient preliminary design of mainly normal force strained truss components and their connections.



## Modellierung von Fachwerken

1	Ziel der Arbeit .....	2
2	Beispiele für weitgespannte Fachwerke .....	3
2.1	VIP - Hangar Wien .....	3
2.2	Messehalle 11 Frankfurt .....	5
2.3	Gliederung der Arbeit .....	6

## Fachwerke im Ingenieurholzbau

1	Fachwerke in der Baustatik und im Holzbau .....	8
1.1	Bestandteile eines Fachwerkes .....	9
1.2	Geschichte der Fachwerklösungen aus Holz .....	11
1.3	Arten und Typen von Fachwerken .....	15
1.4	Statische Berechnung von Fachwerken .....	21
2	Anschlüsse bei Holztragwerken .....	31
2.1	Geschichte der Anschlusslösungen für Holzfachwerke .....	31
2.2	Zimmermannsmäßige Verbindungen .....	35
2.3	Ingenieurmäßige Verbindungen .....	36
2.4	Verbindungen bei Fachwerken .....	43
2.5	Anschlusstechniken bei Fachwerken .....	45
3	Systemeffekte bei Fachwerken .....	58
3.1	Geometrische Imperfektionen .....	59
3.2	Imperfekte Lasteinleitung .....	68
3.3	Imperfektes Material .....	70
3.4	Montage- und Herstellungseffekte .....	70

## Modellierung von Fachwerken unter Berücksichtigung von Systemeffekten und Exzentrizitäten

1	Druckbeanspruchte Bauteile aus Holz .....	75
1.1	Berechnung nach Theorie I. oder II. Ordnung .....	76
1.2	$k_c$ -Verfahren nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] .....	77

1.3	Krümmung eines Stabes .....	80
1.4	Schiefstellung eines Stabes .....	82
1.5	Lagerungsbedingungen eines Stabes .....	83
<b>2</b>	<b>Modellierung und Kapazität eines Holzbauanschlusses.....</b>	<b>85</b>
2.1	Definition der Anschlussgeometrie .....	86
2.2	Rotationskapazität .....	87
2.3	Verschiebungskapazität eines Anschlusses.....	94
2.4	Modellierung von direkten Anschlüssen .....	96
2.5	Modellierung von indirekten Anschlüssen.....	100
<b>3</b>	<b>Anschlusskonzentritäten .....</b>	<b>101</b>
3.1	Anschlussgeometrie .....	101
3.2	Anzuschließende Stabachsen .....	102
3.3	Abmessungen der anzuschließenden Bauteile.....	103

## Parameterstudie

<b>1</b>	<b>Einfluss der Modellierung eines Fachwerkes .....</b>	<b>106</b>
1.1	Ablauf der Modellierung in der Parameterstudie .....	106
<b>2</b>	<b>Ausgewählte Fachwerktypen für die Parameterstudie .....</b>	<b>108</b>
2.1	Streben/Pfosten - Fachwerk .....	108
2.2	Strebenfachwerk .....	109
<b>3</b>	<b>Ausgewählte Anschlüsse für die Parameterstudie.....</b>	<b>110</b>
3.1	Einzelanschlüsse für Bauteile.....	110
3.2	Kombinierte Anschlüsse.....	111
<b>4</b>	<b>Festgehaltene und variierte Parameter .....</b>	<b>113</b>
<b>5</b>	<b>Parameterstudie.....</b>	<b>114</b>
5.1	Bezeichnung der Kombinationen:.....	115
5.2	Fachwerk FA1.j .....	116
5.3	Fachwerk FA2.j .....	119
5.4	Fachwerk FA3.j .....	122
5.5	Fachwerk FB1.j.....	125

5.6	Fachwerk FB2.j.....	128
5.7	Fachwerk FB3.j.....	131
<b>6</b>	<b>Zusätzliche Untersuchungen an Fachwerken .....</b>	<b>134</b>
6.1	Fachwerk FC1 .....	135
6.2	Fachwerk FC2 und FC3 .....	138
<b>7</b>	<b>Darstellung und Vergleich der Ergebnisse .....</b>	<b>139</b>
7.1	Verformungsverhalten .....	140
7.2	Schnittkräfte in den Stäben .....	143
7.3	Änderung der Ausnutzung .....	150
7.4	Verhalten der Anschlüsse .....	155
7.5	Robustheit der Fachwerke .....	162

## Ergebnisse der Parameterstudie & Empfehlungen

<b>1</b>	<b>Ergebnisse der Parameterstudie .....</b>	<b>168</b>
1.1	Allgemeine Ergebnisse aus der Parameterstudie .....	169
1.2	Verformungsverhalten von Fachwerken .....	171
1.3	Schnittkraftumlagerung in den Stäben.....	176
1.4	Änderung der Querschnittsausnutzung.....	180
1.5	Verhalten der Anschlusspunkte .....	188
<b>2</b>	<b>Empfehlungen für die praktische Modellierung von Fachwerken</b>	<b>191</b>
2.1	Vorbemessung der Holzbauteile .....	192
2.2	Vorbemessung der Anschlüsse .....	194
2.3	Verformungsberechnung .....	196
2.4	Empfehlungen zum Ablauf.....	197
<b>3</b>	<b>Beispiel für die Bemessung .....</b>	<b>198</b>
3.1	Beispiel 1 - Birkenfachwerk mit Hirnholzanschlüssen .....	198
3.2	Beispiel 2 - Ablauf der Modellierung eines Fachwerkes .....	200
<b>4</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>205</b>

## Literatur



# Modellierung von Fachwerken

Fachwerke stellen in der Baustatik einen häufigen Fall für weitgespannte und hochbelastete Tragwerke dar. Bei der statischen Berechnung dieser kommt hier vorwiegend nicht die Balkentheorie sondern die Fachwerktheorie zum Einsatz. Diese ist besonders auf Fachwerke bzw. Stabwerke im Allgemeinen angepasst.

Bei der Modellierung von Fachwerken sind sowohl Informationen über die Bauausführung als auch die Herstellung des Fachwerks notwendig. Sobald diese Kenntnisse vorhanden sind, kann in der Modellierung damit begonnen werden, das tatsächliche (physikalische) Fachwerk durch ein statisches (numerisches) Fachwerk abzubilden. Dabei geben die Errungenschaften der Baustatik eine Vielzahl an Möglichkeiten, welche jeweils für einen bestimmten Fall verwendet werden können, oder falls erforderlich, an diesen angepasst werden.

Inhalt dieser Arbeit soll es sein, Einflüsse der Modellbildung sowohl auf die Tragfähigkeit, als auch auf die Gebrauchstauglichkeit von modernen Fachwerken im Ingenieurholzbau zu untersuchen. Diese können dabei sowohl von globalen als auch von lokalen Effekten stammen. Der globale Effekt verändert hierbei das Gesamtverhalten des Fachwerkes, wie etwa die Verformung oder das Knickverhalten des gesamten Tragwerkes. Durch die lokalen Effekte, welche durch die globalen Effekte in den Einzelstäben verursacht werden, können für diese spezifische Änderungen in der Nachweisführung eintreffen. Diese reichen von einer Erhöhung der Schnittkräfte bis hin zur Notwendigkeit von Verstärkungsmaßnahmen in den Anschlussbereichen eines Knotens.

Durch die Nutzung von EDV-Applikationen zur statischen Berechnung von Fachwerken ist es nicht nur möglich, jeden erdenklichen Lastfall abzubilden, sondern auch die Geometrie und den Steifigkeitsverlauf des Systems an die Wirklichkeit anzupassen. Mit Hilfe dieser genauen Modellbildung ist es nun machbar, sowohl das statische System in allen seinen Einzelheiten genau zu diskretisieren, sondern auch den Einfluss eingebauter Stahlbauteile auf die Duktilität des Gesamtsystemes zu berücksichtigen.

## 1 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, für die Planung und Errichtung von Fachwerken im Ingenieurholzbau wichtige Punkte zu untersuchen:

### Modellierung von Fachwerken

*„Bei Konstruktionen, die in der Lage sind, die inneren Kräfte über Verbindungen entsprechender Duktilität umzuleiten, dürfen elasto-plastische Methoden zur Berechnung der inneren Kräfte in den Bauteilen verwendet werden.“ [4]*

Aus der obigen normativen Aussage lässt sich schlussfolgern, dass in der statischen Berechnung nicht nur die Steifigkeiten der Querschnitte sondern auch das Verhalten und die Steifigkeit von Anschlüssen mitzuberücksichtigen sind. Bei Fachwerken ist der dazu notwendige Modellierungsaufwand eindeutig höher, als bei bekannten Rahmenkonstruktionen, da hier die Knotenanzahl meist eine geringere ist.

Daher wird in dieser Arbeit der Einfluss, welchen die Modellierung der zusätzlichen Parameter auf die Schnittkräfte und Verformungen eines Fachwerksystems hat, untersucht. Hierbei erscheint die Modellierung der Federn, welche die Anschlüsse charakterisieren einer der maßgebenden Punkte zu sein. Die zusätzlich durch die geometrischen Anforderungen auftretenden Exzentrizitäten in den Stabachsen, welche direkt aus dem Platzbedarf der Knoten und Stäbe resultieren, werden ebenfalls in der Berechnung berücksichtigt.

Aus diesen Ergebnissen soll ein Bewertungsschema für die Modellierung von Fachwerken gefunden werden, um es in der Praxis zu ermöglichen, eine Abschätzung des notwendigen Modellierungsaufwandes bereits zu Beginn der Berechnung vornehmen zu können.

### Systemeffekte bei Fachwerken

Aus den oben bereits beschriebenen Punkten, wie den Eigenschaften der Anschlüsse und den Exzentrizitäten der Stabachsen, lassen sich Parameter ableiten, welche hier allgemein als Systemeffekte beschrieben werden.

Aus diesen Systemeffekten und ihrem Einfluss in der Modellierung lässt sich das Verhalten des Anschlusses im Zuge der baustatischen Bearbeitung und dessen Veränderungen zwischen der Vorbemessung und der endgültigen Bemessung beschreiben.

Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf zusätzlichen Schnittkräften, welche im Zuge der Modellierung durch den Anschluss aufgenommen werden müssen.



## 2 Beispiele für weitgespannte Fachwerke

Die nachfolgenden Beispiele sollen einen Einblick in den aktuellen Stand der Technik und die Anforderungen an den Ingenieurholzbau geben und die Erfordernis der genauen Kenntnisse in der Modellierung widerspiegeln.

### 2.1 VIP - Hangar Wien

vgl. [34]

Bei diesem Bauvorhaben handelt es sich um eine Erweiterung des Flughafens Wien mit drei Bauabschnitten. Einerseits das Air Cargo Center (ACC) und das Handling Center West (HCW), welche der Flughafenlogistik zugeordnet sind und andererseits der VIP Hangar, welcher ein eigenständiges Bauwerk darstellt.

- Air Cargo Center (ACC)

Die Vollwandträger als Hauptträger in Längsrichtung haben Stützenweiten von 2 x 21 m und Querschnittsabmessungen von 44 x 147-307 cm auf. In diese eingehängt sind Fachwerke, welche aus Holzdruckpfosten und Stahlzugdiagonalen bestehen. Diese Fachwerke weisen eine Spannweite von 16,6 m als Einfeldträger auf und haben Höhen zwischen 1,4 m und 2,8 m.

- Handling Center West (HCW)

Hierbei bilden die Holzfachwerke bereits das Haupttragwerk. Diese haben Spannweiten zwischen 28 m und 35 m und eine Höhe von 2,45 m. Es war eine Ausführung aller Bauteile (sowohl Druckpfosten als auch Zugstreben) in Holz erforderlich, um den geforderten Brandschutz von R90 erreichen zu können.

- VIP Hangar

Der VIP Hangar stellt mit seinen Abmessungen von 60 m x 75 m x 20 m (B x L x H) eine Herausforderung an den Ingenieurholzbau dar. Alle Bauteile des Hangars, sowohl die Stützen als auch die Dachtragkonstruktion, sind in Holz gefertigt und müssen einer Brandwiderstandsdauer von 30 Minuten aufweisen. Die Stützen bestehen aus BSH und weisen eine Stützenhöhe von 20 m auf. Die Hauptträger der Dachkonstruktion sind Pfosten-Diagonalen Fachwerke mit Stahl-Zug-Diagonalen und überbrücken eine Spannweite von 75 m, mit einer Systemhöhe von lediglich 6 m. Trotz der großen Spannweite darf sich das Fachwerk im Bemessungsfall ULS nur rund 20 cm verformen, um ein Öffnen der Tore noch zu ermöglichen.

Planung:	Holzbauer und Partner ZT GmbH
Tragwerksplanung:	Vasko+Partner Ingenieure ZT GmbH
Ingenieurholzbau:	WIEHAG GmbH

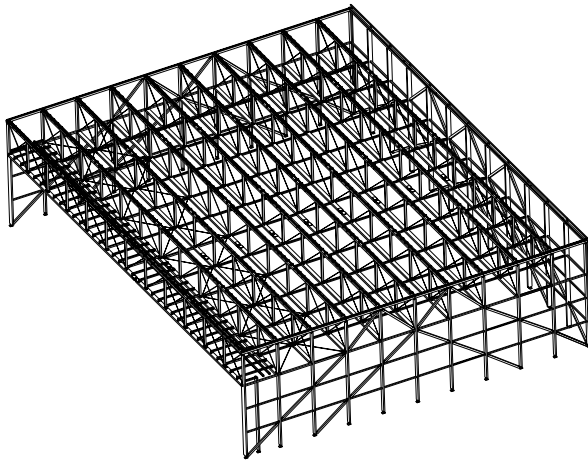


Abb. 2.1 Ansicht des Fachwerkes (oben), Axonometrie der geplanten Halle (Mitte links), Zugstaban-  
schluss (Mitte rechts), Montage der Fachwerke (unten) [34]

## 2.2 Messehalle 11 Frankfurt

vgl. [35]

Das Dachtragwerk der Messehalle 11 in Frankfurt wird durch eine Fachwerkkonstruktion gebildet. Dafür wird ein Streben / Pfosten - Fachwerk mit Stahlzugstreben verwendet, welches eine Spannweite von 75 m und beidseitige Kragarme mit 18,5 m aufweist. Um diese Spannweiten zu überbrücken, wurden die Fachwerke mit einer Höhe von 6 m hergestellt. Zur Herstellung der Dachkonstruktion inklusive aller zugehörigen Nebentragwerke wurden 2.500 m<sup>3</sup> BSH und 150 to Stahl verbaut.

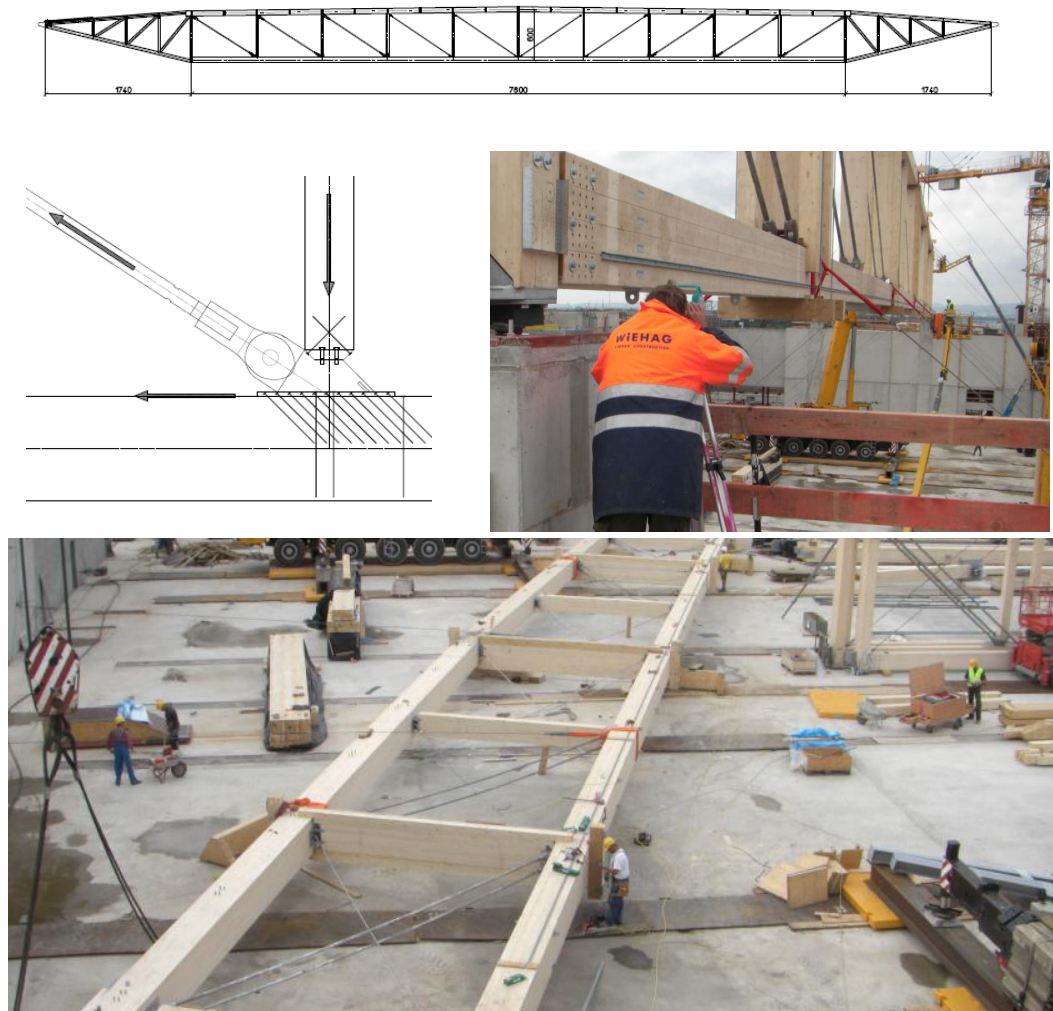


Abb. 2.2 Systemansicht Fachwerk (oben); Knotendetail eines Anschlusses (Mitte links); Montage der Fachwerkträger (Mitte rechts); Zusammenbau der Fachwerke am Boden (unten) [35]

Planung:  
 Ingenieurholzbau:

Hascher und Jehle & ATR Architekten  
 WIEHAG GmbH

Wie aus den beiden Beispielen ersichtlich wird, zeigt sich der Holzbau durch die Nutzung von Fachwerkkonstruktion als äußerst konkurrenzfähig zu den anderen Materialien. Durch die Nutzung von Holz können große Spannweiten bei vergleichsweise geringem Eigengewicht überbrückt werden, wodurch der Holzbau gerade im Vergleich zum Baustoff Beton eine oft wirtschaftliche und ansprechende Lösung darstellt. Diese Vorteile und die Tatsache, dass Holz eine optisch ansprechende Oberfläche aufweist, ermöglicht es dem Holzbau oft für den Bau von Prestigeprojekten wie Messehallen oder Veranstaltungsräume eingesetzt zu werden.

Bauwerke mit derartigen Spannweiten fordern ein großes Wissen des Berechnungsingenieurs und sind aufwändiger in den zu führenden Berechnungen und Modellbildungen.

## 2.3 Gliederung der Arbeit

Mit der nachfolgenden Arbeit soll gezeigt werden, worauf in der Modellbildung und statischen Bearbeitung von Fachwerken zu achten ist. Dies soll in folgenden Kapiteln nähergebracht werden:

- Fachwerke im Ingenieurholzbau

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Fachwerken erarbeitet. Von der Geschichte der Fachwerke, sowohl im Holzbau als auch im Allgemeinen, über die statische Berechnung dieser, die Ausbildung der Anschlüsse und die Auswirkungen der Material- und Bauteilinhomogenitäten auf die Berechnung werden hierzu die Grundlagen beschrieben.

- Modellierung von Fachwerken

Um die in der Baupraxis gebauten Fachwerke berechnen zu können, ist es notwendig, das physikalische Fachwerk in ein numerisches (statisches) Modell umzuwandeln. Dazu werden in diesem Kapitel die notwendigen Elemente zur Modellbildung, wie Druckstäbe oder Anschlüsse kurz dargestellt. Hierbei werden besonders die Eigenheiten von Anschlüssen bei deren Modellierung in einem numerischen Modell bearbeitet.

- Parameterstudie

Mit den aus dem Kapitel „Modellierung von Fachwerken“ erhaltenen Erkenntnissen wird eine Parameterstudie zu einer ausgewählten Reihe von Fachwerktypen durchgeführt.

- Ergebnisse der Parameterstudie

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse der geführten Parameterstudien. Diese werden dargestellt, untersucht und diskutiert. Ein Augenmerk dieses Kapitels soll dabei die Erstellung von Empfehlungen für die praktische Modellbildung bei Fachwerken sein. Dazu soll ein Leitfaden erstellt werden, welcher die statische Bearbeitung von Fachwerken im Ingenieurholzbau in Zukunft vereinfachen soll.

## Fachwerke im Ingenieurholzbau

Fachwerke stellen eine der ersten Bauweisen für tragende, weitgespannte und hochbelastete Konstruktionen dar. Auf Grund seiner leichten Formbarkeit und der großen vorhandenen Menge in der Natur, wurde Holz als einer der ersten Baumaterialien zur Herstellung von tragenden Konstruktionen (meist Abwandlungen von Fachwerken) verwendet.

Dabei wurden anfangs keine besonderen Anforderungen an die Querschnittsformen und die Verbindung der Querschnitte gestellt. Da bereits zu frühesten Zeiten Verbindungselemente wie Schnüre oder ähnliches zur Verfügung standen, konnte das Fügen und die Verbindung der einzelnen Stabelemente sehr einfach bewerkstelligt, und in weiterer Folge auch wieder sehr rasch und ohne Hilfsmittel rückgebaut werden.

Im Brückenbau dominierte im 18. Jahrhundert der Baustoff Holz, da andere Materialien nicht in ausreichender Menge oder erforderlicher Qualität zur Verfügung standen. Hierbei wurde vor allem im alpinen Raum folgend aus der handwerklichen Qualität der Arbeitskräfte beeindruckende Bauwerke wie etwa die Rosannabrücken in Strengen und die Rheinbrücke in Schaffhausen hergestellt. Der Bedarf an Brücken für den Eisenbahnbau zu Ende des 18. Jahrhunderts, jedoch das Fehlen von gut ausgebildeten Fachkräften führt in Amerika zur Entwicklung von einfachen, jedoch ausgeklügelten und durchdachten Fachwerkbrücken aus Holz. Diese wurden meist nach ihren Entwicklern benannt (Howe, Long, Town) und stellen die Grundlage für die später im Stahlbau angewendeten Konstruktionsprinzipien dar.[27]

Jedoch nicht nur im Holzbau, sondern auch im Stahl-, Beton und Verbundbau stellen Fachwerke im Bereich der weitgespannten Tragwerke und hier vor allem im Bereich der Brückenkonstruktionen auf Grund ihrer Vorteile ein maßgebendes Konstruktionselement dar. Zu Mitte des 19. Jahrhunderts wurde ein Großteil der Eisenbahnbrücken, welche oft nur geringe Höhenunterschiede überwinden mussten, als Trogbauwerke mit Fachwerkelementen als außenliegende Hauptträger, ausgeführt.

# 1 Fachwerke in der Baustatik und im Holzbau

Fachwerke sind aus einzelnen, meist geraden Stäben verbundene Tragwerke. Die Lastabtragung erfolgt bei dieser Art von Tragwerk größtenteils durch Druck und Zug. Im Gegensatz zu einem Biegeträger werden bei einem Fachwerk die für die Lastableitung nicht zwingend erforderlichen Querschnittsteile weggelassen.[17]

Durch diese Optimierung ergeben sich einige Vorteile von Fachwerken im Vergleich zu Biegeträgern oder Plattentragwerken:

- Gewichtsreduktion durch „Ausdünnen“ des Bauteils auf seine zwingend statisch erforderlichen Querschnittsbereiche
- größere Spannweiten durch geringeres Eigengewicht
- hoher Vorfertigungsgrad bei weitgespannten Systemen möglich

Die Verwendung von Fachwerken ist jedoch nicht nur mit Vorteilen verbunden:

- oftmals schwierige und aufwändige Anschlusskonstruktionen, um unterschiedliche Querschnittsformen miteinander zu verbinden - vorallem im Stahlbau
- Erhöhte Anforderungen an die Aussteifungssysteme durch vorrangig druckbeanspruchte Querschnitte
- große Anfälligkeit auf dynamische Lasten und Schwingungen

Als Folge der hier aufgelisteten Vorteile, welche in manchen Anwendungsfällen die Nachteile bei weitem überwiegen, kommen Fachwerke sehr häufig bei Tragkonstruktionen mit großen Spannweiten und hohen Belastungen zum Einsatz. Dabei sind begründet durch ihre hohen Anpassungsmöglichkeiten im Bezug auf Form, Gestaltung und statischer Tragwirkung und Lastableitung, den denkbaren Verwendungsmöglichkeiten kaum Grenzen gesetzt. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von kleinen Nebenträgerkonstruktionen und Aussteifungssystemen im Hallen- und Industriebau über die Verwendung als Haupttragwerk bis hin zu den hochbelasteten Hauptträgern von Eisenbahn- und Straßenbrücken.

## 1.1 Bestandteile eines Fachwerkes

Durch das große Anwendungsgebiet und den aus diesem folgenden Anforderungen gibt es sehr viele verschiedene Bauweisen von Fachwerken. Allen mehr oder weniger gemein sind jedoch die nachfolgend aufgelisteten Bauteile und Querschnittselemente:

- **Obergurt:** Dieser stellt die oberste Begrenzung des Fachwerkes dar. Er kann gerade, gebogen und gekrümmt oder geknickt ausgeführt werden. Aus statischer Sicht kann dieses Bauteil sowohl ein Fachwerkstab (reine Normalkraftbeanspruchung) oder auch ein Balkenstab (mit zusätzlichen Querkräften und Biegemomenten) sein. Der Obergurt ist durch die an den Knoten befindlichen Pfosten und Streben mit dem Untergurt verbunden. Bei Hallen- und Dachtragwerken wird der Obergurt meist zur Herstellung der Gebäudehülle verwendet und damit oftmals als deren „Auflager“.
- **Untergurt:** Der Untergurt weist die gleichen statischen Eigenschaften wie der Obergurt auf. Zusätzlich dient er meist zur Verbindung der Tragkonstruktion mit den Auflagerpunkten und übernimmt die Lastweiterleitung in diese.
- **Pfosten:** Pfosten stellen die vertikale Verbindung zwischen dem Ober- und Untergurt dar. In einem Großteil der Literatur werden jene Stäbe, welche Druckkräfte erhalten, auch unabhängig von ihrer Neigung als Pfosten bezeichnet.
- **Strebe:** Gemeinsam mit den Pfosten stellen Streben die Verbindung zwischen Ober- und Untergurt her. Sie weisen per Definition eine Schrägstellung auf und können sowohl Druck- als auch Zugkräfte übertragen, jedoch werden allgemein nur Bauteile mit Zugkräften als Strebe bezeichnet.
- **Knoten:** Knoten stellen die Verbindung zwischen dem Ober- und Untergurt und den Pfosten und Streben her. Durch ihre Ausführung wird die Steifigkeit und somit das Verformungsverhalten des gesamten Fachwerkes definiert.
- **Verbindungsmittel:** Darunter sind die zur Verbindung der Stäbe in den Knoten notwendigen Elemente zu verstehen.
- **Auflager:** Zur Ableitung der inneren Kräfte sind zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes Auflager notwendig, in welche das Fachwerk seine Schnittkräfte einleitet und somit diese in die Gründung des Bauwerkes gelangen.

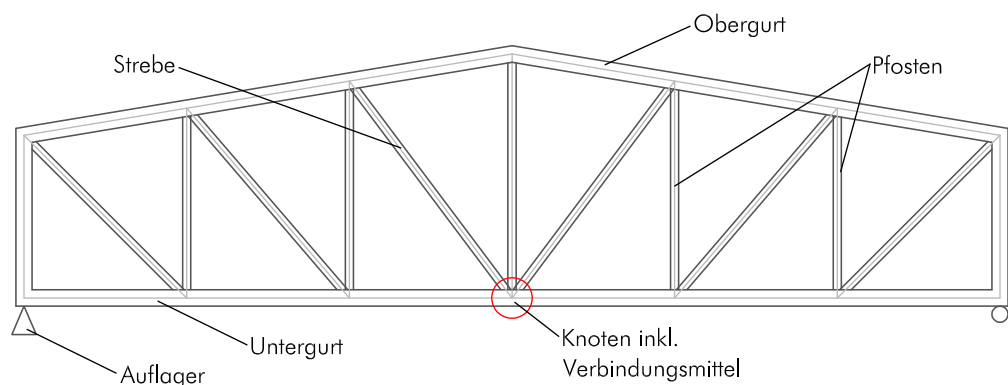


Abb. 1.1 Bestandteile eines Fachwerkes

Nicht alle Fachwerke müssen die oben aufgelisteten Elemente beinhalten. Die Art der Ausführung, Anzahl der Elemente innerhalb des Systems, sowie die Belastungsart sind sowohl von der Planung und Berechnung, als auch von den ästhetischen Ansprüchen an das Fachwerk abhängig.

Fachwerke stellen im Bereich der ästhetischen Ansprüche eine Sonderform unter den Tragkonstruktionen dar. Da es sich bei einem Fachwerk im Vergleich zu Tragkonstruktionen wie Biegeträgern um ein aufgelöstes System handelt, ist es dem Planer möglich, diese „Aufgelöstheit“ zu nutzen. So können Leitungsführungen für Elektro-, Wasser und Heizungsinstallationen direkt durch die Tragkonstruktion geführt werden. Durch die aufgelöste Form wird auch die Art und Richtung des Lichteinfalles verändert. Begründet durch deren „leichter“ wirkende Konstruktion wird der Benutzer des Gebäudes nicht durch die Tragstruktur eingeschränkt und der Betrachter hat ein „luftigeres“ Bild der Tragkonstruktion vor sich.

Eine Darstellung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) der gebräuchlichsten Fachwerktypen ist in Kapitel 2: 1. 3 Arten und Typen von Fachwerken, gegeben.



## 1.2 Geschichte der Fachwerklösungen aus Holz

Bereits in der Frühgeschichte der Menschheit wurden Fachwerke und davon abgewandelte Konstruktionen zur Überbrückung großer Spannweiten verwendet. Die einzige vorhandene Alternative zu Fachwerken stellten Bogen- und Gewölbeträgerwerke dar, welche jedoch auf Grund ihres sehr hohen Materialbedarfs und den herstellungsbedingten Einschränkungen in der Spannweite nur bei gewissen Bauwerken zum Einsatz kamen.

### Fachwerke im Wohnbau

Eine der ersten Bezeichnungen und die Namensgebung dieser Bauweise wurde von Vitruv (ca. erstes Jahrhundert vor Christus) geliefert: *„Fachwerk wünschte ich, wäre nie erfunden worden. So viel Vorteil es bringt, weil man es schnell ausführen kann und es die Räume weiter macht - umso größer und allgemeiner der Nachteil, dass es bereit ist, wie Fackeln zu brennen.“* [11] Vitruv bezog sich dabei in seiner Aussage auf die Verwendung des Fachwerkprinzips zur Herstellung tragender Außenwände für Gebäude.

Im Mittelalter und der in dieser Zeit stattfindenden Urbanisierung der Städte wurden Fachwerkhäuser mit einer größeren Geschossanzahl zur Abdeckung der erforderlichen Nutz- und Wohnflächen verwendet. Mit dem Beginn der Industrialisierung und der daraus folgenden besseren Rohstoffversorgung wurde der Fachwerkbau sehr schnell aus dem „Wohnbau“ verdrängt.



Abb. 1.2 Skelett eines nachgebauten Fachwerkhäuses [11]

Ihre Dauerhaftigkeit beweist diese Konstruktion auf Grund der Tatsache, dass noch heute einige der im späten Mittelalter hergestellten Gebäude die Zentren von Städten prägen. In der heutigen Zeit werden Fachwerkhäuser in einer abgewandelten Form noch immer im Fertigteilhausbau als Pfosten-Riegel oder Rahmenkonstruktion angewendet.



Abb. 1.3 Ansicht eines Fachwerkhouses (oben) [8]; Skelett eines Fachwerkhouses während der Sanierung (unten) [9]

## Fachwerke im Brücken- und Industriebau

Durch den großen Vorteil des sehr geringen Eigengewichtes und des im Vergleich zu den Materialien Stein und Metall sehr geringen Bearbeitungsaufwandes wurden Fachwerke aus Holz und dessen Abwandlungen zur Überbrückung großer Spannweiten im Industrie- und Brückenbau sehr häufig verwendet.

Eine der wenigen erhalten gebliebenen Dokumentation einer Brücke aus Holz mit einem Fachwerk als Tragstruktur geht auf Villard de Honnecourt (circa 1230) zurück. Dabei handelt es sich um eine Mischkonstruktion aus Sprengwerk und Fachwerk. Da de Honnecourt Kathedralbaumeister war, dürfte die Konstruktion aus einer Mischung der zur damaligen Zeit verwendeten Hebewerkzeuge entstanden sein.[12]

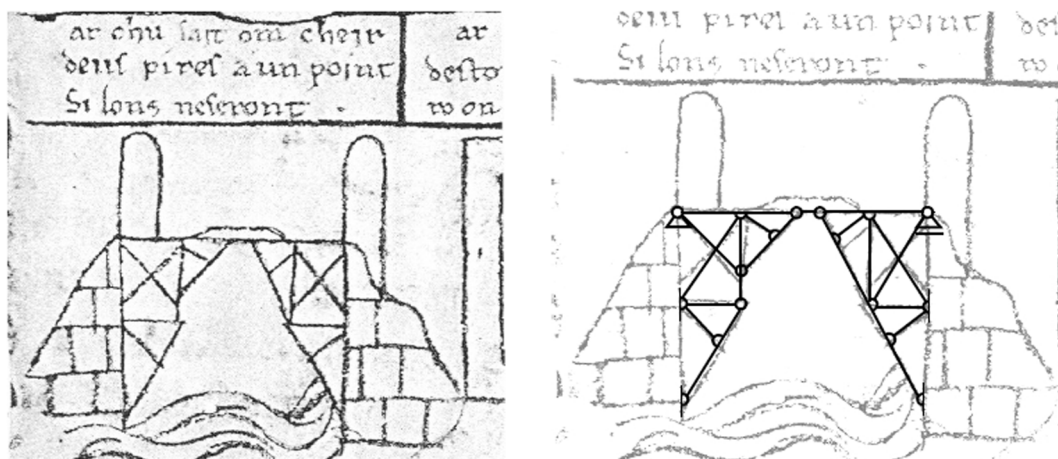


Abb. 1.4 Fachwerkartig verstrebt Brücke nach Villard des Honnecourt [12]

Leonardo da Vinci, bekannt als Universalgenie, lieferte im Jahre 1483 eine fachwerkartige Brücke, welche er mit folgender Aussage beschrieb: „Ich habe eine Anleitung zur Konstruktion sehr leichter und leicht transportabler Brücken, mit denen der Feind verfolgt und in die Flucht geschlagen werden kann.“ In der Sammlung seiner Werke (Codex Atlanticus) gab er gleich mehrere Vorschläge, wie eine Brücke mit Hilfe der einfachen Verkettung und Aneinanderreihung von Einzelstäben hergestellt werden kann.[12]

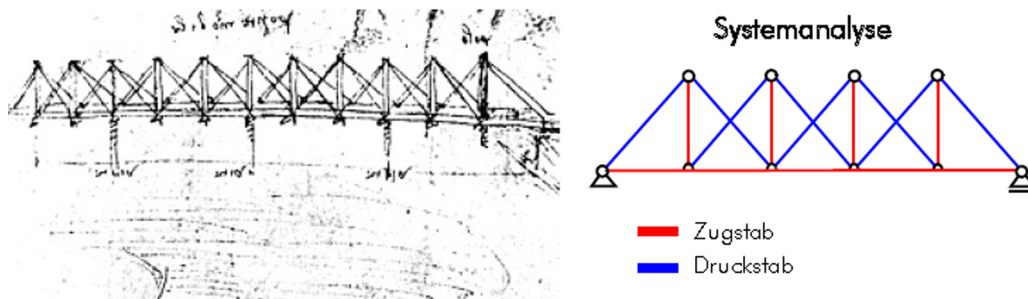


Abb. 1.5 Brückenkonstruktion aus dem Skizzenbuch Leonardo da Vincis [12]

Um 1570 veröffentlichte Andrea Palladio sein drittes Buch zur Architektur, in welchem er Holzbrücken beschrieb, welche ohne Stützkonstruktionen im Wasser ausgeführt werden konnten. Diese Konstruktionen können als erste regelrechte Fachwerke angesehen werden. Er beschrieb auch, dass die Spannweite des Systemes beliebig groß sein könne, da sich entsprechend dieser nur die Abmessungen der Querschnitte ändern müssten. [12]

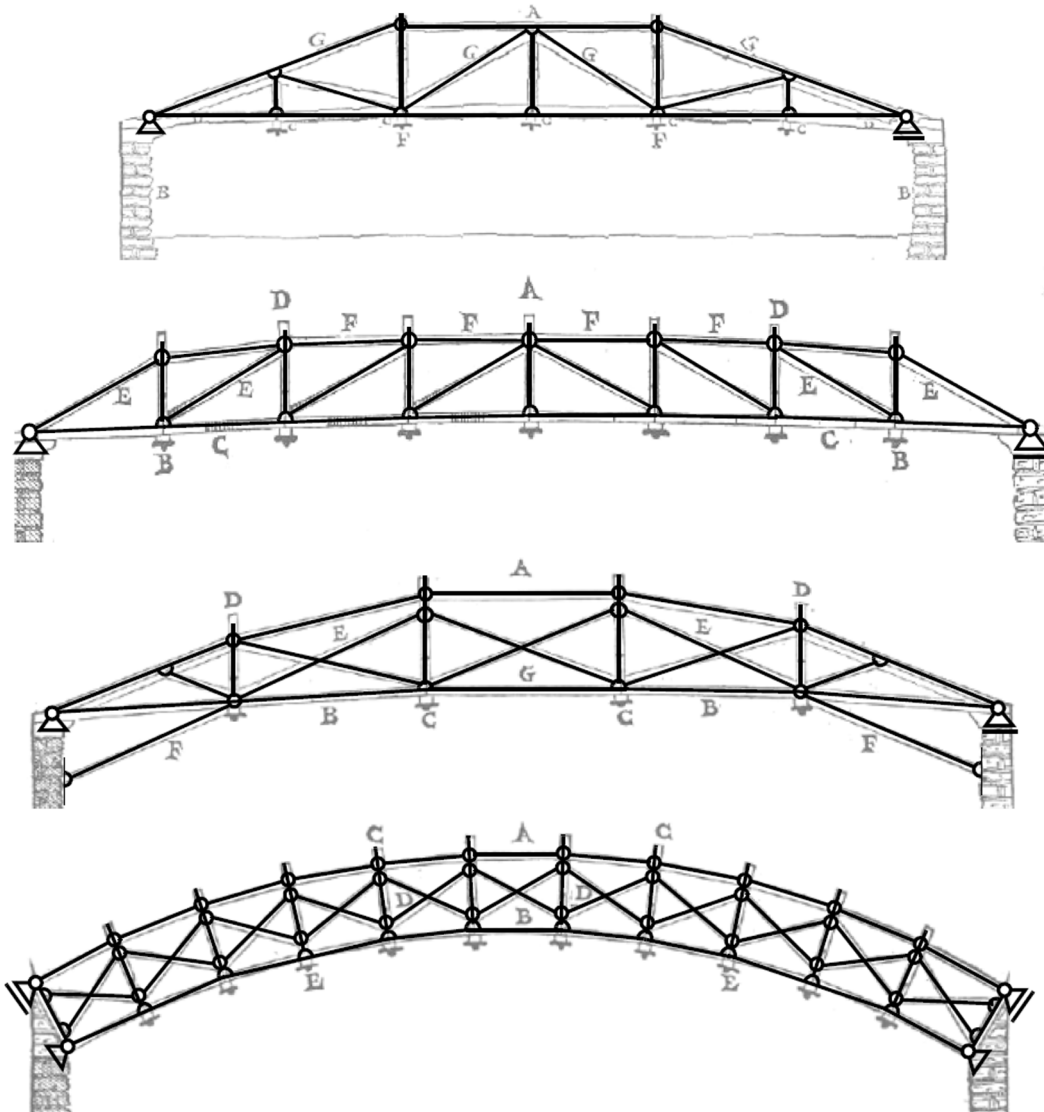


Abb. 1.6 Statisches System der vier durch Andrea Palladio beschriebenen Systeme [12]

Heute werden Fachwerke aus Holz meist im Bereich der Hallen- und Industriebauten verwendet. Hier sind mittlerweile Spannweiten größer 40 m keine Seltenheit mehr. Diese Konstruktionen sind auf die Verbesserungen in der Verbindungstechnik zurückzuführen. Für die Herstellung dieser werden hauptsächlich Querschnitte aus Brettschichtholz verwendet.

### 1.3 Arten und Typen von Fachwerken

Bei den verschiedenen Arten und Typen von Fachwerken ist eine Unterscheidung nach folgenden Gesichtspunkten möglich: [13]

- Ausfachungsart:
  - reines Strebenfachwerk
  - Strebenfachwerk mit Pfosten
  - Ständerfachwerk mit fallenden Streben
  - Ständerfachwerk mit steigenden Streben
  - Ständerfachwerk mit zur Mitte hin fallenden Streben
  - Ständerfachwerk mit zur Mitte hin steigenden Streben
  - Rautenfachwerk
  - K - Fachwerk
  - Hilfsfachwerk
- Trägerform:
  - Parallelträger
  - Trapezträger
  - Parabelträger
  - Polygon- oder Halbparabelträger
  - Dreieckträger
  - Fischbauchträger
- Dachträger:
  - Sparrendach
  - deutscher Binder
  - belgischer Binder
  - englischer Binder
  - französischer Binder
  - Sheddachbinder

Die Einteilung eines Fachwerkes erfolgt dabei in erster Linie nach der Trägerform und anschließend nach der Ausfachungsart. Dabei können die unterschiedlichen Ausfachungsarten den meisten Trägerformen zugeordnet werden.

Nachfolgend eine Beschreibung und Darstellung der einzelnen Fachwerktypen. Dabei werden jene nicht für die Arbeit und den Holzbau relevanten oder nicht mehr verwendeten Typen nicht näher betrachtet.

### 1.3.1 Parallelträger

Der Parallelträger stellt eine der einfachsten Formen eines Fachwerkes dar. Dabei wird die Tragwirkung eines Balkens in die notwendigsten Funktionen aufgeteilt. Die parallel zueinander verlaufenden Ober- und Untergurte übertragen dabei das auf den Träger einwirkende Moment. Die Streben und Pfosten, welche in den unterschiedlichsten Formen ausgeführt werden können, übernehmen dabei die in den Ober- und Untergurten auftretenden Querkräfte.

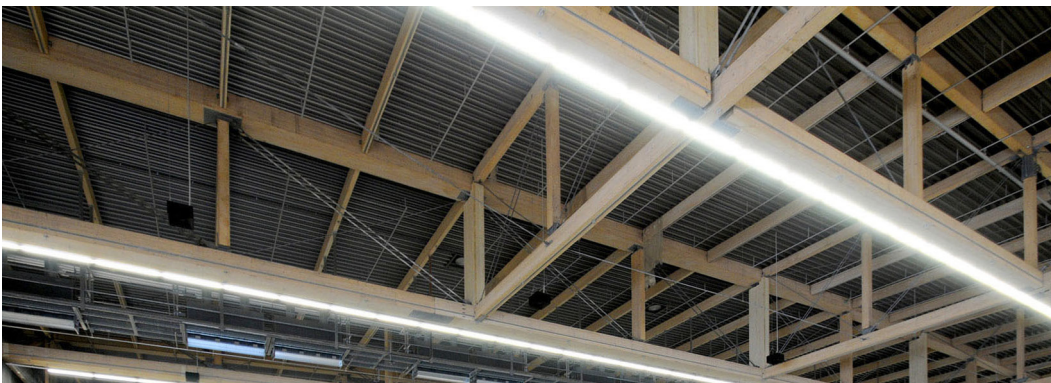
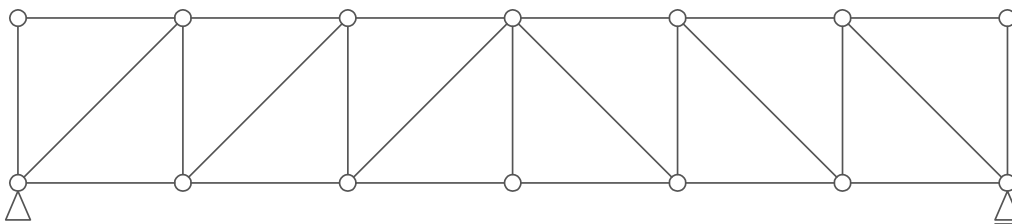


Abb. 1.7 Schematische Darstellung eines Parallelträgers und ein Beispiel als Hallendachtragwerk [15]

### 1.3.2 Trapezträger

Bei Trapezträgern bildet die Umhüllende der außenliegenden Stäbe die Form eines Trapezes. Dabei können die Ecken des Trägers sowohl nur leicht angeschrägt oder auch zur Gänze bis zur Unterkante gezogen werden. Ein Dreiecksträger stellt eine Sonderform des Trapezträgers dar. Durch diese Form des Trägers im Bereich der Auflager ist es möglich, Material einzusparen, da im Auflagerbereich die Momente meist kleiner als im Feldbereich sind und daher kein großer Hebelsarm notwendig ist, um diese abzutragen.

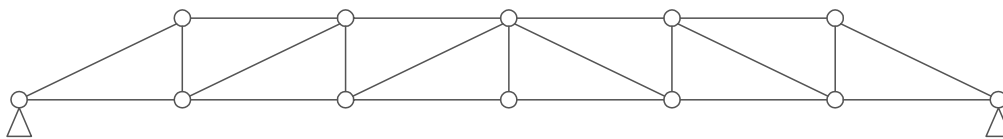


Abb. 1.8 Systemskizze eines Trapezträgers



Abb. 1.9 Trapezträger (Sonderform Dreieck) als Hallendach [14]

### 1. 3. 3 Parabelträger

Als Parabelträger werden Fachwerke bezeichnet, bei denen der Ober- oder Untergurt oder auch beide den Verlauf einer Parabel aufweisen. Ist nur einer der beiden Träger (sowohl Obergurt als auch Untergurt) parabolisch geformt, so wird der Träger als Bogen-sehnen- oder Bowstringträger bezeichnet. Weisen beide Gurte einen parabolischen Verlauf auf, so wird dieser als Linsenträger bezeichnet.

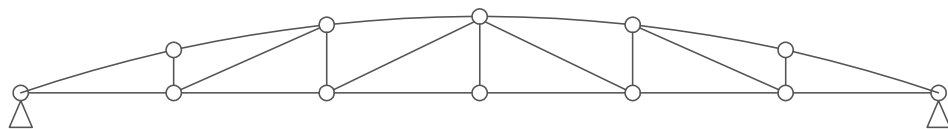


Abb. 1.10 Systemskizze eines Parabelträgers

### 1. 3. 4 Polygon- oder Halbparabelträger

Ein Polygon- oder Halbparabelträger stellt eine Sonderform des Parabelträgers dar. Dabei weist nur einer der Gurte eine Krümmung auf. Die Krümmung hat jedoch keinen gleichmäßigen Verlauf sondern wird durch einen Polygo oder einen Halbparabelzug approximiert. Diese Träger werden vor allem im Stahlbau verwendet, da die Biegung der Stahlquerschnitte zu aufwändig wäre, und daher die Krümmung durch Geradenstücke abgebildet wird.

### 1. 3. 5 Fischbauchträger

Der Fischbauch- oder Sichelträger stellt eine Sonderform des Parabelträgers dar. Bei Fischbauch- und Linsenträgern sind nur die Untergurte gekrümmt. Ein Sichelträger wird durch einen gekrümmten Ober- und Untergurt gebildet, die Auflagerpunkte können durch eine Gerade verbunden werden.

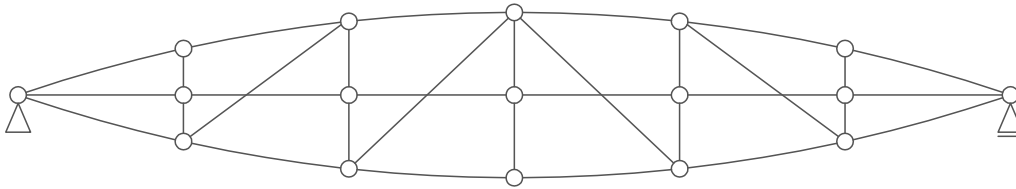


Abb. 1.11 Systemskizze eines Sichelträgers (oben) und Abbildung eines Fischbauchträgers als Hallen-tragwerk (unten) [15]

### 1. 3. 6 Reines Strebenfachwerk

Wenn beide Stablagen eines Fachwerkes, also sowohl die Streben als auch die Pfosten, geneigt sind und nicht orthogonal auf den Ober- oder Untergurt stehen, wird das Ausfachungssystem als Strebenfachwerk bezeichnet. Wenn beide Streben die gleiche Neigung zur Horizontalen aufweisen und damit ein gleichseitiges Dreieck erstellen, bezeichnet man die Ausfachung als reines Strebenfachwerk.

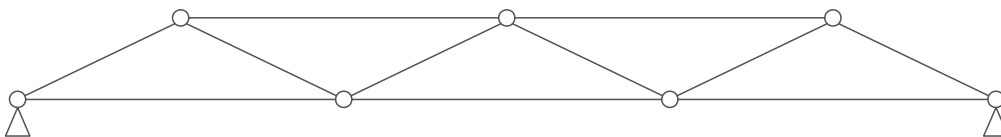


Abb. 1.12 Systemskizze eines reinen Strebenfachwerkes (oben) und ein Strebenfachwerk als Brückenhauptträger (unten) [16]



### 1. 3. 7 Strebenfachwerk mit Pfosten

Wird bei einem reinen Strebenfachwerk die Spannweite des Ober- und Untergurtes durch das zusätzliche Einfügen eines Stabes an den Schnittpunkten der beiden Streben verringert, spricht man von einem Strebenfachwerk mit Pfosten. Wird dazu als Außenform des Fachwerkes ein Parallelträger verwendet, es entstehen dabei rechtwinkelige Dreiecke.

### 1. 3. 8 Ständerfachwerk mit Streben

Ein Ständerfachwerk weist die gleichen Elemente wie ein Strebenfachwerk mit Pfosten auf. Der Unterschied zu einem Strebenfachwerk liegt in der Ausrichtung der Streben. Bei einem Strebenfachwerk sind diese immer gegenläufig zueinander angeordnet. Bei einem Ständerfachwerk verlaufen die Streben in die gleiche Richtung. Je nach Betrachtungsrichtung können sie dabei fallend (von links oben nach rechts unten) oder steigend (von links unten nach rechts oben) sein.

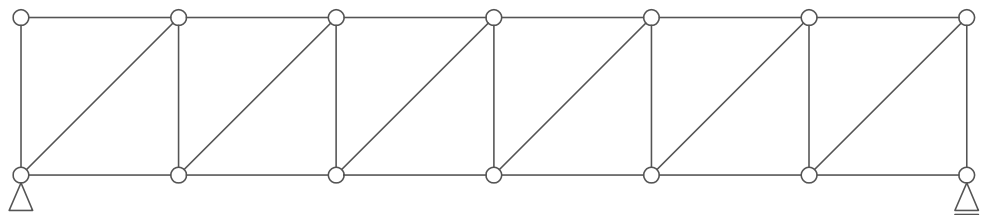


Abb. 1.13 Systemskizze eines Ständerfachwerkes mit steigenden Streben

### 1. 3. 9 Ständerfachwerk mit zur Mitte hin fallenden oder steigenden Streben

Eine Sonderform des Ständerfachwerkes mit Streben stellen die zur Mitte hin fallenden oder steigenden Streben dar. Dabei ändert sich der Verlauf der Streben ab der Symmetrieachse des Fachwerkes. Bei dieser Art des Fachwerkes ist daher eine gerade Anzahl an Feldern notwendig. Diese Ausfachungsart wird auch als Streben / Pfosten - Fachwerk bezeichnet.

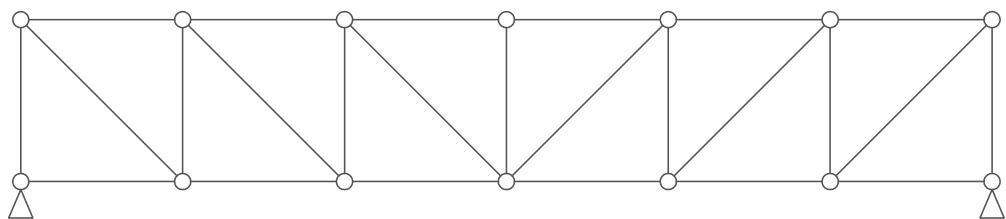


Abb. 1.14 Systemskizze eines Ständerfachwerkes mit zur Mitte hin fallenden Streben

### 1. 3. 10 Rautenfachwerk

Durch eine x-förmige Ausfachung zwischen dem Ober- und dem Untergurt wird ein Rautenfachwerk erzeugt. Dabei schneiden sich die Streben in deren Mittelpunkt. Diese Fachwerkart wurde in den Anfängen des Ingenieurholzbauwes oft verwendet, da die Herstellung mit geteilten Querschnitten sowohl in der Montage als auch in der Verbindung sehr einfach durchzuführen war.

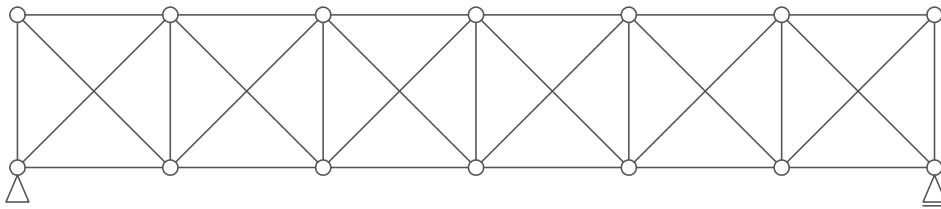


Abb. 1.15 Systemskizze eines Rautenfachwerkes

### 1. 3. 11 K - Fachwerk

Bei der Anbringung von K-förmigen Ausfachungselementen und der Verbindung dieser mit dem Ober- und Untergurt wird ein K-Fachwerk konstruiert. Diese Fachwerkart wird meist für Verbände in der Dachebene verwendet.

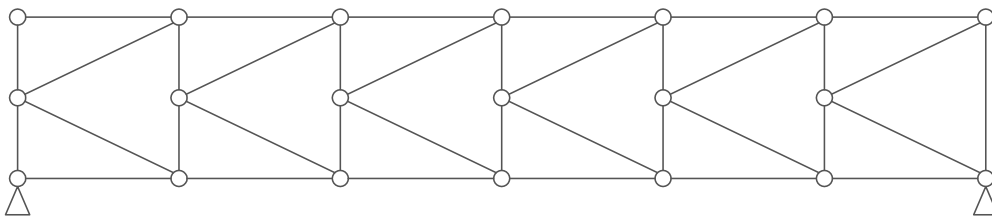


Abb. 1.16 Systemskizze eines K-Fachwerkes

Auf Grund der großen Anzahl an Systemen und deren unterschiedlichen Vor- und Nachteilen sowohl im Bezug auf Herstellung, Montage, Tragfähigkeit und Wartung kommt es nicht selten zu einer Vermischung der einzelnen Systeme untereinander.

## 1. 4 Statische Berechnung von Fachwerken

Zur Ermittlung der Schnittkräfte in den Stäben eines Fachwerkes und der Verformungen und Verkrümmungen des gesamten Tragwerkes gibt es eine Vielzahl von Methoden. Einige davon stammen aus den Anfangszeiten der Statik und Mechanik, andere finden auch heute noch Anwendung und spiegeln den aktuellen Stand der Technik wieder.

Am Beginn der Tragwerksplanung und des Entwurfes eines Fachwerkes stehen die statische Bestimmtheit des Fachwerkes und das sich daraus ableitende Bildungsgesetz für Fachwerke. Werden die Gesetzmäßigkeiten dieser beiden nicht eingehalten, so kann dies zu ungewollten Bedingungen für das Fachwerk führen, welche im schlimmsten Fall dazu führen können, dass das Fachwerk instabil ist, und sich in weiterer Folge eine kinematische Kette bildet und keine Berechnung des Fachwerkes möglich ist.

### 1. 4. 1 Statische Bestimmtheit von Fachwerken

Anders als bei Balkentragwerken ist ein Fachwerk nicht automatisch statisch bestimmt, sollten sich die Auflagerkräfte auf Grund der folgenden drei Gleichgewichtsbedingungen bestimmen lassen:

- $\sum H = 0$  Summe der äußeren horizontalen Kräfte ist Null.
- $\sum V = 0$  Summe der äußeren vertikalen Kräfte ist Null.
- $\sum M = 0$  Summe der einwirkenden Momente ist Null.

Lassen sich die Auflagerkräfte mit den drei Gleichgewichtsbedingungen bestimmen spricht man von einem äußerlich statisch bestimmten Fachwerk. Daraus folgt jedoch nicht automatisch (anders als bei Balkentragwerken) das es sich auch um ein innerlich statisch bestimmtes System handelt.

Die innerliche statische Bestimmtheit lässt sich wie folgt ermitteln:

- $S = 2 \cdot k - 3$ 
  - $S$  = Anzahl der Stäbe innerhalb des Fachwerkes
  - $k$  = Anzahl der Knotenpunkte im Fachwerk
  - $3$  = entspricht den Gleichgewichtsbedingungen in der Ebene

So lässt sich für Fachwerke folgende Regel aufstellen:

- $S = 2 \cdot k - 3$  -> das Fachwerk ist stabil und innerlich statisch bestimmt
- $S > 2 \cdot k - 3$  -> stabil, jedoch innerlich statisch unbestimmt

Der Grad der statischen Unbestimmtheit ist dabei  $S - 2 \cdot k + 3$  definiert

- $S < 2 \cdot k - 3$  -> das Fachwerk ist labil und nicht im Gleichgewicht

Ist das Fachwerk, wie im ersten Fall stabil und innerlich statisch bestimmt, können die Schnittkräfte einfach bestimmt werden, da diese nicht an das Verhalten des Gesamttragwerkes gekoppelt sind. Ist das Fachwerk stabil, jedoch innerlich unbestimmt, hängt die Verteilung der Schnittkräfte von allen, an einen Knoten anschließenden Bauteilen und deren Steifigkeitsverteilung ab. Ist das Fachwerk wie im dritten Fall labil und nicht im Gleichgewicht, so bildet dies eine kinematische Kette aus, welche sich nur nach den Rechengesetzen der Dynamik berechnen ließe. Daraus folgt, dass dieser Fall unzulässig ist, und eine Anpassung des Fachwerkes durchzuführen wäre.

#### 1. 4. 2 Bildungsgesetze für Fachwerke

Um statisch bestimmte, ebene Fachwerke zu bilden, sollten gewisse Regeln eingehalten werden. Diese werden durch drei Bildungsgesetze beschrieben. Bei Einhalten dieser kann davon ausgegangen werden, dass das Fachwerk immer stabil ist und somit berechnet werden kann. Jedoch kann nicht zwingend auch von einer innerlichen statischen Bestimmtheit ausgegangen werden. [13]

- 1. Bildungsgesetz:

Durch das Anfügen von zwei Stäben an die Stabendknotenpunkte eines einzelnen Stabes wird ein Dreieck gebildet. Dieses wird durch Anfügen zweier weiterer Stäbe in ein Trapez aus zwei Dreiecken verwandelt. Demnach erhöht sich die Anzahl der Knoten um eins und jene der Stäbe um zwei, womit die statische Bestimmtheit mit  $S = 2k - 3$  eingehalten wird.

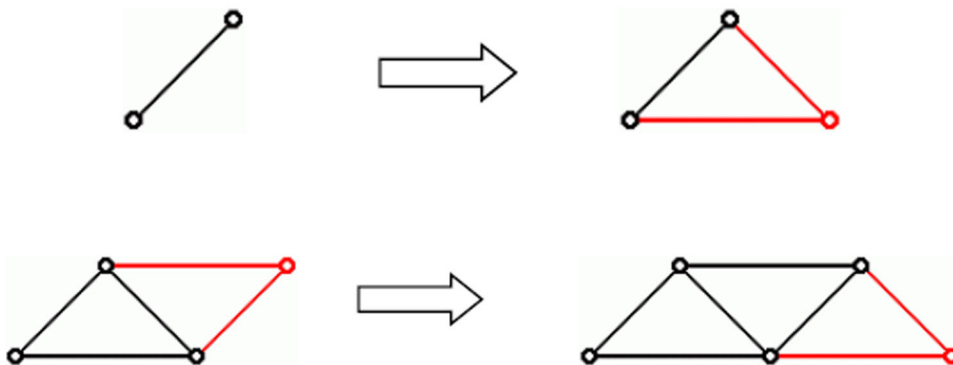
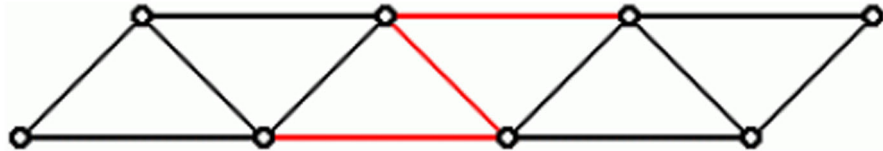


Abb. 1.17 Darstellung des ersten Bildungsgesetzes [13]

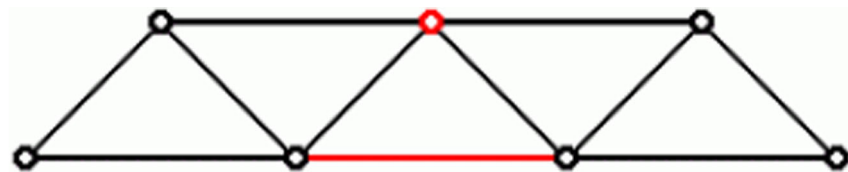
- 2. Bildungsgesetz:

Beim Zusammenfügen zweier nach dem 1. Bildungsgesetz gebildeten Fachwerken entsteht wiederum ein statisch bestimmtes System, welches die Regeln der Bestimmtheit beinhaltet:

- Verbindung mittels dreier Stäbe:



- Verbindung mittels eines Stabes und einem Knoten:



- 3. Bildungsgesetz:

Bei nach dem 1. und 2. Bildungsgesetz aufgebauten Fachwerken ist es möglich, die statische Bestimmtheit (Bedingung  $S = 2k - 3$ ) durch Herausnehmen einzelner Stäbe an einer Stelle und Einfügen dieser an anderer Stelle beizubehalten.

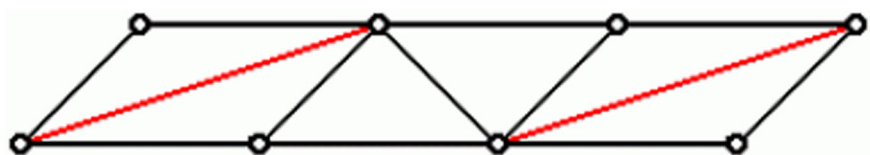
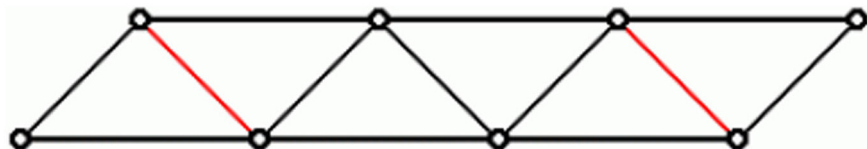


Abb. 1.18 Verwandlung nach dem dritten Bildungsgesetz [13]

Diese Bildungsgesetze können größtenteils nur für Fachwerke mit dreiecksförmigen Ausfachungen genutzt werden. Bei anderen Fachwerken ist die Anwendung auf Grund der unterschiedlichen Geometrien sehr schwierig.

## 1. 4. 3 Nullstäbe

Nullstäbe sind Stäbe die weder Druck- noch Zugkräfte erhalten. Vor der Bestimmung der Stabkräfte (sowohl grafisch als auch rechnerisch) ist es ratsam, alle im System vorhandenen Nullstäbe zu bestimmen, um den Rechenaufwand zu verringern.

Zur Erkennung von Nullstäben gibt es im Allgemeinen drei Gesetzmäßigkeiten: [13]

- Schließen an einen Knoten nur zwei Stäbe an und wirkt die äußere Kraft in Richtung der Stabachse eines Stabes, so ist der andere Stab ein Nullstab.
- Sind an einem unbelasteten Knoten zwei Stäbe angeschlossen, welche nicht die gleiche Ausrichtung der Stabachse aufweisen so ist einer der Stäbe ein Nullstab.
- Sind an einem unbelasteten Knoten drei Stäbe angeschlossen, so ist jener Stab, welcher nicht die gleiche Richtung der Stabachse wie die anderen beiden aufweist, ein Nullstab.

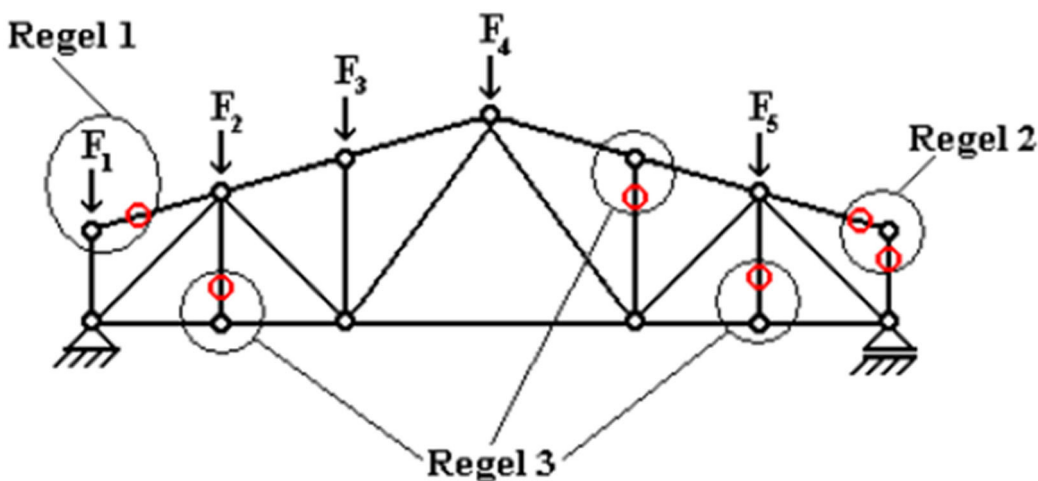


Abb. 1.19 Regeln zu Erkennung von Nullstäben [13]

Gerade bei der Berechnung von Fachwerken mittels händischer Methoden kann das Auffinden von Nullstäben eine große Einsparung von erforderlichen Rechenwegen mit sich bringen. Bei der Unterstützung durch rechnergestützte Methoden werden diese Stäbe bei einfachen Modellen ebenfalls nicht berücksichtigt, dies ergibt sich jedoch einfach aus dem Umstand, dass keine Schnittkraft in diesen Stäben resultiert. Bei komplexeren Rechenmodellen werden diese schon alleine auf Grund ihres vorhandenen Eigengewichtes in der Berechnung mitberücksichtigt.

#### 1. 4. 4 Rundschnitt

Auch als Knotenpunktverfahren bezeichnet.

Hierbei wird ein Knoten mit all seinen Elementen, sowohl Stäben als auch Kräfte, herausgeschnitten und an Freischnitt das Gleichgewicht betrachtet. Da sich in der Idealisierung alle Stabachsen in einem Punkt treffen, ist die Gleichgewichtsbedingung  $\sum M=0$  hinfällig.

Da sich mit den beiden Gleichgewichtsbedingungen  $\sum V=0$  und  $\sum H=0$  nur zwei Stabkräfte bestimmen lassen, dürfen bei der Anwendung dieses Verfahrens nur zwei Stabkräfte unbekannt sein.

#### 1. 4. 5 Ritterschnitt

Dieses Verfahren ist nach August Ritter (1826-1908) benannt. Ritter war Lehrer an der Polytechnischen Schule in Hannover und später Lehrer für Ingenieurmathematik und Mechanik an der Hochschule Aachen. [11]

Um die Schnittkräfte in den Stäben eines Fachwerkes zu berechnen, wird das Fachwerk in zwei Teile geschnitten. Dabei ist darauf zu achten, dass nur drei Stäbe dabei durchgeschnitten werden. An diesen drei Stäben ist es nun möglich, mit Hilfe der drei Gleichgewichtsbedingungen  $\sum V=0$ ,  $\sum H=0$  und  $\sum M=0$  die Kräfte in den Stäben zu ermitteln.

Nach Definition der Gleichgewichtsbedingungen an den Stäben lassen sich diese auf nur mehr eine einzige Unbekannte begrenzen, welche sich durch die Randbedingungen lösen lässt.

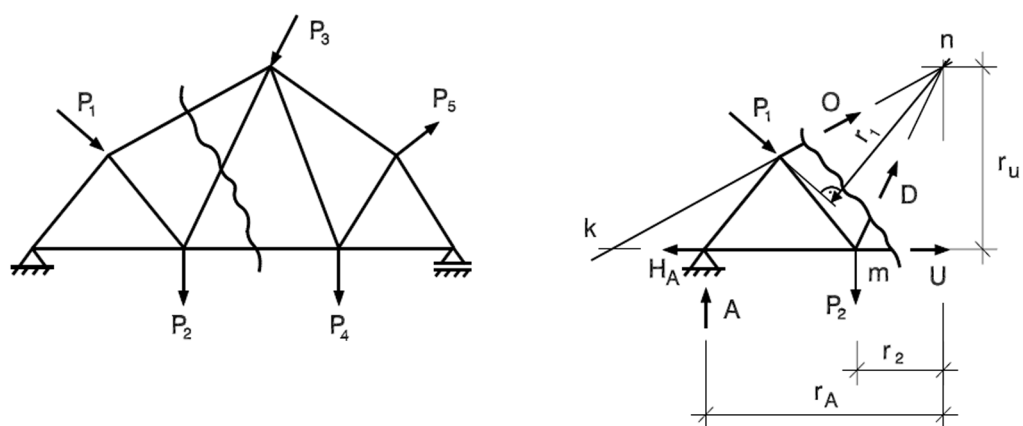


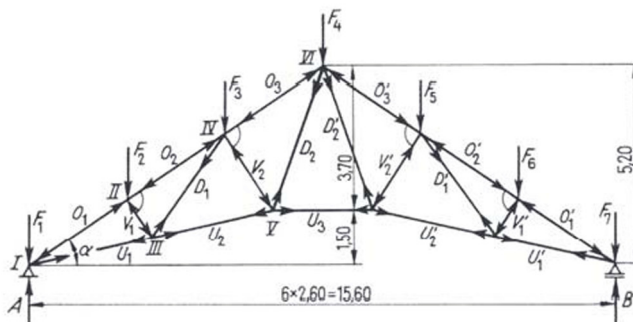
Abb. 1.20 Schematische Darstellung des Vorgehens bei einem Ritterschnitt [18]

## 1. 4. 6 Cremona Plan:

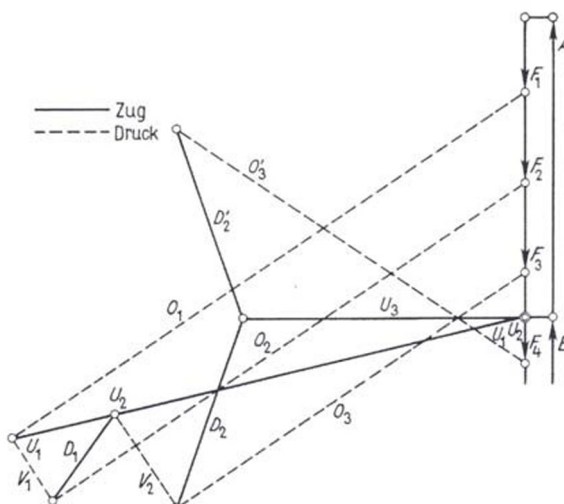
Der Cremona Plan ist die bekannteste Methode zur grafischer Ermittlung der Schnittkräften und Auflagerreaktionen in einem Fachwerk. Benannt ist dieser nach seinem Erfinder Antonio Luigi Guiseppe Cremona, welcher diese Methode ca. 1865 veröffentlichte. Bei der Erstellung eines Cremonaplanes sind folgende Schritte zu beachten: [16]

- Aufbringen der äußeren Kräfte an den Knotenpunkten des Fachwerkes,
- Festlegen eines Umdrehungssinnes (vorzugsweise im Uhrzeigersinn),
- Festlegen eines Maßstabes für die Kräfte (Bsp: 1 cm = 1 kN),
- Auftragen der äußeren Kräfte hintereinander und parallel zu ihrer Wirkungslinie,
- Parallelverschieben der Stabachsen an den Knotenpunkten ihres Auftretens,
- Schnittpunkte aller Stäbe bilden, und
- Ablesen der Stabkräfte auf Grund ihrer Schnittpunkte.

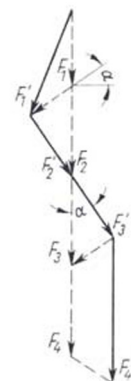
Der Unterschied zwischen Zug- und Druckkräften liegt dabei in der Vorzeichenrichtung auf den positiven Umdrehungssinn hin betrachtet.



240.1  
Belgischer Dachbinder  
(M 1:200)



240.2 Kräfteplan für Eigenlast und Schnee  
1 cm  $\cong$  20 kN



240.3  
Wirklicher Kräftezug der  
Knotenlasten 1 cm  $\cong$  20 kN

Abb. 1.21 Beispiel eines Cremona Planes [17]



1. 4. 7 Bemessungstabellen

Um den Berechnungsaufwand für Fachwerke nach den oben beschriebenen Methoden zu vereinfachen und möglicherweise sogar zu eliminieren, wurden vor Beginn des Computerzeitalters und der dadurch aufkommenden rechnergestützten Berechnung häufig Bemessungstabellen zur Ermittlung der Stabkräfte verwendet.

Hierbei gibt es sowohl Vorbemessungs- als auch Dimensionierungstabellen, welche für diese Aufgaben verwendet werden können.





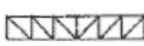


Bezeichnung	Statisches System	System-Skizze	Spannweite $l$ m	Binderhöhe	Binderabstand	Dachneigung $\alpha$
Fachwerkträger	Dreieckförmiger Binder		7,5 bis 30	$h \geq \frac{l}{10}$	4 bis 10 m	12 bis 30°
			7,5 bis 20	$h_m \geq \frac{l}{10}$	4 bis 10 m	12 bis 30°
	Trapezförmiger Binder		7,5 bis 30	$h \geq \frac{l}{12}$	4 bis 10 m	3 bis 8°
			7,5 bis 30	$h_m \geq \frac{l}{12}$	4 bis 10 m	3 bis 8°
	Parallelbinder		7,5 bis 60	$h \geq \frac{l}{12} - \frac{l}{15}$	4 bis 10 m	–
			7,5 bis 60	$h \geq \frac{l}{12} - \frac{l}{15}$	4 bis 10 m	–
			7,5 bis 60	$h \geq \frac{l}{12} - \frac{l}{15}$	4 bis 10 m	–

Abb. 1.22 Vordimensionierungstabellen für Holzfachwerke [23]

Diese Vordimensionierungstabellen sind durch langjährige Erfahrungen im Bereich der Tragwerksplanung entstanden. Für eine Abschätzung der Tragwerkshöhe bezogen auf die Spannweiten können diese vor allem von Architekten verwendet werden.

Um eine noch einfachere Vordimensionierung zu ermöglichen und daraus leichter die erforderlichen Querschnitte ableiten zu können, wurden Bemessungstabellen erstellt. Bei diesen wurden die am häufigsten verwendeten Formen von Fachwerken betrachtet.

Die nachfolgende Abbildung zeigt auszugsweise eine dieser Bemessungstabellen.

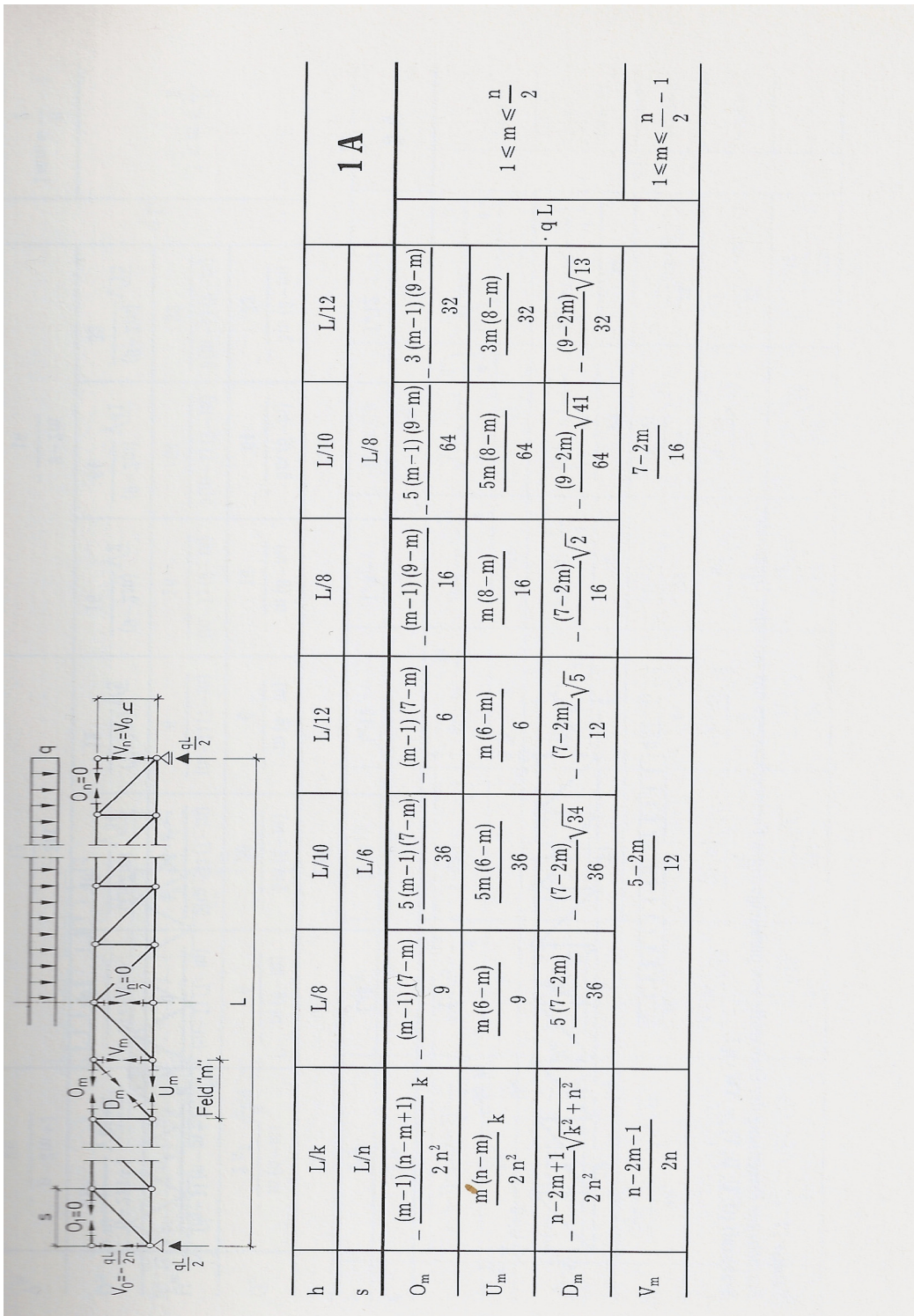


Abb. 1.23 Bemessungstabellen zur Stabkrafteermittlung für Holzfachwerkträger [24]

		S T A T I K					B R A N D		293
		F 30-B							
STAB		NORMAL- KRAFT	BIEGE- MOMENT	VH II B/H CM/CM	NORMAL- KRAFT	BIEGE- MOMENT	BSH I E/H CM/CM	VH II E/H CM/CM	
NR		N KN	M KNM		N KN	M KNM			
Q	2 KN/M	MAX. F 1.2 CM			MAX. F 1.1 CM				
1		-19.0	-.40	6/10	-19.0	-.40	4/11	12/18	12/12
2		19.0	.01	4/6	19.0	.01	4/5	15/24	17/17
3		-.4		4/4	-.4		4/4	12/12	12/12
4		-11.1		6/6	-11.1		5/6	12/12	12/12
5		7.7		4/4	7.7		4/4	10/10	10/10
6		-7.7		5/6	-7.7		5/5	12/12	12/12
7		3.8		4/4	3.8		4/4	10/10	10/10
8		-3.8		4/6	-3.8		4/5	12/12	12/12
9		.0		4/4	.0		4/4	12/12	12/12
Q	-1 KN/M	MAX. F .6 CM			MAX. F .5 CM				
1		9.5	.22	4/8	9.5	.22	4/7	15/24	17/17
2		-9.5	-.01	6/6	-9.5	-.01	5/7	12/18	12/12
3		.2		4/4	.2		4/4	10/10	10/10
4		5.5		4/4	5.5		4/4	10/10	10/10
5		-3.9		4/6	-3.9		4/5	12/12	12/12
6		3.9		4/4	3.9		4/4	10/10	10/10
7		-1.9		4/4	-1.9		4/4	12/12	12/12
8		1.9		4/4	1.9		4/4	10/10	10/10
9		.0		4/4	.0		4/4	10/10	10/10
Q	-2 KN/M	MAX. F .9 CM			MAX. F .8 CM				
1		19.0	.43	5/10	19.0	.43	4/10	15/24	17/17
2		-19.0	-.03	7/8	-19.0	-.03	6/8	12/18	12/12
3		.4		4/4	.4		4/4	10/10	10/10
4		11.0		4/4	11.0		4/4	10/10	10/10
5		-7.8		5/6	-7.8		5/5	12/12	12/12
6		7.8		4/4	7.8		4/4	10/10	10/10
7		-3.8		4/6	-3.8		4/5	12/12	12/12
8		3.8		4/4	3.8		4/4	10/10	10/10
9		.0		4/4	.0		4/4	10/10	10/10
Q	-4 KN/M	MAX. F 1.2 CM			MAX. F 1.2 CM				
1		37.9	.83	7/12	37.9	.80	5/13	15/24	15/21
2		-37.9	-.09	9/9	-37.9	-.06	8/8	13/18	12/12
3		.9		4/4	.9		4/4	10/10	10/10
4		22.0		4/7	22.0		4/6	10/13	10/12
5		-15.5		6/7	-15.5		6/6	12/12	12/12
6		15.5		4/5	15.5		4/4	10/11	10/10
7		-7.6		5/6	-7.6		5/5	12/12	12/12
8		7.6		4/4	7.6		4/4	10/10	10/10
9		.0		4/4	.0		4/4	10/10	10/10

Abb. 1.24 Bemessungstabelle zur Querschnittsfestlegung [24]

#### 1. 4. 8 Computerstatische Methoden

Die heute am häufigsten verwendete Art, um Fachwerke aller Art zu berechnen und zu dimensionieren ist jene mittels Computerunterstützung. Dies bietet im Vergleich zur Berechnung mit händischen Methoden eine Vielzahl von Vorteilen: [18]

- Vergleichsweise einfache Änderung der Eingangsgeometrie und der aufgetragenen Lasten;
- meist geringerer Zeitaufwand zur Berechnung eines Fachwerkes;
- In den meisten EDV - Programmen können auch die Verformungen des Tragwerkes ermittelt werden; und
- Ausschluss von „menschlichen“ Rechenfehlern.

Jedoch bietet die Berechnung mittels EDV nicht nur Vorteile:

- schwierige Kontrolle der Ausgabedaten und
- bei ungenügenden Kenntnissen im Bezug auf das Programm und die darin hinterlegte Rechenmethode kann es zu schwerwiegenden Eingabefehlern kommen.

Für die Berechnung der Schnittkräfte und Verformungen in einem Fachwerk unter Zuhilfenahme rechnergestützter Anwendungen gibt es mehrere Methoden und Rechenmodelle mit Hilfe derer die Lösung berechnet werden kann: [19]

- Klassische Verfahren:
  - Kraftgrößenverfahren
  - Weggrößenverfahren
  - Drehwinkelverfahren
  - Spannungstrapezverfahren
- Matrizenverfahren:
  - Finite - Elemente Methode
  - Finite - Differenzen Methode
  - Randelemente Methode
  - Diskrete - Elemente Methode

Mit Hilfe der oben aufgelisteten Verfahren ist es möglich, sowohl die Schnittkräfte als auch die aus der Belastung resultierenden Verformungen zu ermitteln.

## 2 Anschlüsse bei Holztragwerken

Zur kraftschlüssigen Verbindung von miteinander zu fügenden Bauteilen aus Holz sind so genannte Holzverbindungen erforderlich. Auf Grund der leichten Formbarkeit von Holz sind hier eine Vielzahl von Möglichkeiten ohne die Verwendung anderer Baustoffe oder zusätzlicher Bauteile möglich.

### 2.1 Geschichte der Anschlusslösungen für Holzfachwerke

Funde aus der mittleren Steinzeit (bis ca. 5000 Jahre vor Christus) geben Einblick in die Kunst der damaligen „Zimmermänner“.

Auf Grund des Fehlens von möglichen Bearbeitungswerkzeugen wurden in der Frühzeit die durch das Holz natürlich gegebenen Verbindungsmittel wie etwa Astgabeln zur Auflagerung anderer Holzstücke verwendet. Später kamen Verbindungen durch Reibung und das Verbinden mittels Seilen (Lianen oder Tiergedärme) hinzu. Funde früher jungsteinzeitlicher Pfahlbauten im Gebiet des Bodensees beweisen das Geschick und die Kreativität der Bewohner und Errichter dieser Gebäude. [20]

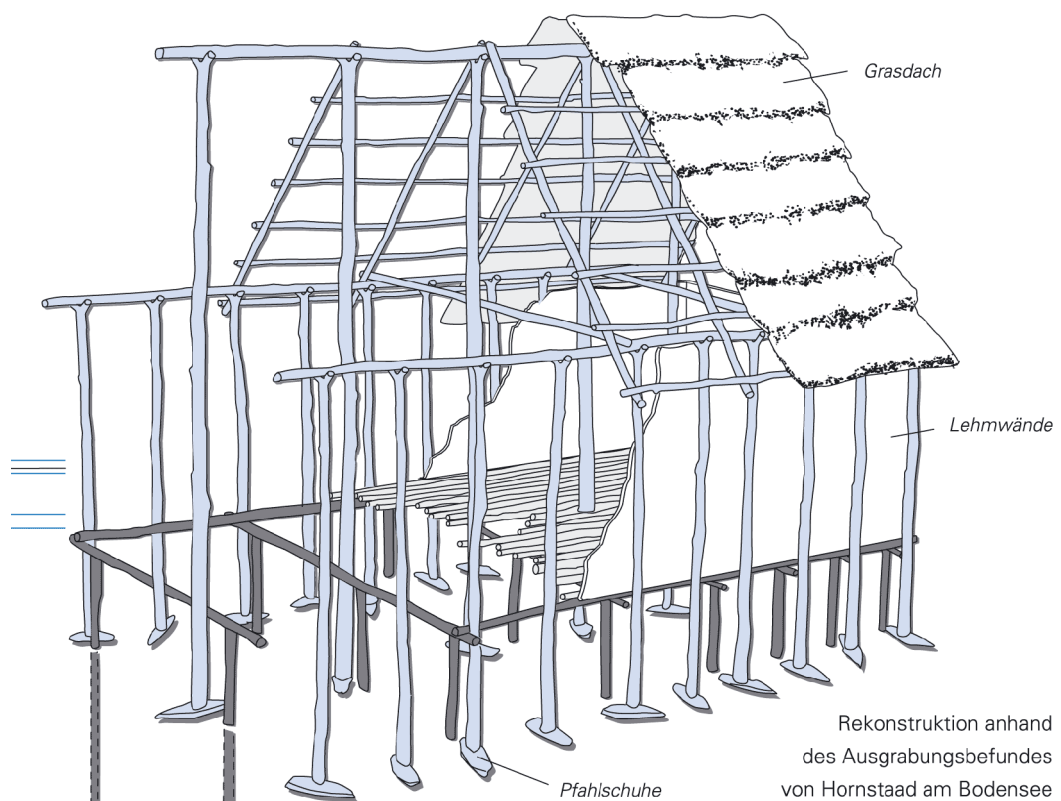


Abb. 2.1 Skelettstruktur eines frühsteinzeitlichen Hauses [21]



Abb. 2.2 Rekonstruktion einer frühsteinzeitlichen Pfahlbausiedlung [21]

Diese einfache Art der Verbindungen wurde bis in das frühe Mittelalter hin ausgeführt und durch Verfeinerungen (Einkerbungen in den Querschnitten) verbessert und optimiert.

Die ersten zimmermannsmäßigen Verbindungen, wie etwa Versätze, Zapfen oder Überblattungen sind aus der Mitte des Mittelalters überliefert. Es kann jedoch angenommen werden, dass diese Arten der Verbindungstechnik bereits früher bekannt waren. Diese haben sich in ihrer Form bis heute gehalten. Durch das Auftreten mechanischer Verbindungsmittel wie etwa Nägel und Schrauben wurden jedoch meist nur mehr die einfachsten Formen dieser Verbindungstypen verwendet.

Zu Beginn des frühen Mittelalters begann die Fertigung von Verbindungsmittel in ihrer uns jetzt bekannten Form. Dabei wurden anfangs dünnere Holzquerschnitte bearbeitet, um mit Hilfe einer Durchsteckverbindung zwei Querschnitte miteinander zu verbinden. In Abb. 2.3 sind einige der gebräuchlichsten Arten der zimmermannsmäßigen Verbindungen dargestellt. In weiterer Folge wurden die zimmermannsmäßigen Verbindungen durch die zusätzliche Verwendung von stiftförmigen aus Holz gefertigten Verbindungsmitteln verstärkt. Durch diese Verstärkung wurde auch die Möglichkeit gegeben, höhere und nicht über Reibung übertragbare Kräfte in den Querschnitten weiterzuleiten oder zu übertragen.

Zu Ende des Mittelalters wurden die zimmermannsmäßigen Verbindungsmittel durch mechanische Verbindungsmittel wie Nägel oder Stifte verstärkt.

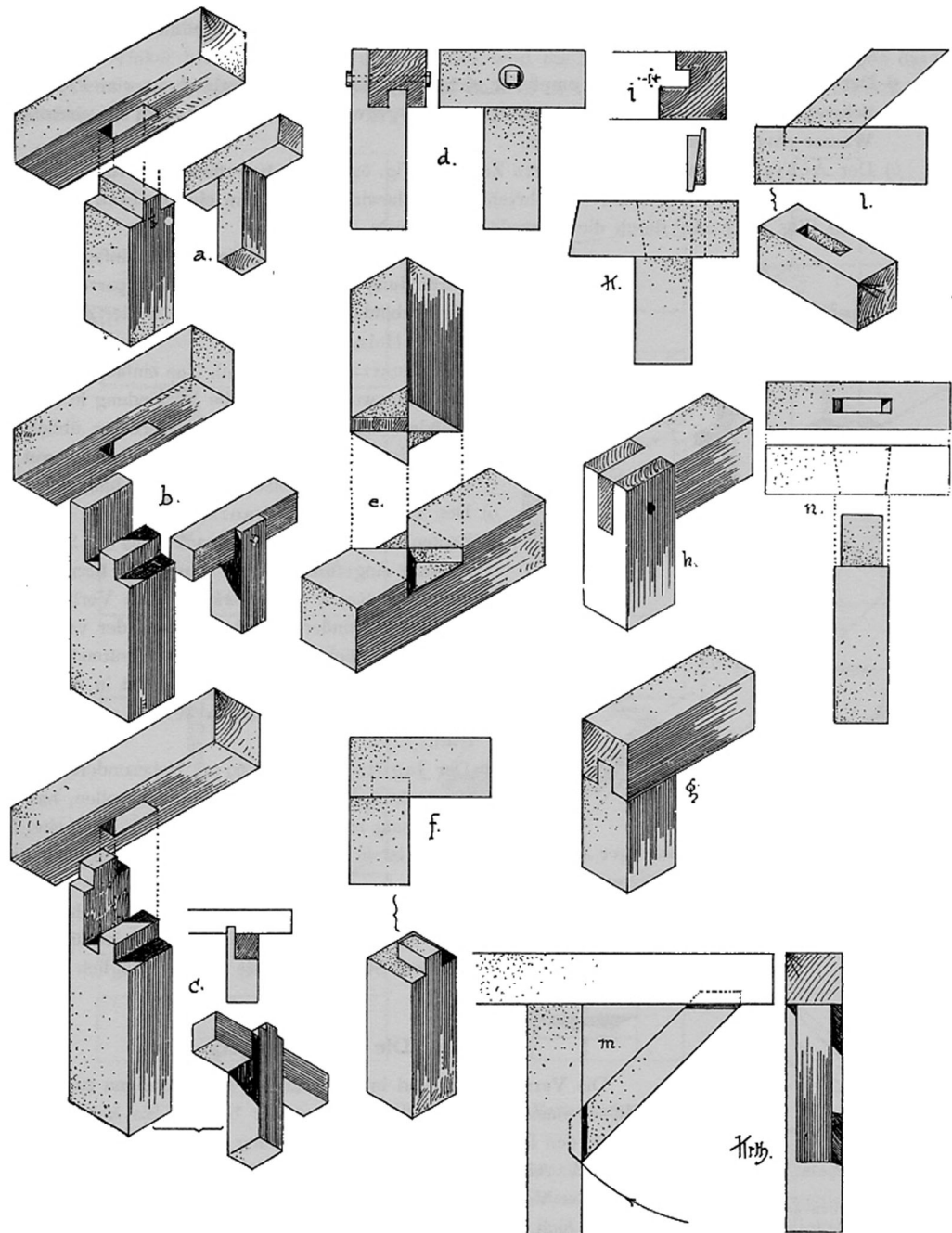


Fig. 69.  
 Verschiedene Arten der Verzapfung.

Abb. 2.3 Zimmermannmäßige Verbindungstechnik [22]

Mit Beginn der Industrialisierung und den daraus folgenden einfacheren Herstellmöglichkeiten wurden die Verbindungen mit Hilfe mechanischer Verbindungsmittel wie Schrauben, Nagelplatten, Dübel usw. hergestellt. Diese sind bis heute die gebräuchlichsten Verbindungsmittel im Ingenieurholzbau.

### 2. 1. 1 Aktueller Stand der Verbindungsmitteltechnik

Auf Grund der in gegenwärtig gültigen Berechnungsnormen, Richtlinien und der in der allgemeinen Tragwerksplanung verankerten Forderung nach duktilen Tragwerken, Holz jedoch kaum über ein Verformungsvermögen verfügt, ist es notwendig, dieses durch die Implementierung von duktilen Tragwerksbestandteilen einzuführen.

Dabei erweist sich Stahl durch sein ausgeprägtes plastisches Materialverhalten als äußerst geeignet. Auf Grund seines Fließplateaus kann das in die Tragwerksstruktur eingebrachte Stahlelement für die erforderliche Duktilität sorgen.

*„Mechanische Holzverbindungen sind tragende Verbindungen von Bauteilen aus Holzbaustoffen untereinander und mit Stahl. Die zur Verbindung der einzelnen Teile benötigten Verbindungsmittel werden als stiftförmige metallische und sonstige mechanische Verbindungsmittel bezeichnet. Die miteinander verbundenen Teile erfahren infolge Scherbelastung lastabhängige Verschiebungen. Diese Verschiebungen resultieren aus Lochleibungsverformungen in den einzelnen Teilen und aus Verformungen der Verbindungsmittel.“ [30]*

Die Verbindungstechnik lässt sich dabei in drei Kapitel einteilen: [30]

- stiftförmige metallische Verbindungsmittel

Hierzu zählen Verbindungsmittel, welche planmäßig rechtwinkelig zu ihrer Stabachse (auf Abscheren) wie etwa Stabdübel, Passbolzen, Nägel und Gewindestangen und jene, die in Stabachse (auf Herausziehen), wie etwa Schrauben oder eingeklebte Gewindestangen, beansprucht werden.

- sonstige mechanische Verbindungsmittel

Verbindungsmittel, welche flächenhaft auf Abscheren beansprucht werden, können zu dieser Art gezählt werden. Die bekanntesten dieser Elemente sind Dübel besonderer Bauart, sowie Nagelplatten aber auch Stahlblechformteile.

- zimmermannsmäßige Verbindungen

Bei diesen Verbindungen sind im Allgemeinen (ausgenommen zur Lagesicherung) keine metallischen Verbindungsmittel erforderlich. Die Lastübertragung erfolgt entweder durch Reibung oder Kontakt. Die bekanntesten darunter sind Versätze, Zapfen oder Holznägel.

Die obige Auflistung soll nur der kurzen und übersichtlichen Darstellung des aktuellen Standes der Technik dienen. Eine vollständige Auflistung der Verbindungstechnik wird hier nicht angeführt. In den nachfolgenden Kapiteln werden nur jene, in den folgenden Kapiteln der Arbeit verwendeten, Verbindungsmitteltechniken näher beschrieben.



## 2.2 Zimmermannsmäßige Verbindungen

„Als zimmermannsmäßige Verbindungen werden jene Verbindungen im Holzbau bezeichnet, zu deren Herstellung - von Lagesicherungsmaßnahmen abgesehen - keine holz-fremden Materialien erforderlich sind. Diese nach handwerklich definiert festgelegten Regeln hergestellten Verbindungen haben sich durch Jahrhunderte hindurch bewährt und werden sowohl in ihrer Herstellung, der Funktion, der Lastabtragung und Lagesicherung an die jeweils erforderlichen Verhältnisse angepasst.“ [31]

vgl. [31]

Auf Grund der oftmals komplexen Kraftflüsse ist im Gegensatz zu den ingenieurmäßigen Verbindungen ein rechnerischer Nachweis dieser Verbindungen nur aufbauend auf Erfahrungswerten möglich. Im Allgemeinen weisen diese Verbindungen geringe Nutzungsgrade, eine erhebliche Schwächung des Holzquerschnittes, geringere Steifigkeiten und hohe Duktilitäten auf. Zusätzlich zu diesen, meist nachteiligen und ungewünschten Eigenschaften, kommen noch Punkte wie die Herstellungsgenauigkeit und das negative Schwind- und Quellverhalten der Bauteile hinzu.

Die zimmermannsmäßigen Verbindungen lassen sich dabei in folgende Übergruppen einteilen:

- Verblattung
- Verzapfung
- Versatzung
- Aufklaubung
- Verkämmung
- zimmermannsmäßige Dübelverbindung

Durch den Einsatz von CNC-Maschinen in der Herstellung und die damit verbundene Erhöhung der Herstellungsgenauigkeit, erfahren zimmermannsmäßige Verbindungen im Ingenieurholzbau eine Wiederbelebung.

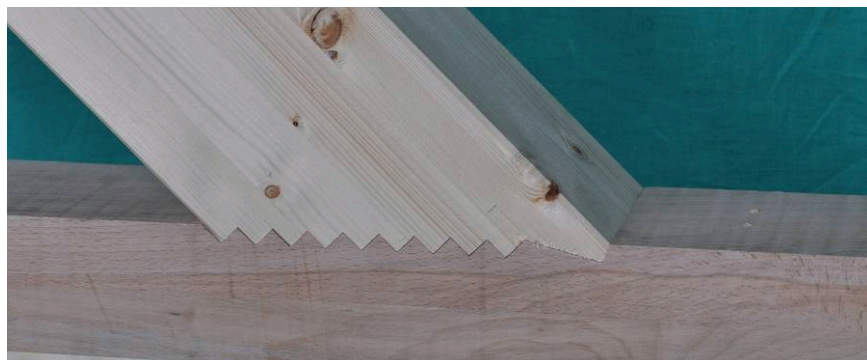


Abb. 2.4 Treppenversatz zur Übertragung hoher Druckkräfte [32]

## 2.3 Ingenieurmäßige Verbindungen

„Ingenieurmäßige Verbindungsmittel sind, wie der Name schon andeutet, dadurch charakterisiert, dass die Tragfähigkeit dieser Verbindung durch Berechnung nachgewiesen wird. Im Unterschied zu den zimmermannsmäßigen Verbindungen werden die auf die Verbindung wirkenden Kräfte vorwiegend über Verbindungsmittel in den zu fügenden Bauteilen übertragen.“ [31]

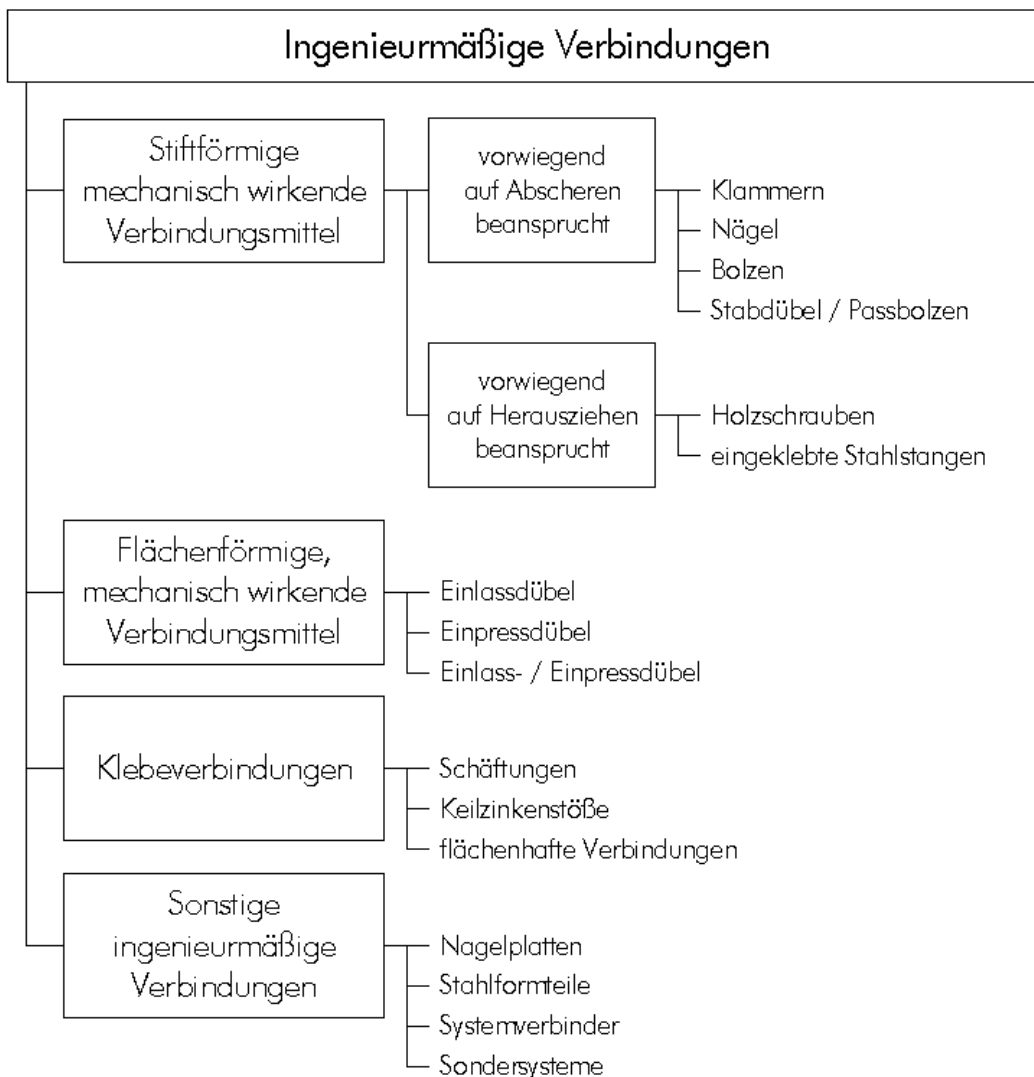


Abb. 2.5 Mögliche Einteilung der ingenieurmäßigen Verbindungen bzw. Verbindungsmittel [31]

Stand der Technik für Verbindungen in Fachwerken sind vor allem stiftförmige mechanische Verbindungsmittel - hier vor allem Stabdübel und Schrauben. Klebeverbindungen stellen gerade den Stand der Forschung dar, werden jedoch auf Grund ihrer sehr hohen Tragfähigkeiten zukünftig häufiger Verwendung finden. Sonstige ingenieurmäßige Verbindungsmittel wie Systemverbinder, Dübel besonderer Bauart und Nagelplatten wurden

häufig in der Vergangenheit zur Herstellung von Fachwerkknoten verwendet. Eine große Anzahl an Fachwerken wurde zu dieser Zeit durch sogenannte „Nagelplattenbinder“ hergestellt.



Abb. 2.6 Beispiel für die Verwendung von Nagelplatten anhand eines Fachwerkuntergurtstoßes [33]

Nachfolgend werden die für die Parameterstudie wichtigen Anschlusstypen durch eine kurze Darstellung und Erklärung näher erläutert, um die Grundlagen der Berechnung und die möglichen Versagensmechanismen darzustellen.

### 2. 3. 1 Stifförmige Verbindungsmittel

Stifförmige Verbindungsmittel stellen einen Großteil der im Ingenieurholzbau verwendeten Verbindungsmittel dar. Dies liegt einerseits an ihrer wirtschaftlichen und verhältnismäßig einfachen Herstellung und an den mit ihnen verbundenen Möglichkeiten im Bezug auf Beanspruchungsrichtung und der möglichen Geometrie der Verbindungsmittelanordnung.

Das Tragverhalten von stifförmigen Verbindungsmitteln kann durch zwei Mechanismen beschrieben werden:

- Beanspruchung auf Abscheren

Hier liegt eine Beanspruchung rechtwinkelig zur Stabachse vor. Die hierbei möglichen Verbindungsarten sind Holz-Holz, Holz-Holzwerkstoff und Holz-Stahl.

- Beanspruchung auf Herausziehen

Die Beanspruchungsrichtung erfolgt in diesen Fall parallel zur Stabachse.

### 2.3.2 Stabdübel- und Passbolzenverbindungen

Der Haupttragmechanismus von Stabdübel- und Passbolzenverbindungen besteht aus Scherkräften, welche über Kontakt (Lochleibung) in den Anschlussbauteilen übertragen werden. Passbolzenverbindungen können zusätzlich durch die aufgebrachte Mutter an beiden Enden des Bolzens Zugkräfte in ihrer Längsrichtung, welche in Querdruck an den Anschlusspunkten umgewandelt werden, übertragen. Dieser zusätzliche Mechanismus bei Passbolzen wird als „Einhängeeffekt“ bezeichnet.

Beide Tragmechanismen können sowohl bei Holz-Holz- und Holz-Holzwerkstoff- sowie bei Holz-Stahl- Verbindungen vorkommen.

#### Tragverhalten auf Abscheren

Für den Widerstand bei Beanspruchung normal zur Stabachse sind die Lochleibungsfestigkeit der angeschlossenen Bauteile, das Fließmoment des Verbindungsmittelstiftes und dessen Stahlzugfestigkeit maßgebend. Die Stahlzugfestigkeit ist hierbei jedoch nur bei Passbolzenverbindungen maßgebend, da Stabdübel keine Zugkräfte entlang der Stabachse zu übertragen haben.

- Lochleibungsfestigkeit

vgl [31]

Als Lochleibungsfestigkeit wird der Widerstand des Holzes gegen die Kraftkomponente in Krafrichtung verstanden. Dieser ist kein reiner Materialparameter des Holzes, sondern hängt zusätzlich von folgenden Faktoren ab:

- Durchmesser des Verbindungsmittels

Hierbei sind bei Verbindungsmitteln (vor allem bei Schrauben) drei Typen zu unterscheiden. Der Außendurchmesser, der Kerndurchmesser und der Kopfdurchmesser. Bei gewöhnlichen Stabdübeln sind alle drei Durchmesser auf Grund der zylindrischen Form des Verbindungsmittels gleich groß. Bei Schrauben wird dabei meist der Kerndurchmesser (welcher den massiven Stahlkern ohne Gewinde beschreibt) verwendet, da dieser durchgängig im gesamten Querschnitt vorhanden ist.

- Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels
- Eintreibverfahren des Verbindungsmittels

Als Eintreibverfahren kann das Einbringen des Stiftes in die Verbindungsmittelöffnung verstanden werden. Dabei kann im Holzbau von „vorgebohrt“ und „nicht vorgebohrt“ gesprochen werden. Bei Verbindungen mit Schrauben können je nach Schraubentyp und Durchmesser beide Verfahren angewendet werden. Auf Grund ihrer glatten Form ist bei Stabdübeln und Passbolzen nur das Einbringen in eine bereits vorhandene Öffnung möglich. Um Bautoleranzen und Maßungenauigkeiten zu berücksichtigen, wird hier die Bohrung mit einem größeren Durchmesser hergestellt, als eigentlich für den Stift notwendig.

- Rohdichte des Holzes

Einer der maßgebenden Parameter zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit stellt die Rohdichte dar.

**8.2.5 Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit  $f_{h,k}$**

(1) Für stiftförmige Verbindungsmittel dürfen die charakteristischen Werte der Lochleibungsfestigkeit  $f_{h,k}$  gemäß Tabelle 8.2 angenommen werden.

1	2	3
Holzprodukt	Verbindungsmittel	Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,k}$
1 Schnittholz (SH) Brettschichtholz (BSH) Brettspertholz (BSP) <sup>1)</sup> Furnierschichtholz (FSH)	Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, eingeklebte Stahlstangen, Nägel vorgebohrt	$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k$
	Nägel nicht vorgebohrt, Klammern	$f_{h,k} = 0,082 \cdot d^{-0,3} \cdot \rho_k$
2 Furnierspertholz (FSP)	Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, eingeklebte Stahlstangen, Nägel vorgebohrt	$f_{h,k} = 0,11 (1 - 0,01 \cdot d) \rho_k$
	Nägel nicht vorgebohrt, Klammern	$f_{h,k} = 0,11 d^{-0,3} \cdot \rho_k$
3 Spanspertholz (SSP)	Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, eingeklebte Stahlstangen, Nägel vorgebohrt	$f_{h,k} = 50 \cdot d^{-0,6} \cdot t^{0,2}$
	Nägel nicht vorgebohrt, Klammern	$f_{h,k} = 65 \cdot d^{-0,7} \cdot t^{0,1}$

<sup>1)</sup> Bei der Ermittlung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit  $R_d$  sind die Schichten rechtwinklig zu den Deckschichten nicht in Rechnung zu stellen.  
ANMERKUNG: Schrauben sind je nach Durchmesser Stabdübeln oder Nägeln zuzuordnen. Schrauben mit einem  $d \leq 8$  mm sind als Nägel und mit  $d > 8$  mm als Stabdübel zu betrachten.  
 $\rho_k$  ... charakteristischer Wert der Rohdichte in  $\text{kg/m}^3$   
 $d$  ... Verbindungsmitteldurchmesser in mm  
 $t$  ... Dicke der Spanspertholzplatte in mm

Abb. 2.7 charakteristische Werte der Lochleibungsfestigkeit [31]

- Fließmoment des Verbindungsmittels  
vgl [31]

Ein Fließgelenk im Verbindungsmittel bildet sich nach dem Erreichen eines plastischen Niveaus innerhalb der Spannungsverteilung des Stahlstiftes aus. Dabei wird von einem gewissen zu erreichenden Winkel ausgegangen (Biegewinkel  $\alpha$ ), welcher den Plastifizierungsgrad des Stiftes beschreibt. Dieser Biegewinkel ist vom Durchmesser abhängig und nimmt mit diesem ab.

**8.2.7 Charakteristischer Wert des Fließmoments  $M_{y,k}$**

(1) Für stiftförmige Verbindungsmittel dürfen die charakteristischen Werte des Fließmoments  $M_{y,k}$  gemäß Tabelle 8.3 angenommen werden.

1	2
Verbindungsmittel	Fließmoment $M_{y,k}$
1 Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, Schrauben (Schaftteil), Nägel (rund), Klammern, eingeklebte Stahlstangen	$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{t,k} \cdot d^{2,6}$
2 Gewindeteil von Holzschrauben	$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{t,k} \cdot (1,1 \cdot d_{Gk})^{2,6}$

$f_{t,k}$  ... charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$   
 $d$  ... Verbindungsmitteldurchmesser in mm  
 $d_{Gk}$  ... Gewindekerndurchmesser von Holzschrauben in mm

Tabelle 8.3 Charakteristische Werte des Fließmoments  $M_{y,k}$  in Nmm

(2) Der Bemessungswert des Fließmoments  $M_{y,d}$  ist wie folgt zu ermitteln:

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{\gamma_{M,St}} \quad \text{mit } \gamma_{M,St} \text{ für auf Biegung beanspruchte Stifte}$$

Abb. 2.8 charakteristische Werte des Fließmomentes [31]

- Stahlzugfestigkeit

Bei Passbolzenverbindungen wird die Festigkeit des Stiffes nicht nur bei der Bildung eines Fließgelenkes beansprucht, sondern auch eine zusätzliche Zugkraft in diesen eingeleitet.

- Tragverhalten nach K.W. Johansen

vgl [31]

Nach Johansen werden verschiedene Versagensmechanismen für die Bestimmung der Tragfähigkeit der Verbindung definiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass entweder die Lochleibungsfestigkeit in mindestens einem der verbundenen Bauteile erreicht wird oder der Stift Fließgelenke ausbildet. Diese beiden Versagensmechanismen sind dabei abhängig von der Geometrie der Verbindung (Schnittigkeit), der Dicke und Lochleibungsfestigkeit der Holzbauteile und dem Fließmoment des Stiffes.

Johansen beschreibt hierzu 3 maßgebende Versagensmechanismen:

**Versagensmechanismus 1a:**

Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzbauteiles - dabei bleibt der Stift gerade

**Versagensmechanismus 1b:**

Erreichen der Lochleibungsfestigkeit eines Holzbauteiles - dabei verdreht sich der Stift, seine Achse bleibt jedoch gerade

**Versagensmechanismus 2a & 2b**

Bilden eines Fließgelenkes entlang des Stabes

**Versagensmechanismus 3:**

Es bilden sich zwei Fließgelenke entlang des Stiffes.

Diese kurze Beschreibung des mechanischen Verhaltens soll nur einen groben Überblick der Grundlagen zur Berechnung geben.

Auf Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel stellen bei Fachwerken, auf Grund der in den anzuschließenden Bauteilen überwiegend vorherrschenden Normalkräfte, eine gute Lösung des Anschlussproblems dar. Zusätzlich können durch ihre längenmäßige Ausdehnung planmäßige oder unplanmäßige Momente in den Anschlusspunkten übertragen und aufgenommen werden.

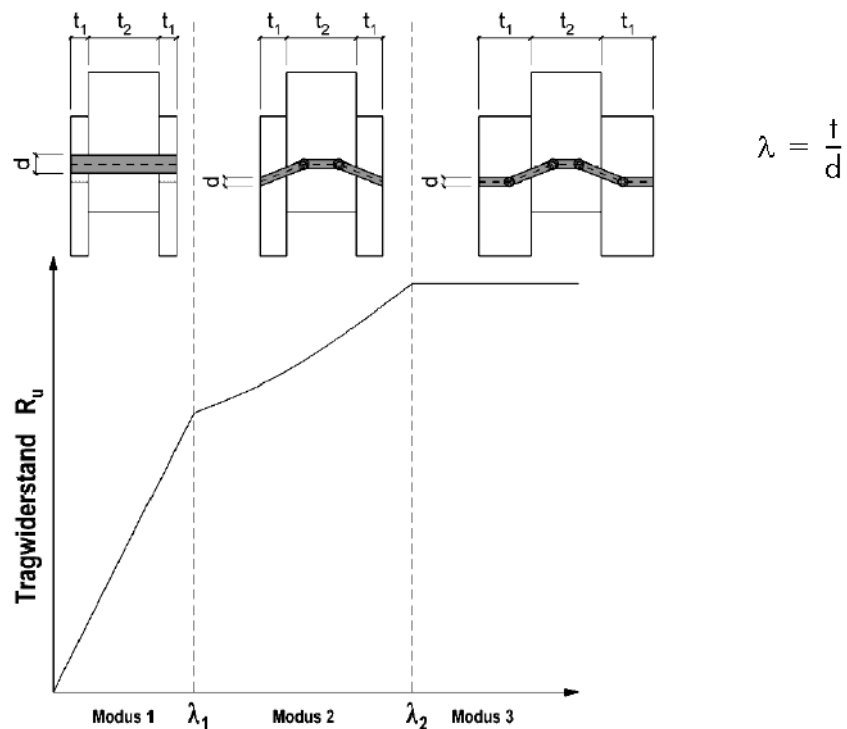


Abb. 2.9 Verhalten in Abhängigkeit des auftretenden Versagensmodus [31]

### Tragverhalten auf Herausziehen

Das bekannteste Beispiel von auf Herausziehen beanspruchte Verbindungsmittel sind Holzschrauben. Neben dem Tragverhalten auf Abscheren, welches Holzschrauben durch das Anstehen an die Bohrlochinnenwand aufweisen, können diese zusätzlich durch ihr Gewinde Scherkräfte entlang ihrer Stabachse übertragen. Da Holzschrauben im Allgemeinen einen kleineren Durchmesser als Stabdübel oder Passbolzen aufweisen, ist die letztgenannte Beanspruchung sinnvoller.

Der Ausziehewiderstand von Schrauben in Holzquerschnitten ist dabei von der Profilierung des Gewindes und der damit verbundenen Verzahnung mit dem Holz, dem Kopfdurchziehen der Schraube und der Stahlzugfestigkeit des Schraubenstiftes abhängig.

Holzschrauben können als sogenannte Voll- oder Teilgewindeschrauben ausgeführt werden. Dies entscheidet einerseits die Größe der aufnehmbaren Kraft und der mit der Position des Gewingeganges verbundene Punkt der Lasteinleitung.

Da Holzschrauben als Verbindungsmittel nicht in der Parameterstudie verwendet werden, wird hierbei auf eine nähere Beschreibung der Bemessungsgrundlagen verzichtet. Bei Fachwerken werden Holzschrauben zunehmend in Stabdübelanschlüssen zur Verstärkung dieser zur Verminderung des Spaltverhaltens verwendet.

### 2. 3. 3 Klebeverbindungen

*„Klebstoff ist ein nicht metallischer Stoff, der Füge­teile wie Holz­teile durch Flächenhaftung (Adhäsion als Bindekraft zwischen Füge­teilen und Klebeschicht) verbindet. Klebstoff ist ein Oberbegriff und schließt andere Klebstoffarten wie „Leim“ ein.“ [30]*

vgl. [30]

Klebefugen im Holzbau können eine Stärke von bis zu 2 mm aufweisen. Übliche Abmessungen sind jedoch 0,1 bis 0,2 mm. Verbindungen aus geklebten Holzbauteilen weisen einen hohen Widerstand gegen Belastung quer zu ihrer Ausdehnungsachse (Abscheren) auf. Bei Belastungen in ihrer Ausdehnungsrichtung (Querzug in der Klebefuge) weisen sie einen geringen Widerstand auf.

Diese Merkmale gelten für die Verklebung und kraftschlüssige Verbindung von einzelnen Holzbauteilen untereinander, wie dies bei Brettschichtholzträgern, Brettsperrholzplatten oder zur Verbindung von Brettern zu einer Endloslamelle über Keilzinken, der Fall ist.

Bei der Verwendung von Klebstoffen zur Verbindungsmittelherstellung werden dabei jedoch meist nicht Holzbauteile direkt an Holzbauteile verklebt, sondern diese durch das Einfügen von Stahlbauteilen miteinander verbunden. Dabei kommen sowohl stab-, als auch flächenförmige Verbindungsmittel zum Einsatz.

Die Verwendung von stoffförmigen, eingeklebten Verbindungsmitteln kann sowohl zur Verstärkung von Bauteilen als auch zur Herstellung von Anschlüssen verwendet werden. Dabei können die Stäbe sowohl in als auch quer zur Faserrichtung des Holzbauteiles eingeklebt werden. Durch die Verklebung der Stäbe mit dem Holzquerschnitt können einerseits Druck- oder Zugkräfte übertragen werden, andererseits ist es ihnen möglich, auch direkt auf Abscheren beansprucht zu werden, wo diese ähnliche Eigenschaften wie Stabdübel oder Passbolzen aufweisen.

Der aktuelle Fokus der Forschung im Bereich der geklebten Verbindungsmittel liegt im Bereich der eingeklebten Stahlbleche. Hierbei werden Stahlbleche über ihre gesamte Länge und Breite kraftschlüssig durch Klebstoff mit dem Holzbauteil verbunden. Diese weisen den Vorteil einer sehr großen Klebefläche im Holzbauteil auf. Es ist ihnen möglich, sowohl Normal- als auch Querkräfte direkt über diese Anschlüsse zu übertragen. Zusätzlich können Stahlbleche auf Grund ihrer vorhandenen Länge und der Breite mit einer sehr geringen Blechstärke ausgeführt werden, woraus eine Vergrößerung des vorhandenen Nettoquerschnittes resultiert.

Allen geklebten Verbindungen gemein ist ihre große Anpassungsmöglichkeit an die an sie gestellten Aufgaben. Sowohl mit Stahlstäben als auch mit Stahlblechen ist es möglich, sehr ausgefallene Geometrien abzubilden.



## 2.4 Verbindungen bei Fachwerken

Die Schwierigkeit bei Verbindungen von Fachwerken liegt darin, dass die Stabachsen der miteinander zu verbindenden Bauteile meist nie die gleichen Orientierungen aufweisen. Daraus resultierend ergeben sich Anschlüsse, welche in ihrer Gesamtheit einen großen Platzbedarf aufweisen. Eine Randbedingung zur Verwendung von Verbindungsmitteln bei Fachwerkanschlüssen stellt im Allgemeinen auch eine leichte Montierbarkeit dar, da diese auf Grund der hohen Spannweiten meist vor Ort durchgeführt wird. Zwar werden Fachwerke nicht immer in ihre gesamten Einzelteile zerlegt und anschließend aus diesen am Montageort wieder zusammengebaut, jedoch sind schon alleine aus Gründen der Logistik den Abmessungen für den Transport und der Kapazität des vorhandenen Hebezeuges Grenzen in Länge, Höhe und Gewicht gegeben.

Zu jener Zeit, als Anschlüsse durch Stabdübel und eingeklebte Gewindestangen oder Stahlbauteile noch eine Schwierigkeit in der Herstellung darstellten, wurden die Probleme der Verbindung der Stäbe oftmals durch das Teilen von Stabquerschnitten und das daraus resultierende, leichte Einfügen der Stäbe gelöst.

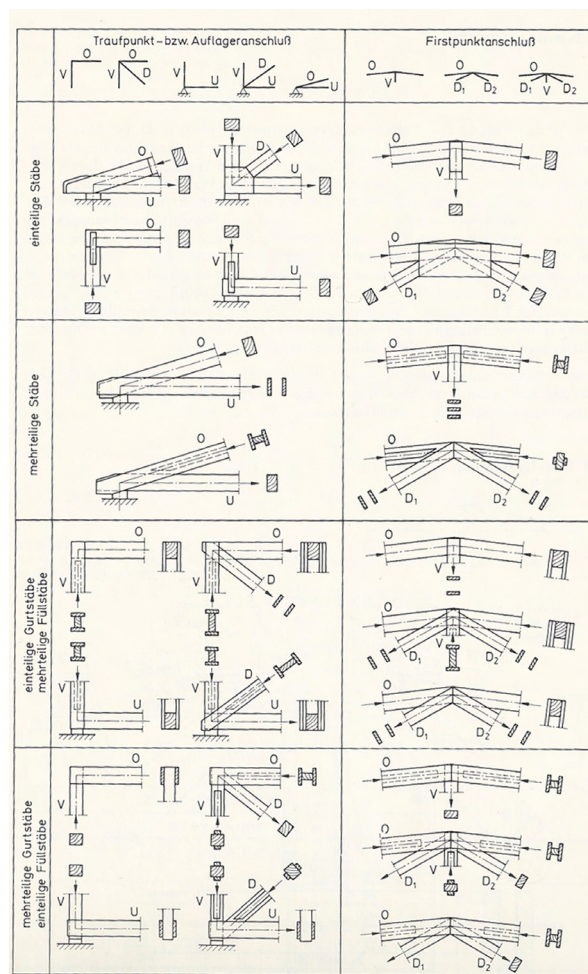


Abb. 2.10 Verbindung von Fachwerken bei Ausführung mit zweiteiligen Stäben [24]

Um die Probleme der Verbindungsmittel lösen zu können, wurden auch oftmals Dübel besonderer Bauart oder Nagelplatten verwendet.



Abb. 2.11 Beispiel für einen Einpressdübel [39]

vgl. [30]

Bei der Berechnung von Fachwerken wird nach der Fachwerktheorie immer von reibungsfreien Anschlüssen ausgegangen. Dies ist jedoch nur bei einigen Verbindungstypen und meist geringen Lasten möglich. Werden für den Anschluss lediglich Verbindungsmittel entlang einer Achse angeordnet oder kommen Gelenkbolzen als Anschlussmittel zur Anwendung, kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass die Anschlüsse reibungsfrei ausgeführt sind.

## 2.5 Anschlussstechniken bei Fachwerken

Die in der Arbeit beschriebenen Effekte führen oft zu einer ungewollten Veränderung des Fachwerkes. Diese wirken sich sehr stark auf den Bemessungsaufwand aus und können zu einem unwirtschaftlichen und unökonomischen Einsatz von Holz führen.

Durch eine gezielte Planung von Fachwerken und deren Anschlüsse kann dies jedoch verringert werden. In diesem Abschnitt der Arbeit sollen neue Anschlussstechniken für Druck- und Zugstöße im Holzfachwerkbau gezeigt und diese auf ihre Anfälligkeit gegenüber der Modellierung untersucht werden.

Allgemein lässt sich hierzu für die Anschlüsse von Fachwerken folgendes festhalten:

- Je steifer die Anschlüsse sind, desto geringer ist deren Auswirkung auf das Verformungsverhalten des Fachwerkes.
- Je weicher die Anschlüsse sind, desto weniger Lasten werden durch diese angezogen und desto geringer ist die Erhöhung der Ausnutzung.
- Je kürzer die Anschlüsse sind, desto kleiner ist der Abstand des Lasteinleitungs- und Lastweiterleitungspunktes, welcher zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Bauteile führt.
- Durch die richtige Planung und Ausführung von Anschlüssen ist es möglich, erforderliche Holzressourcen einzusparen und dadurch die Ausführung von Holzfachwerken günstiger und damit wettbewerbstauglicher zu gestalten.
- Bei der Planung von Anschlüssen sollte darauf geachtet werden, dass diese nur ihre Aufgaben erfüllen und nicht das zusätzliche Auftreten von Effekten verursachen.

Mit der nachfolgenden Auflistung von neuen Anschlussstechniken, welche sich teilweise aus bereits vorhandenen, jedoch abgeänderten Lösungen zusammensetzen, sollen Möglichkeiten gezeigt werden, wie die Planung und Ausführung von Fachwerkknoten zu optimieren sein könnte.

Diese Anschlüsse sind mit gewissen Anpassungen nicht nur für die hier dargestellten Streben/Pfosten - Fachwerke möglich, sondern auch für Strebenfachwerke anwendbar.

Um die Übersichtlichkeit der nachfolgenden Darstellungen zu gewährleisten, werden zuerst Anschlüsse für Druckelemente und darauffolgend Anschlüsse für Zuelemente abgebildet.

## 2. 5. 1 abgestirnter Zapfen

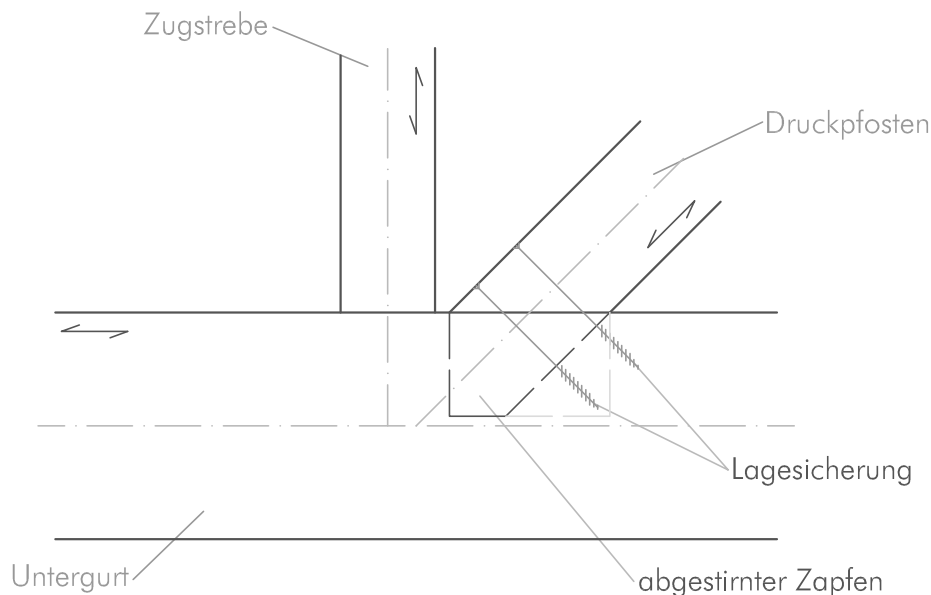


Abb. 2.12 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit zimmermannsmäßigen Verbindungen durch einen abgestirnten Zapfen

vgl. [37]

Bei dieser Lösung wird die Normalkraft der Druckstrebe durch eine zimmermannsmäßige Verbindung abgetragen. Hierbei wird die Last durch Reibung zwischen den Bauteilen und Pressung des Holzes übertragen. Zwar ist die Größe der übertragbaren Kraft beschränkt, jedoch würden durch diesen Anschluss beinahe keine zusätzlichen Schnittkräfte in den Druckstrebe eingeleitet, da keine Steifigkeit des Anschlusses vorliegt. Es ist eine sehr hohe Fertigungsgenauigkeit der Anschlussstellen erforderlich, um die Aktivierung der Reibung zu gewährleisten.

Diese Lösung wurde bereits seit Beginn der Fachwerkstrukturen aus Holz verwendet, wird jedoch auf Grund des Herstellungsaufwandes und der geringen Tragfähigkeit heute kaum mehr eingesetzt.

## 2. 5. 2 verschraubter Stahlschuh

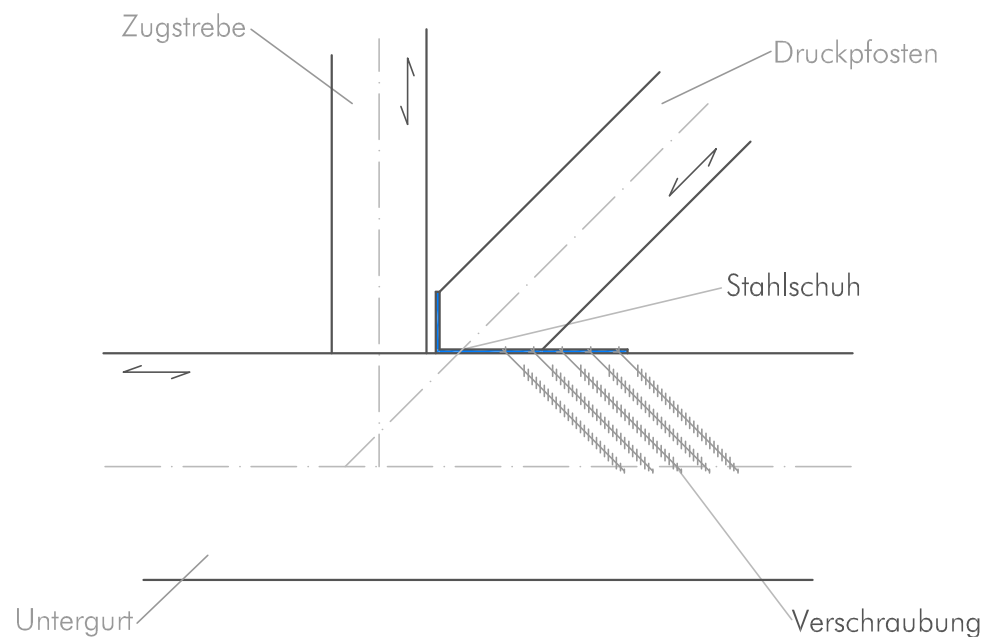


Abb. 2.13 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit verschraubtem Stahlschuh

Um die Querschnittsschwächung des Untergurtes zu verringern, kann der Zapfen auch außerhalb angebracht werden. Dazu wird ein Schuh mit der Druckstrebe und anschließend mit dem Untergurt verbunden. Zur Verbindung dieses Schuhs können eingeklebte Gewindestangen oder Schrauben verwendet werden. Da diese dabei jedoch auch mit einer Abscherkraft beansprucht werden, kann ebenso wie beim Zapfen nur eine begrenzte Kraft übertragen werden.

Zusätzlich wird durch den Schuh, welcher eine gewisse Einspannung des Stabes verursacht, zwar die Knicklänge des Stabes verringert, jedoch werden dadurch sehr hohe Zusatzschnittkräfte in den Anschlussbereich des Stabes eingeleitet.

## 2. 5. 3 Stabdübelverbindung

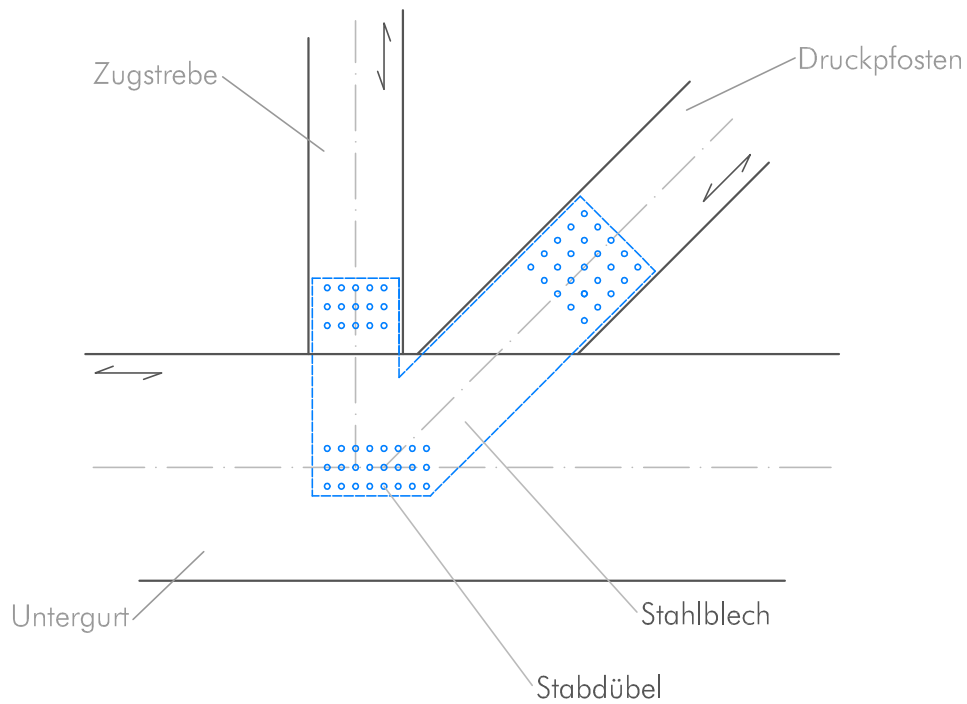


Abb. 2.14 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit Stabdübeln und eingeschlitzten Stahlblechen

Der oben dargestellte Fachwerkknoten stellt den aktuellen Stand der Technik für Anschlüsse dar. Dabei können alle drei Bauteile vor Ort durch die eingeschlitzten Stahlbleche und die Stabdübel miteinander verbunden werden. Die Bauteile können daraus folgend in sehr kleinen Einheiten transportiert werden.

Wie jedoch in der Parameterstudie ersichtlich, treten hier sehr hohe Zusatzschnittkräfte in den Anschlusspunkten auf.

## 2. 5. 4 Vollgelenkanschluss

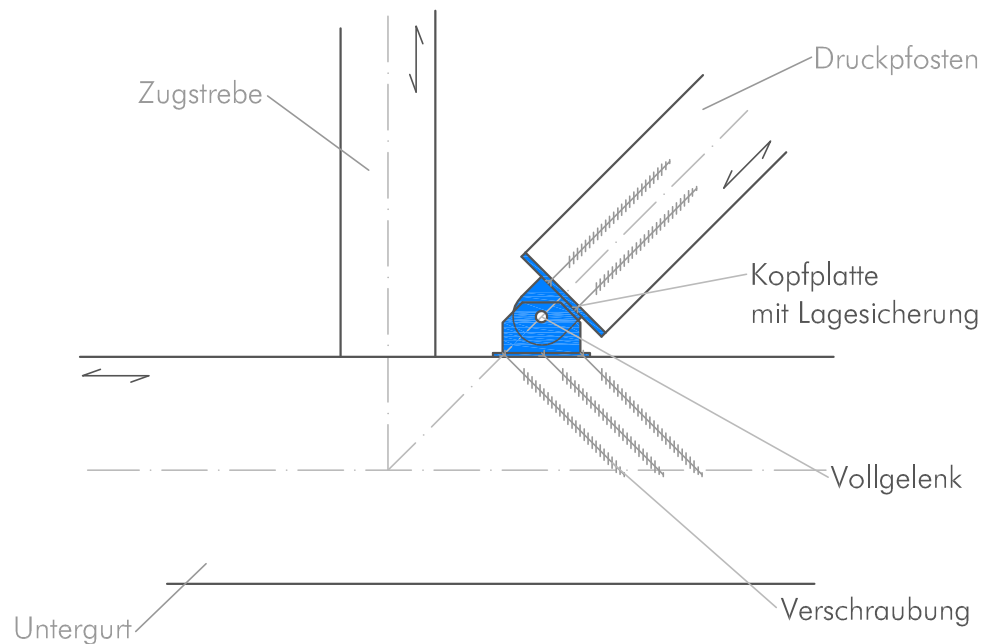


Abb. 2.15 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit Vollgelenk zur Lastübertragung

Durch die Anbringung eines Vollgelenkes (oder Bolzengelenk) im Anschlussbereich des Druckstabes wäre es möglich, die Entstehung von Zusatzschnittkräften vollkommen zu verhindern. Ebenso wie bei der Anbringung eines Stahlschuhes wäre die Verbindung zwischen dem Vollgelenk und dem Untergurt mit gewissen Problemen verbunden. Die Verbindung zwischen dem Gelenk und dem Druckpfosten könnte durch Hirnholzpressung, eingeklebten Gewindestangen oder Hirnholzverschraubungen ausgeführt werden.

Die Montagegenauigkeit müsste für diesen Anschluss wahrscheinlich auf Höhe des Stahlbaues liegen, um durch das Einbringen des Bolzens in das Gelenk nicht bereits Vorkrümmungen und Zusatzspannungen im Bauteil zu verursachen.

## 2. 5. 5 Schubknagge

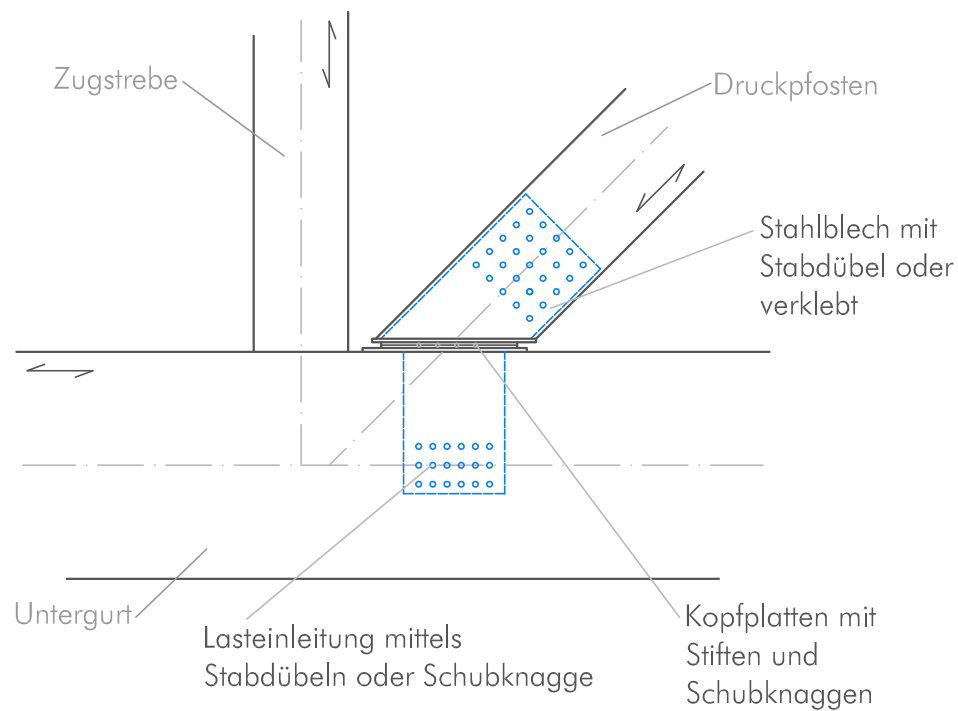


Abb. 2.16 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit Schubknagge zur Lastübertragung

Um den Platzbedarf des Vollgelenkes und die mit diesem verbundene optische Beeinflussung des Erscheinungsbildes zu verhindern, kann der große Bolzen durch eine Vielzahl von kleinen Stiften ersetzt werden. Da bei dieser Lösung der Abstand zwischen Lasteinleitung und Lastausleitung im Anschlussbereich verkleinert wird, könnte die untergurtparallele Schnittkraft in der Druckstrebe durch eine Stahlknagge zwischen den beiden Stahlplatten übertragen werden.

Ebenso wie bei der Herstellung des Vollgelenkes ist auch hier eine sehr hohe Genauigkeit erforderlich, um die Verbindung der Bauteile miteinander zu ermöglichen.



## 2. 5. 6 Schubknagge mit Stahlschuh

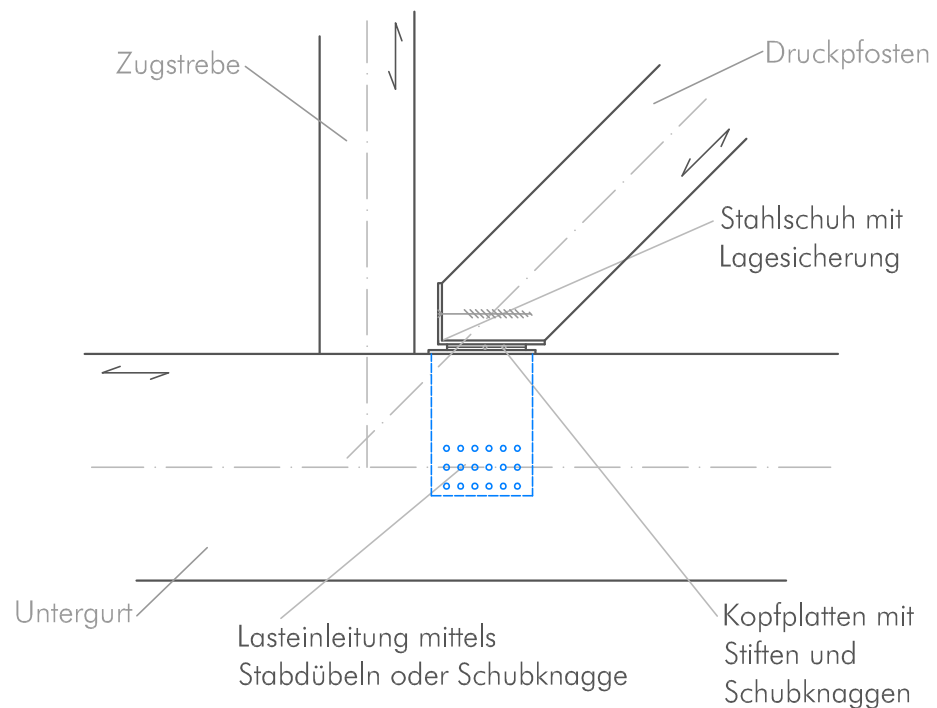


Abb. 2.17 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit Schubknagge mit Stahlschuh zur Lastübertragung

Bei einem niedrigem Lastniveau ist es möglich, einen Stahlschuh zur Lastübertragung vom Druckpfosten in den Anschluss zu verwenden. Die Lasteinleitung in den Untergurt könnte ebenso wie bei dem verkleinerten Gelenk durch Verschraubungen, Stahlbüdel oder eingeklebte Gewindestangen hergestellt werden.

## 2. 5. 7 abgetrepter Versatz

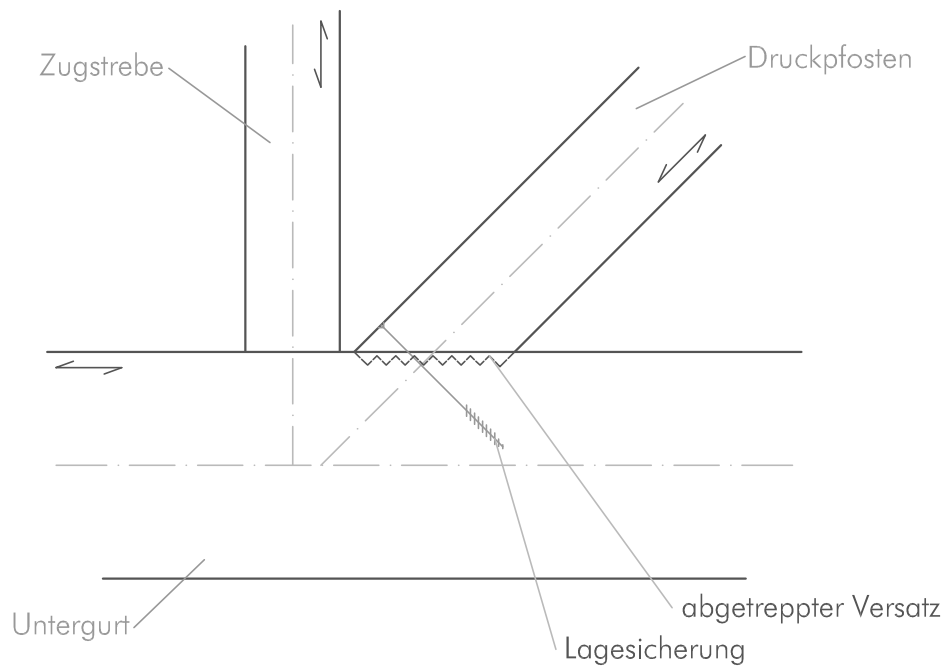


Abb. 2.18 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit einem abgetrepten Versatz zur Lastübertragung

vgl. [32]

Eine klassische Lösung für die Übertragung von Druckkräften stellt der Versatz dar. Durch den oben dargestellten abgetrepten Versatz kann die übertragbare Last im Vergleich zu einfachen Versätzen oder Fersenversätzen erhöht werden.

Die sehr hohen Anforderungen an diesen Anschluss fordern die Verwendung von computergesteuerten Abbundmaschinen zur seriellen Herstellung dieses Anschlusses, um den Zeitaufwand zu verringern und die Genauigkeit zu erhöhen.

## 2. 5. 8 verschraubtes Stahlschwert

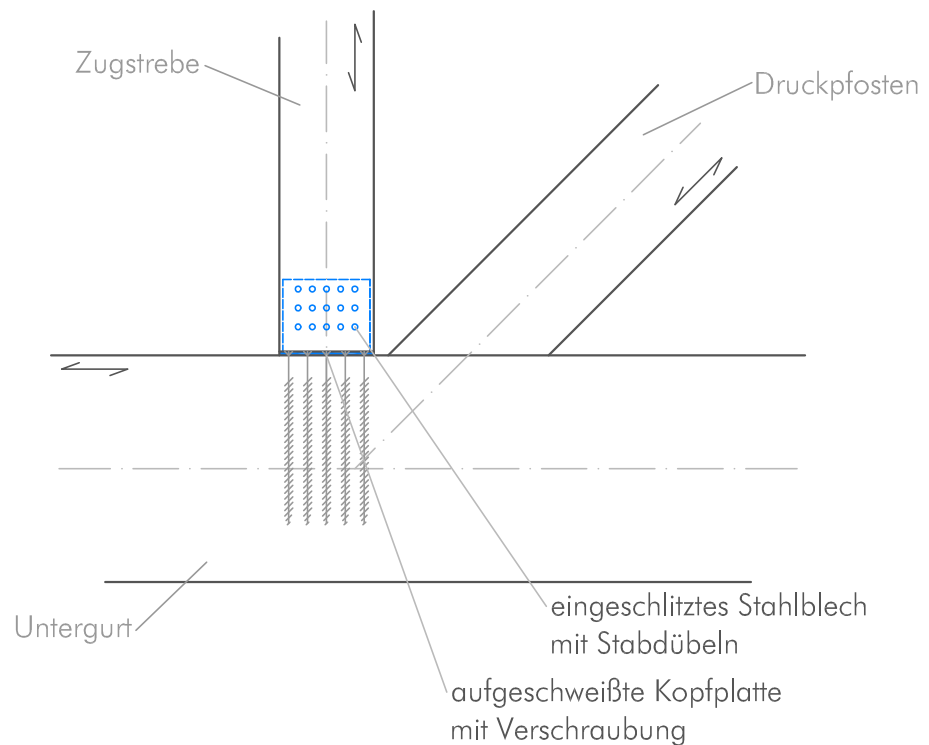


Abb. 2.19 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit einem verschraubten Stahlschwert zur Lastübertragung

Eine klassische Lösung zur Übertragung von Zugkräften ist ein auf den Gurt aufgeschraubtes Stahlschwert, welches mittels Stabdübeln mit der Strebe verbunden wird.

In dieser werden durch dieses System zusätzliche Schnittkräfte eingeleitet, welche jedoch sehr gering sind, da der Schraubenanschluss mit dem Gurt eine sehr geringe Steifigkeit aufweist und daher geringe Lasten anzieht. Bei großen Lasten ist dieser Anschluss nicht zu empfehlen, da eine sehr große Anzahl an Schrauben (obwohl in die geeignete Richtung (auf Herausziehen) beansprucht) erforderlich ist, die dazu notwendige Fläche jedoch im Anschlussbereich des Knotens nicht vorhanden ist.

## 2. 5. 9 verschraubter Gurt

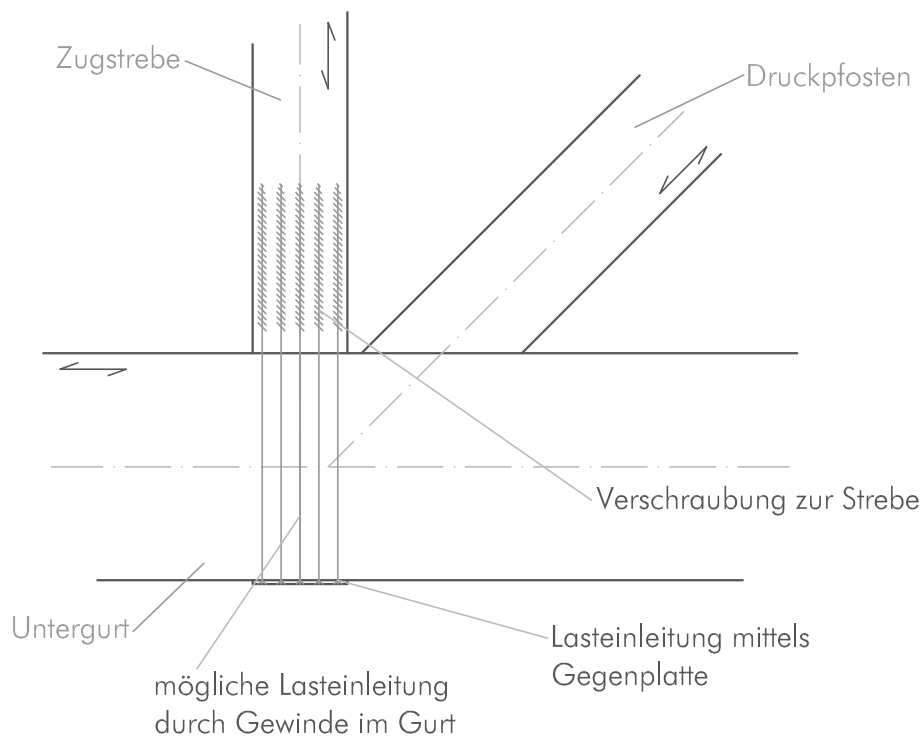


Abb. 2.20 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit einem verschraubten Gurt zur Lastübertragung

Bei dieser Anschlusslösung wird die Strebe direkt mit dem Gurt verschraubt. Dabei kann die Lastübertragung entweder durch das Gewinde der Schrauben im Gurt übernommen werden, oder durch eine Kopfplatte an der Unterseite des Gurtes durch Flächenpressung.

Diese Art von Anschlüssen ist jedoch bis jetzt normativ noch nicht eindeutig geregelt, da es sich in der Strebe um eine Hirnholzverschraubung handelt, welche leicht zu einem Aufspalten dieser oder zu einem Querkzugversagen führen kann und das Langzeitverhalten solcher Anschlüsse sehr kritisch zu betrachten ist.

## 2. 5. 10 eingeklebte Gewindestange

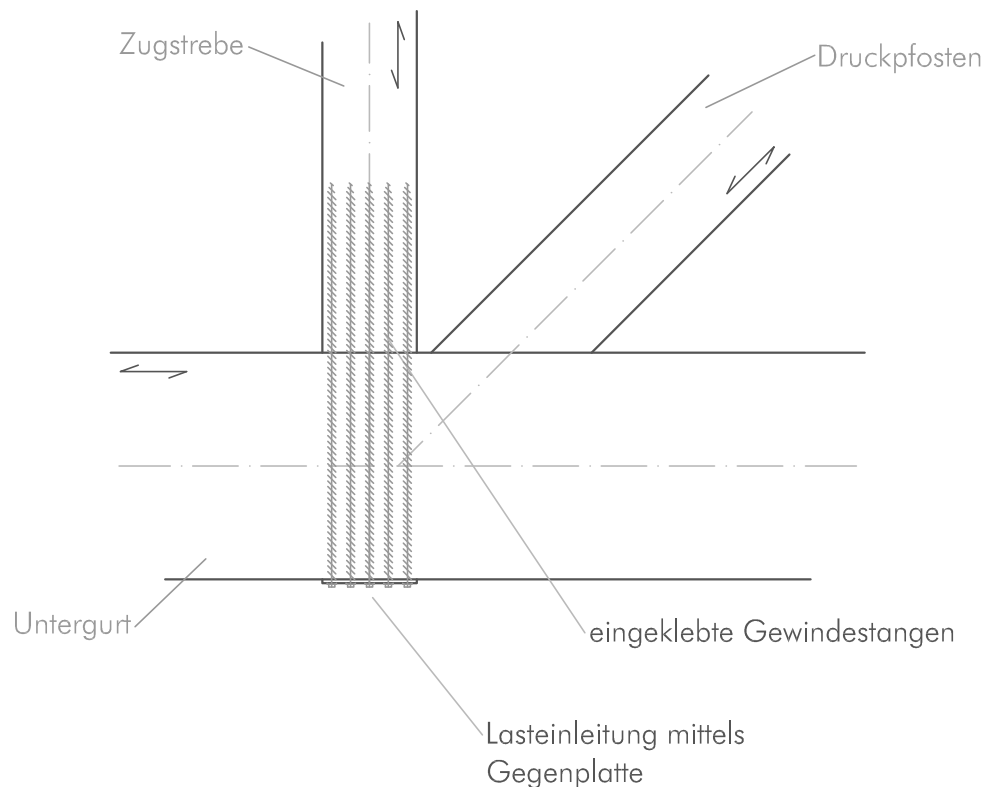


Abb. 2.21 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit einer eingeklebten Gewindestange zur Lastübertragung

Dieser Anschluss stellt eine Modifikation des vorher dargestellten verschraubten Gurtes dar. Die in die Strebe eingeklebten Gewindestangen übernehmen die Lasten und leiten diese an die Unterseite des Gurtes, wo sie durch Flächenpressung abgeleitet werden.

Der Vorteil gegenüber dem verschraubten Gurt besteht darin, dass dieser Anschluss einen hohen Vorfertigungsgrad aufweist. Die Streben mit den eingeklebten Gewindestangen werden bereits fertig auf den Montageort geliefert und müssen nur noch mit dem Gurt zusammengefügt werden, in welchem sich bereits die Bohrungen und Fräsungen zur Aufnahme dieser befinden. Durch eine derartige Lösung kann jedoch der Querschnitt beider Bauteile derart geschwächt werden, dass es zu einem Versagen des Nettoquerschnittes kommt. Eine mögliche Lösung hierfür kann eine abgestufte Kräfteinleitung durch das versetzte Anbringen der Gewindestangen sein.

## 2. 5. 11 eingeklebte Stahlbleche und Schubknaggen

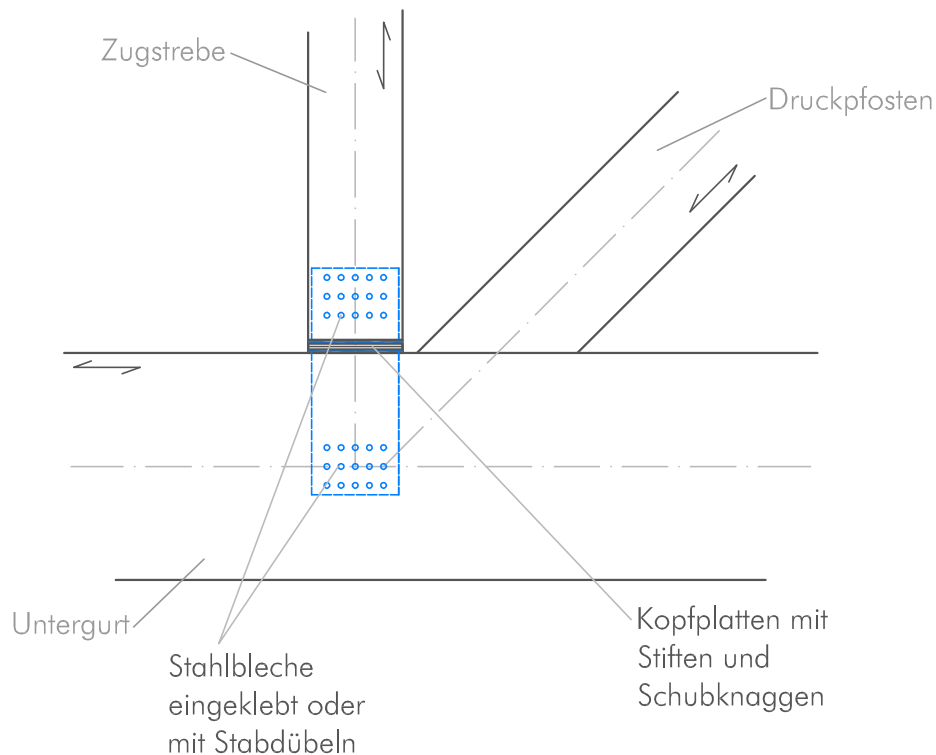


Abb. 2.22 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit eingeklebten Stahlblechen und Schubknaggen zur Lastübertragung

Ebenso wie zur Übertragung von Druckkäften in den Pfosten, können Schubknaggen auch zur Übertragung von Zugkräften aus den Streben verwendet werden. Hierbei kann die Lasteinleitung und die -ausleitung in die Stahlbauteile jedoch nicht durch Flächenpressung geschehen. Daher können die Stahlbleche eingeklebt, hirnholzverschraubt oder mit Stabdübeln befestigt werden. Bei der Lasteinleitung in den Gurt ist jedoch das Auftreten eines Querkzugproblem es zu erwarten. Daher sollte der Punkt der Lasteinleitung unter die Achse des Gurtes verschoben werden.

Wiederum besteht hierbei der Vorteil in der optischen Qualität des Anschlusses und dem hohen Vorfertigungsgrad.

## 2. 5. 12 eingeklebte Rohrverbinder

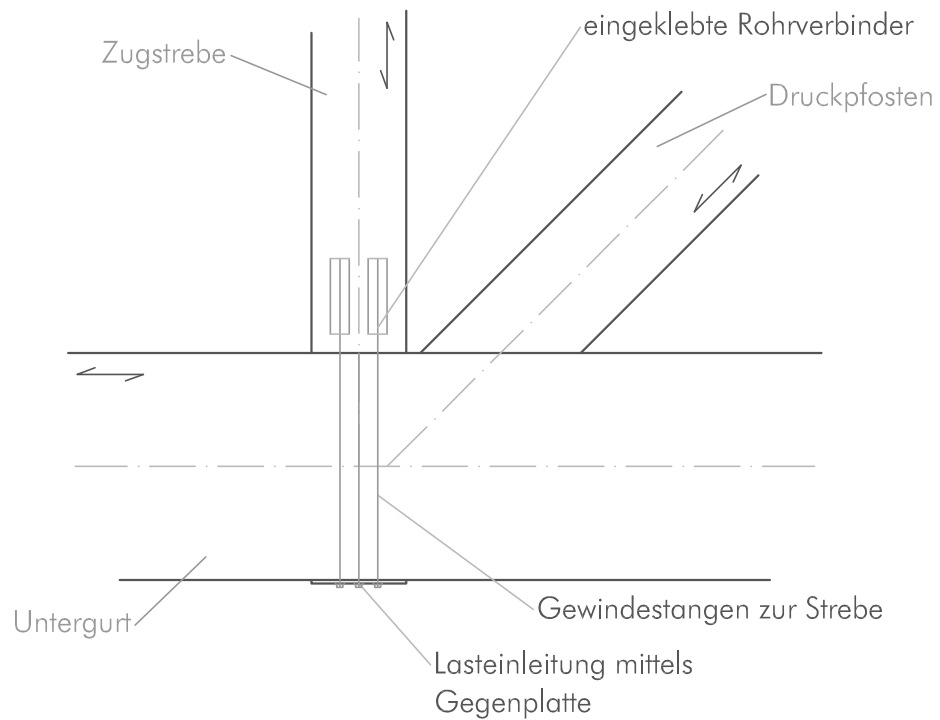


Abb. 2.23 Anschlusslösung für Fachwerkknoten mit eingeklebten Rohrverbindern zur Lastübertragung  
vgl. [38]

Bei diesem Anschluss wird die Verklebung der Gewindestange in der Strebe durch eingeklebte Rohrverbinder hergestellt. Diese stellen Metallhülsen dar, welche an der Außenseite aufgeraut sein können, oder ein Gewinde aufweisen. Sie werden in den Bauteil eingeklebt und stellen die Lasteinleitung durch Verbundwirkung sicher.

Zur Montage der Gewindestange ist ein Innengewinde in der Metallhülse vorhanden, in welches die Gewindestange eingeschraubt werden kann.

### 3 Systemeffekte bei Fachwerken

Beim Entwurf, der Konzeptionierung und der Berechnung von Fachwerken sind wie bei allen Konstruktionselementen gewisse Systemeffekte in der Modellierung und Berechnung zu berücksichtigen. Diese können verschiedenen Erscheinungsformen, Auswirkungen und Hintergründen zu Grunde liegen und können wie folgt gegliedert werden: [25]

- imperfekte Geometrie,
- imperfekte Lasteinleitung,
- imperfektes Material,
- Steifigkeitsverteilung innerhalb des Tragwerkes,
- Montage- und Herstellungseffekte, sowie
- Modellierungs- und Abbildungseffekte.

Diese Systemeffekte, unabhängig von ihrer Entstehungsart und ihrem gemeinsamen Auftreten, können bei Tragwerkselementen Einflüsse auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit haben. Im Zuge der Nachweise in den beiden Grenzzuständen ist es daher notwendig, diese Effekte mitzubetrachten oder die Möglichkeit ihrer Vernachlässigung abzuschätzen und in Betracht ziehen.

Die oben angeführten Systemeffekte können sowohl global auf das gesamte Tragwerk einwirken (Stützensenkung) als auch lokal (Lasteinleitung im Anschlussbereich) auftreten. Daraus folgend können Tragwerke einerseits als Gesamtsystem in der Berechnung abgebildet werden, andererseits ist es möglich, Einzelteile zu betrachten und dabei die Systemeffekte durch zusätzliche Ersatzlasten zu berücksichtigen.

Im Bereich des Stahl- und Aluminiumbaus werden diese beiden Möglichkeiten bereits angewendet. Die ÖNORM EN 1995-1-1 [4] sieht für die Berechnung verschiedene Methoden vor, um die Stabilitätsnachweise des Tragwerkes zu führen und dabei diese Systemeffekte zu berücksichtigen.



### 3.1 Geometrische Imperfektionen

Das Wort Imperfektion leitet sich aus dem lateinischen Begriff *imperfectus* für Unvollkommenheit ab. Durch sie werden Abweichungen von der idealisierten Form beschrieben.

vgl. [25]:

Zu den geometrischen Imperfektionen zählen im Wesentlichen die Formabweichungen. Das können, bezogen auf Stabwerke, ungewollte Verdrehungen und Verkrümmungen der Stabachse oder abweichende Stabquerschnitte sein. Alle drei Unterscheidungsformen können dabei sowohl lokal als auch global auftreten, und müssen auch nach diesen beiden Formen unterschieden werden.

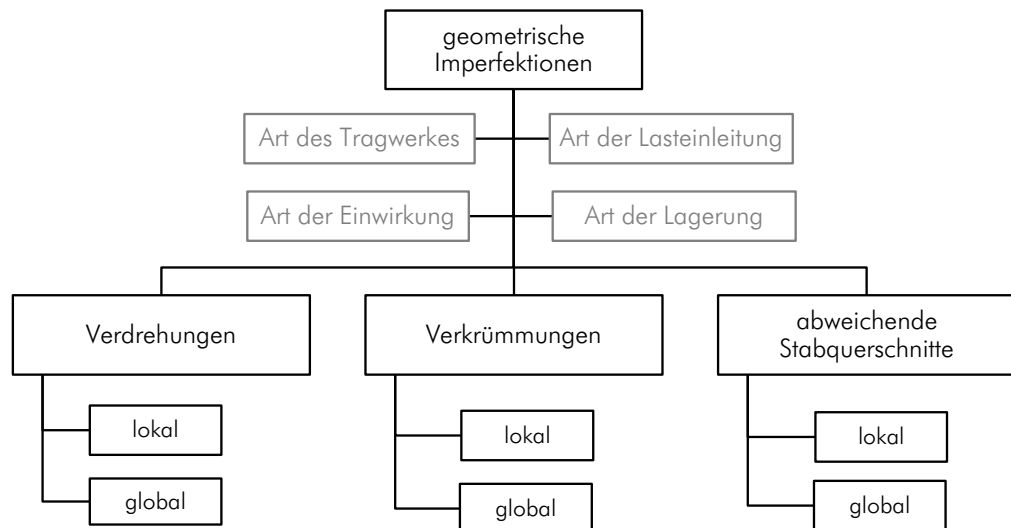


Abb. 3.1 Mögliche Gliederung der geometrischen Imperfektionen

Zur Definition der Imperfektionen ist die Beschreibung des Ausgangssystems notwendig. Bei Fachwerken und stabwerkförmigen Strukturen handelt es sich dabei um das perfekte oder ideale Fachwerk. Bei der Definition des Ausgangssystems wird oft die Bezeichnung Referenzkonfiguration verwendet. Um die Auswirkungen der Imperfektionen und anderer Effekte zu beschreiben, wird die Momentankonfiguration verwendet. Zur Beschreibung dieser beiden Zustände kann das Boltzmann-Kontinuum verwendet werden.

## Boltzmann-Kontinuum

Mit Hilfe des nach Ludwig Boltzmann 1899 beschriebenen Kontinuums und des danach benannten Axioms lassen sich die Lage und Bewegungen eines Körpers in Folge äußerer Einflüsse beschreiben und mathematisch definieren. Dabei wird ein Körper  $B$  mit isotrop-elastischem Materialverhalten verwendet, um dessen physikalische Veränderungen unter Einwirkungen, wie Kräften und Temperaturänderungen, in seiner Lage und Gestalt zu beschreiben. Der definierte Körper  $B$  stellt dabei die Summe aller materiellen Punkte  $M$  dar, welche diesen bilden. [25]

## Referenzkonfiguration

Unter Referenzkonfiguration oder auch Ausgangskonfiguration im Bezug auf das Boltzmann-Kontinuum versteht man ein System, welches sich in spannungsfreier und unverformter Lage befindet. Für Tragwerke ist dies im Unterschied zu Kontinua nicht ganz zutreffend, da bereits durch die Herstellung, die Formung der Bauteile oder die Montage Spannungen auftreten können. Hierbei handelt es sich in den meisten Fällen um „Eigenspannungen“ und daraus folgende Verformungen. In den nachfolgenden Punkten wird daher von einer Referenzkonfiguration gesprochen, wenn es sich um ein unverformtes, jedoch nicht gänzlich spannungsfreies System handelt. [25]

## Momentankonfiguration

Aus der Referenzkonfiguration heraus, unter Einwirkung äußerer Einflüsse, lässt sich die Momentankonfiguration für den Körper  $B$  bilden. Diese entspricht in der Gesamtheit ihrer Elemente immer noch der des Körpers  $B$  aus der Referenzkonfiguration, jedoch sind die Lage und räumliche Aufteilung der einzelnen Elemente  $M$  unterschiedlich. [25]

Die Lage jedes einzelnen Elementes  $M$  aus der Summe des Körpers  $B$  lässt sich jedoch mit Hilfe von Vektoren beschreiben. Dabei erhält jeder Punkt sowohl eine translatorische, als auch rotatorische Verschiebung im Bezug auf die Referenzkonfiguration. [25]

## Cosserat Kontinuum

Um das Boltzmann-Kontinuum genauer definieren zu können, und um dieses auch für den allgemeinen Fall der kleinen Verformungen gültig zu machen, wird als Erweiterung das Cosserat Kontinuum verwendet. Dieses fügt zusätzlich zum bereits definierten Vektor für die rotatorischen und translatorischen Bewegungen noch ein Koordinatensystem hinzu, um die Verdrehung im Vergleich zur Referenzkonfiguration im räumlichen Bezug darzustellen. Aus der Verwendung eines dreibeinigen Koordinatensystemes ergibt sich die Forderung, dass die Verformungen immer entlang einer durch eine Gerade approximierbaren Kurve zu geschehen haben. Für Tragwerke, bei denen kleine Verformungen angenommen werden (keine Theorie III.Ordnung) kann dies als gültig angesehen werden. [25]

## Perfektes Tragwerk

Als perfektes Tragwerk bezeichnet man jenes Tragwerk, welches in der Referenzkonfiguration betrachtet wird. Das heißt, dass es keine Unvollkommenheiten aufweist und daraus resultierende Spannungen und Verformungen nicht vorhanden sind.

Für Fachwerke gibt es hierfür zwei Möglichkeiten:

- ideales Fachwerk - Fachwerkstäbe mit Vollgelenken
- reelles Fachwerk - Balkenstäbe mit Halbgelenken und Fachwerkstäben

Ein ideales Fachwerk beschreibt ein Fachwerk, welches aus durch Vollgelenken miteinander verbundenen Fachwerkstäben besteht. Das heißt, dass das Tragverhalten des Fachwerkes nur aus Druck- und Zugkraftableitung besteht. Momente können nur zwischen den Gelenken auftreten. Zur Vereinfachung der Berechnung wird oft dieser Typ für die Modellierung eines Fachwerkes gewählt, da sich die Berechnung der Stabkräfte mit Hilfe von Rund- und Ritterschnitten bei diesem System sehr einfach gestaltet. Sollten die Anschlüsse der Stäbe untereinander eine sehr geringe Rotationssteifigkeit aufweisen, so ist diese Berechnungsmethode zulässig.

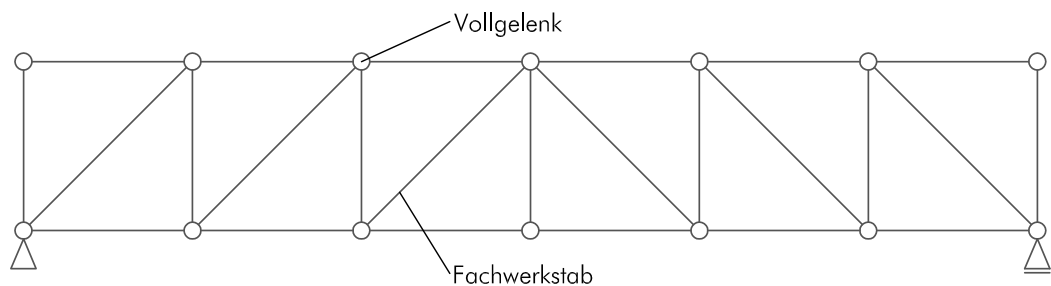


Abb. 3.2 Darstellung eines ideellen Fachwerkes

Im Gegensatz zum ideellen Fachwerk, werden bei einem reellen Fachwerk die Ober- und Untergerüste aus durchlaufenden Balkenträgern gebildet, an welche die Streben und Pfosten durch Halbgelenke angeschlossen werden. Daraus ergibt sich für das Tragverhalten eine Mischung aus Biege- und Normalkrafttragfähigkeit. Im Holzbau ist diese Art der Modellbildung der häufigste Fall.

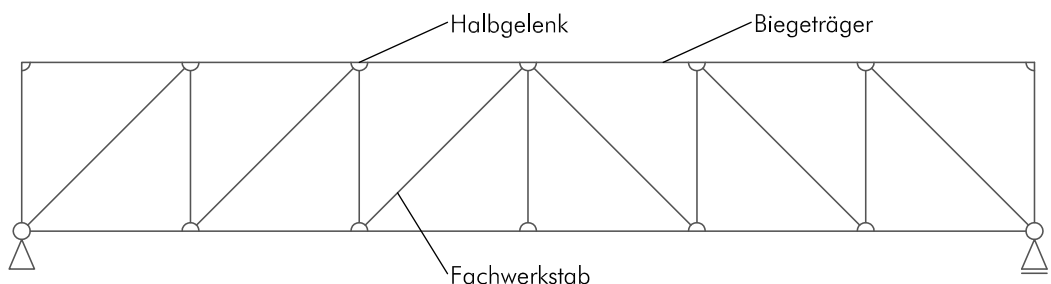


Abb. 3.3 Darstellung eines reellen Fachwerkes

Die Unterschiede in der Lastabtragung sind auf Grund der Modellierung ersichtlich. Während ein ideelles Fachwerk durch reine Zug- und Druckkräfte die aufgebrachte Last abzuleiten versucht, bezieht ein reelles Fachwerk die Biegetragfähigkeit des Ober- und Untergurtes mit ein.

Nachfolgend soll ein Beispiel den Unterschied im Tragverhalten zeigen:

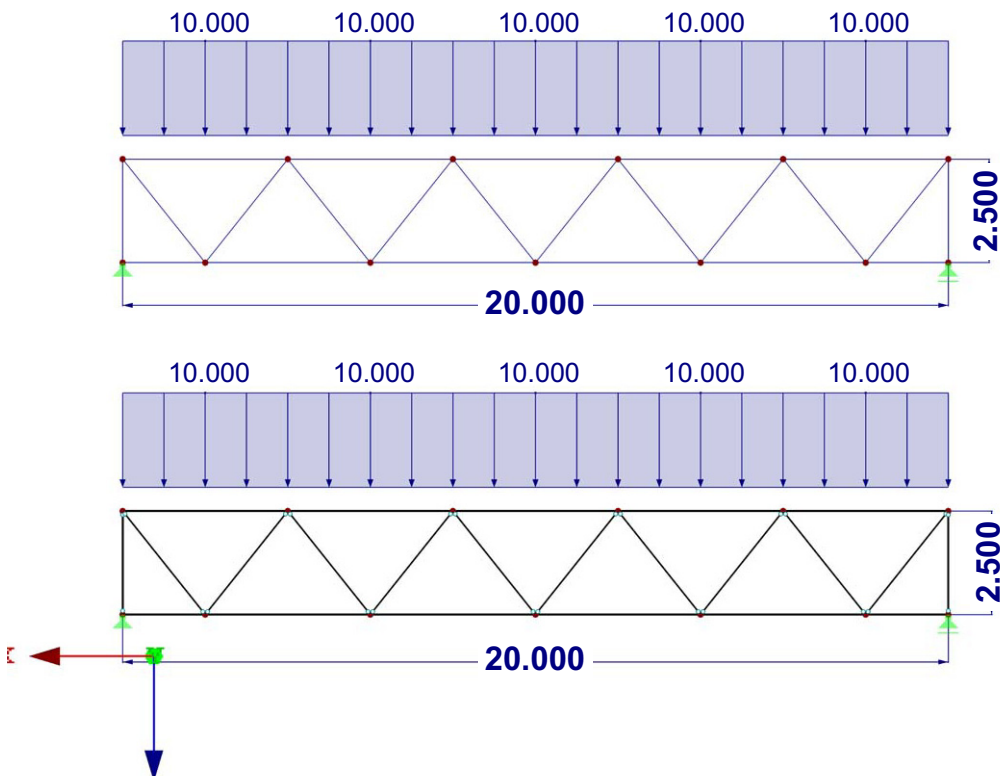


Abb. 3.4 Schematisches System und Belastung der beiden Fachwerke

Das obere Fachwerk wurde dabei als ideelles Fachwerk modelliert. Die Stäbe können nur Normalkräfte aufnehmen und wurden durch Vollgelenke miteinander verbunden. Die untere Abbildung stellt ein reelles Fachwerk dar. Der Ober- und Untergurt können dabei Momente und Querkräfte übertragen und die Streben sind mittels Halbgelenken an diese angeschlossen.

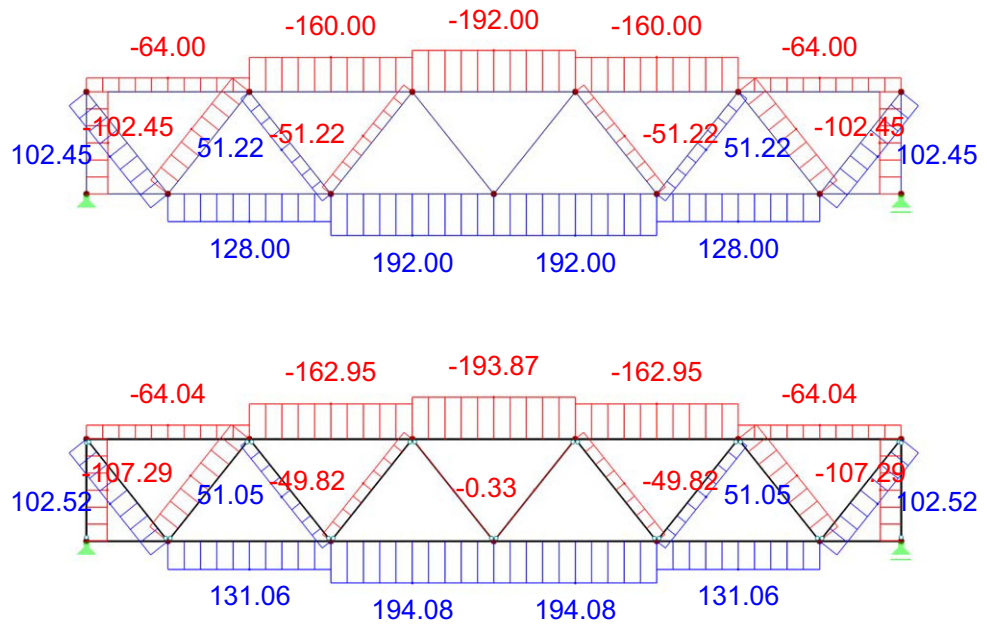


Abb. 3.5 Normalkraftverlauf in den Stäben

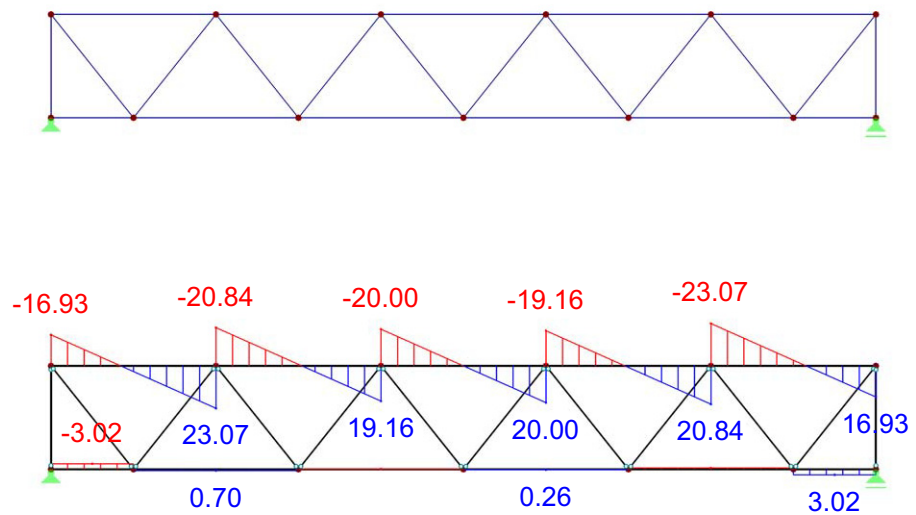


Abb. 3.6 Querkraftverlauf in den Stäben

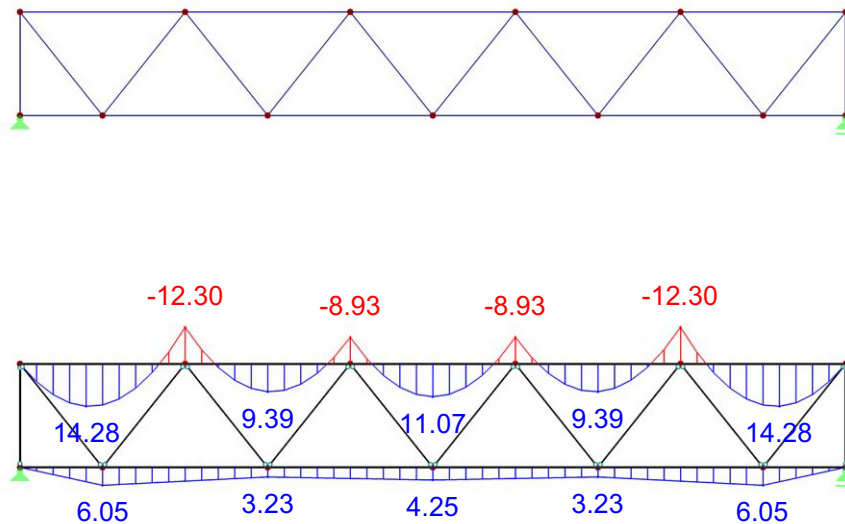


Abb. 3.7 Momentenverlauf in den Stäben

Die Schnittkräfte sollen hierbei nur qualitativ die Tragwirkung veranschaulichen.

Bei der Darstellung der beiden unterschiedlichen Tragwerksarten wird ersichtlich, dass:

- das ideale Fachwerk nur Normalkräfte zur Lastabtragung verwendet,
- beim reellen Fachwerk zusätzlich die Biegetragfähigkeit des Ober- und Untergurtes zur Lastabtragung mitverwendet wird,
- beide Fachwerke annähernd gleich große Normalkräfte in den Stäben aufweisen, und
- der Untergurt bei einem Fachwerk mit Halbgelenken weniger Momentenbeanspruchung erhält als der Obergurt.

## Imperfektes Tragwerk

Von einem imperfekten Tragwerk spricht man, wenn die Momentankonfiguration nicht der Referenzkonfiguration entspricht. Dieser Unterschied wird durch geometrische Abweichungen erzeugt, daraus müssen nicht zwingend auch Spannungen im Tragwerk entstehen. Diese Differenz kann entweder durch eine lokale oder durch eine globale Imperfektion hervorgerufen werden.

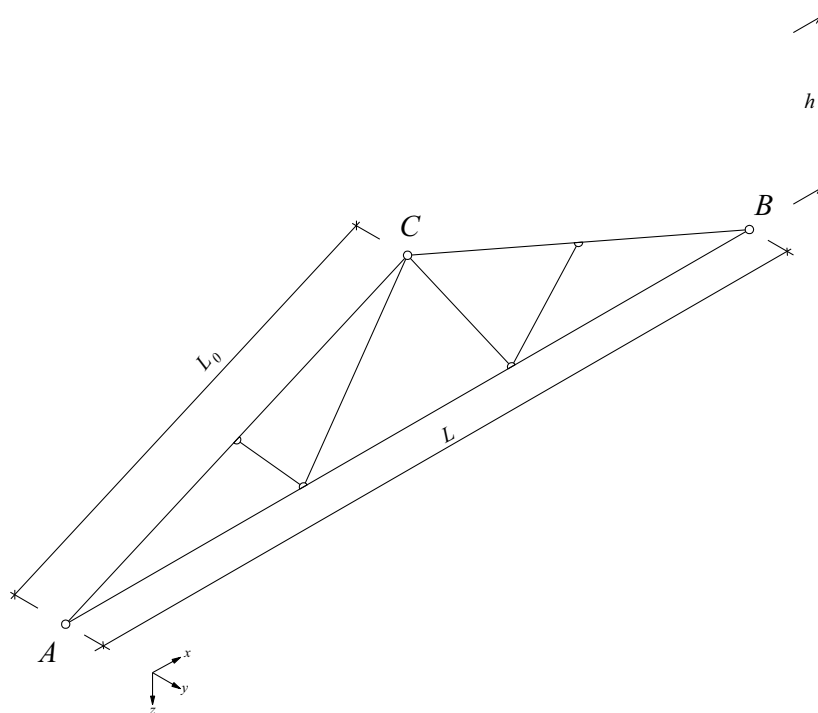


Abb. 3.8 Referenzkonfiguration eines Satteldachbinders [25]

Lokale Imperfektionen beziehen sich immer nur auf die Stabachse eines einzigen Tragwerkelementes, während globale Imperfektionen sich auf das gesamte Tragwerk oder auf einen kineamatisch verschieblichen Teil des Tragwerkes beziehen.

In der Fachliteratur und den Berechnungsnormen werden dabei lokale Imperfektionen immer mit der Abkürzung  $\Delta a$  und globale Imperfektionen mit  $\varphi_0$  bezeichnet.

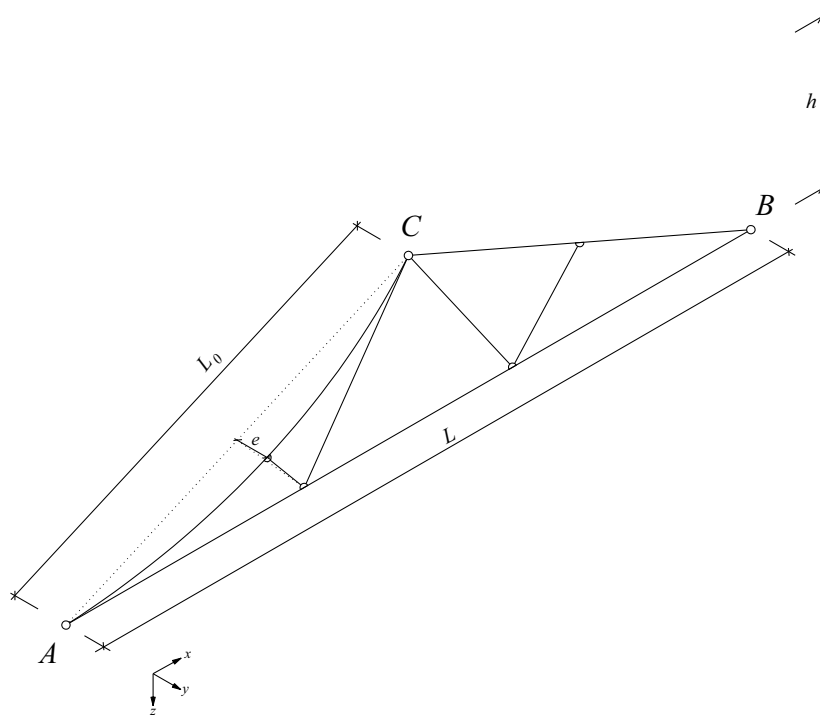


Abb. 3.9 Momentankonfiguration für lokale Imperfektionen eines Satteldachbinders [25]

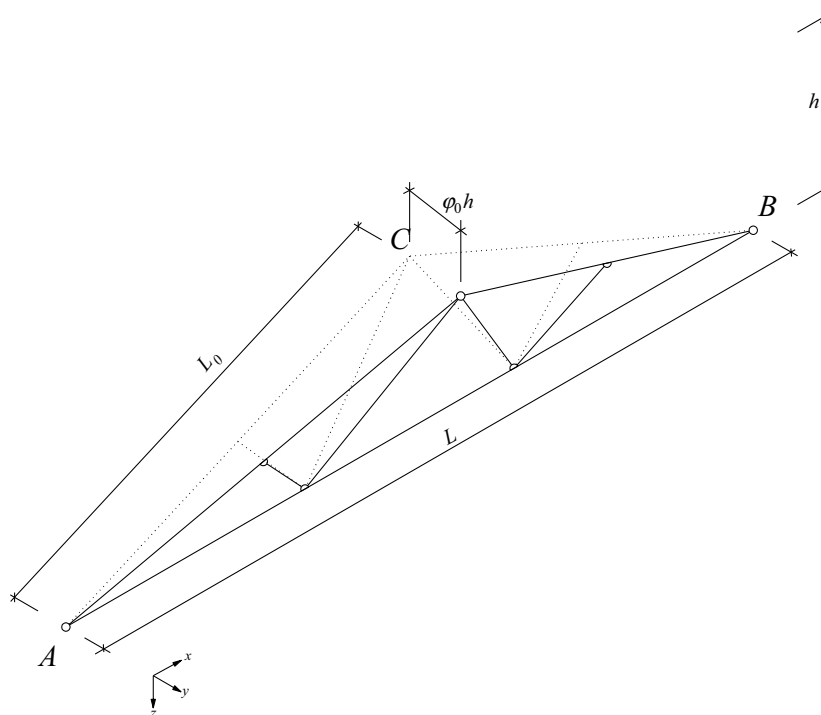


Abb. 3.10 Momentankonfiguration für globale Imperfektionen eines Satteldachbinders [25]



Im Zuge der Tragwerksberechnung unter Einbeziehung der Theorie II.Ordnung kommt es zu Verformungen und Formänderungen des Tragwerkes, welche mitberücksichtigt werden müssen. Diese Effekte lassen sich in drei Punkte einteilen:

- Verdrehungen und Verkrümmungen
- Verschiebungen
- abweichende Stabquerschnitte

Dabei handelt es sich bei den ersten beiden um den translatorischen und den rotatorischen Anteil aus welchen sich die Verformung zusammensetzt. Beim Dritten tritt der Effekt der Formänderung in Erscheinung.

### 3. 1. 1 Verdrehungen und Verkrümmungen

Bei der Verdrehung oder Verkrümmung handelt es sich um den rotatorischen Anteil, welcher aus der Verformung des Tragwerkes entsteht. Dabei wird die Achse des Stabes unter der einwirkenden Belastung verdreht. Bei Vollquerschnitten, wie sie im Holzbau üblich sind, ist dieser Anteil auf Grund der höheren Wölbsteifigkeit der Vollquerschnitte meist vernachlässigbar klein. Da jedoch diese Art der Beanspruchung zu einem sehr schnellen Ansteigen der Ausnutzung führen kann, sollte sie nach Möglichkeit bereits in der Tragwerksplanung ausgeschlossen werden, um ein mögliches, schlagartiges Versagen infolge Überbeanspruchung zu verhindern.

### 3. 1. 2 Verschiebungen

Verschiebungen stellen den translatorischen Anteil der Tragwerksverformung dar. Durch sie kann die Bewegung des betrachteten Punktes (z.B.: Stabanfang oder -ende) beschrieben werden. Bei Fachwerken setzt sich diese aus den lokalen Verschiebungen der einzelnen Stäbe zusammen.

### 3. 1. 3 abweichende Stabquerschnitte

Die Formänderung eines Stabes in Folge der einwirkenden Belastung kann durch die Abweichung seines Stabquerschnittes beschrieben werden. Gemeint sind hier die Kontraktion bei Zugbeanspruchung und die Expansion bei Druckbeanspruchung eines Bauteiles. Bereits vorhandene Querschnittsfehlstellen oder Unvollkommenheiten werden in Kapitel 2: 3. 3 Imperfektes Material beschrieben.

## 3. 2 Imperfekte Lasteinleitung

Bei der imperfekten Lasteinleitung kann in zwei Bereiche unterschieden werden:

- äußere imperfekte Lasteinleitung und
- innere imperfekte Lasteinleitung.

Erstere meint die Art der Lasteinleitung, welche maßgebend vom statischen System und der Modellierung der Lasten in der Berechnung abhängt. Zweitere berücksichtigt die Art und Form des Anschlusses sowie die in den Stäben entstehenden Endmomente und Einspannungen.

### 3. 2. 1 äußere imperfekte Lasteinleitung

Abhängig von der Modellierung des Systemes, und der tatsächlich ausgeführten Lasteinleitung, können sich Änderungen in den Spannungen und Verformungen und damit auch in den beiden Grenzzuständen ULS und SLS ergeben.

In ÖNORM EN 1990 - Grundlagen der Tragwerksplanung [2] sind zur Modellierung und den statischen Modellen unter Punkt 5.1.1 folgende Aussagen getroffen:

*„(1)P Den statischen Berechnungen sind geeignete Tragwerksmodelle mit den maßgebenden Einflussgrößen zugrunde zu legen.“ [2]*

*„(2) Die Tragwerksmodelle sollten mit ausreichender Genauigkeit die betrachtenden Grenzzustände erfassen.“ [2]*

*„(3) Die statischen Modelle müssen den anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Falls erforderlich müssen diese durch Versuche bestätigt werden.“ [2]*

Aus Punkt (1) wird klar ersichtlich, dass die Art der Lasteinleitung im betrachteten Modell richtig modelliert werden muss. Die maßgebenden Einflussgrößen können hierbei sowohl die Größe und Art der Einwirkung sein, aber auch die Modellierung der Lasteinleitung von den verteilenden Flächen zu den tragenden Bauteilen. Die Größe der Einwirkung ist dabei durch die normativen Grundlagen in den jeweiligen Belastungsnormen geregelt. Die Modellierung der Lastverteilung obliegt jedoch meist dem Tragwerksplaner. Die beiden häufigsten und gängigsten Arten sind folgende:

- Einleitung mittels Einzellasten

Hierbei werden die Lasten aus den meist als verteilend und Außenhüllenbildenden flächigen Bauteilen durch sekundäre- oder tertiäre Bauteile in die Haupttragwerke eingeleitet. Dies kann durch eine Haupt- und Nebenträgerkonstruktion, wie sie im konstruktiven Holzbau üblich ist, geschehen. Im Hallenbau werden dazu als Nebenträgersystem oftmals Pfetten, welche orthogonal auf dem Haupttragwerk aufliegen, verwendet. Dabei würde die Lasteinleitung punktweise durch die Pfetten erfolgen.



Abb. 3.11 Aufgelagertes Pfettensystem (links) und eingehängtes Pfettensystem (rechts) als sekundäres Tragsystem [15]

Da dies jedoch bereits im Vorhinein eine genaue Kenntnis der Pfettenlage voraussetzen würde, und sich der Aufwand in der Modellierung erhöht, wird nach eigenem Ermessen oft eine Approximation durch eine Linienlast angenommen.

- Einleitung mittels Linienlasten

Durch eine linienförmige Lasteinleitung (durch eine Gleichlast) wird, wie bereits oben beschrieben, oftmals eine punktförmige Lasteinleitung abgebildet. Eine direkte linienförmige Lasteinleitung kann jedoch auch bei einer Lastverteilung durch flächenförmige Bauteile zutreffen. Diese sind über die gesamte Länge des tragenden Bauteils ohne Unterbrechung aufgelagert und führen so zu einer gleichmäßigen Weitergabe der Last.



Abb. 3.12 Linienförmige Lasteinleitung durch ein aufgelegtes Trapezblech [15]

- Einleitung mittels Flächenlasten

Anders als bei den beiden oben genannten Arten der Lasteinleitung, werden hier die sekundären oder tertiären Lasteinleitungselemente durch flächige Bauteile übernommen. Dies kann durch Brettsperrholzplatten erreicht werden. Im Bezug auf Fachwerke wird jedoch dabei die Lasteinleitung auf die tragenden Bauteile wieder durch eine Linienlast hergestellt.

### 3. 2. 2 innere imperfekte Lasteinleitung

Im Gegensatz zu der in Abschnitt 3. 2. 1 beschriebenen äußeren imperfekten Lasteinleitung handelt es sich bei der inneren imperfekten Lasteinleitung um Effekte, welche im Zuge der Lastweiterleitung innerhalb des Tragwerkes entstehen.

Bei der Lastweiterleitung innerhalb des Tragwerkes kann es dabei zu zwei voneinander abhängigen jedoch in ihren Auswirkungen und Verhalten sehr unterschiedlichen Effekten kommen. Der erste Effekt beschreibt die Steifigkeit des Anschlusses, welcher zur Verbindung der Stäbe verwendet wird. Der zweite soll die zusätzlichen Schnittkräfte, welche durch die Exzentrizität der Anschlussschwerpunkte zueinander entstehen, näher definieren.

Da diese beiden Effekte den Hauptbestandteil der hier vorliegenden Arbeit darstellen, wird darauf in der im nächsten Kapitel vorliegenden Parameterstudie verwiesen.

## 3. 3 Imperfektes Material

*„Materialimperfectionen umfassen alle Abweichungen des verwendeten Materials von dem im idealisierten Modell zugrunde gelegten. Für den Werkstoff Holz bedeutet dies, dass z.B. Schrägfasrigkeit, Drehwuchs u.ä. Imperfectionen darzustellen, die auch durch orthotropes Material schwer oder gar nicht abgebildet werden können.“ [25]*

Diese Imperfectionen werden in den durch die Normung definierten Materialsicherheiten berücksichtigt.

## 3. 4 Montage- und Herstellungseffekte

Diese Effekte entstehen im Zuge der Herstellung und der Montage eines Bauteiles an seinem Bestimmungsort. Auf Grund der vielfältigen Herstellungs- und Montagevorgänge kann unter diesen Effekten eine Sammlung aller beschriebenen Einzeleffekte verstanden werden.

# Modellierung von Fachwerken unter Berücksichtigung von Systemeffekten und Exzentrizitäten

In diesem Kapitel der Arbeit sollen die Grundlagen für die Berechnung und Modellierung von Fachwerken gegeben werden. Dabei werden folgende Inhalte genauer bearbeitet und näher erklärt:

- druckbeanspruchte Bauteile  
Diese treten bei Fachwerken in Form der Obergurte und Pfosten auf. Im Gegensatz zu den Zugbauteilen kommt es hier zusätzlich neben dem Querschnitts- auch zu einem Bauteilversagen, welches bei der geringen Schlankheit von Fachwerkstäben sehr schnell zu einem Anstieg der Ausnutzung und einem daraus folgenden Versagen führen kann.
- Modellierung und Kapazitäten eines Anschlusses  
Durch die Modellierung der Anschlüsse kann es zu einer Schnittkraftumlagerung in den Stäben kommen.
- Anschlussexzentrizitäten  
Nicht nur die Steifigkeiten der Anschlüsse, auch deren geometrischen Eigenschaften sollen in der Modellierung mitbetrachtet werden.

Diese Darstellungen und Veranschaulichungen sollen die Grundlage für die in Kapitel 4 durchgeführte Parameterstudie bilden.

Dabei werden sowohl die notwendigen Berechnungsgrundlagen für Bauteile und Querschnitte, als auch das Verhalten der Anschlüsse und die daraus folgende Modellierung der Anschlüsse und Querschnitte beschrieben.

Es werden, wie in Kapitel 1 definiert, alle Einflüsse auf die Modellierung des Fachwerkes als Systemeffekte bezeichnet.

## Systemeffekte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit wird nach ÖNORM EN 1990 Punkt 1.5.2.13 [2] wie folgt definiert: „Zustände, die im Zusammenhang mit Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens stehen.“ [2]

Für Effekte, welche aus materiellen Inhomogenitäten und aus den Herstellungsprozessen bedingt entstehen, wird in der normativen Sprache der Ausdruck Imperfektionen verwendet.

Die Berücksichtigung der Imperfektionen hat laut ÖNORM EN 1990 Pkt. 1.5.2.11 [2] in den dazugehörigen Lastfällen zu erfolgen. Des Weiteren ist in Punkt 1.5.5.2. die Imperfektion im Bezug auf den Bemessungswert der geometrischen Größe  $\alpha_d$  auf die Sensibilität seines Einflusses auf das Überschreiten eines Grenzzustandes hin zu untersuchen. Gemäß Punkt 3.5. (7) sind Imperfektionen in den maßgebenden Belastungsanordnungen zu berücksichtigen.

Imperfektionen, welche keine negativen Einflüsse auf das System haben, sollten in der Berechnung vernachlässigt werden. Eine Berücksichtigung dieser würde eine Verbesserung der Tragwerkszuverlässigkeit zur Folge haben. Das Auftreten dieser kann jedoch im Normalfall nicht einhundert prozentig bestätigt oder sichergestellt werden.

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit können die Auswirkungen durch die Imperfektionen von folgenden Punkten abhängig sein:

- Art, Gestalt und Beanspruchung des Primärsystemes:  
Abhängig von der Art des Tragwerkes, können Imperfektionen unterschiedlich große Auswirkungen haben. Besonders das statische System eines Tragwerkes und die Art der Lastein-, weiter- und ableitung haben dabei einen großen Einfluss auf die Sensibilität der Tragstruktur gegenüber Imperfektionen.
- Art der Imperfektion:  
Imperfektionen können folgende Erscheinungsformen aufweisen: exzentrische Lagerung, Schrägstellung, Schiefstellung, Vorkrümmung und exzentrische Lasteinleitung.
- Form der Imperfektion:  
Auf Grund ihres unterschiedlichen Auftretens und Entstehens haben Imperfektionen eine sehr große Anzahl an unterschiedlichen Formen, welche sich meist nur mathematisch annähern lassen.

---

## Systemeffekte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird nach ÖNORM EN 1990 Punkt 1.5.2.14 [2] wie folgt definiert: „Zustände, bei deren Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Tragwerks oder eines Bauteils nicht mehr erfüllt sind.“ [2]

Durch das semiprobabilistische Sicherheitskonzept wird die Differenz zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit durch die Sicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite definiert.

Die Gebrauchstauglichkeit kann durch folgende Punkte definiert werden:

- Verformungen des Bauteils oder Bauwerks,
- dynamisches Verhalten des Bauteils oder Bauwerks und
- sichtbare Auswirkungen in Folge Verformungen.

Die Berücksichtigung der Systemeffekte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist dabei sehr von der wahrscheinlichen Verteilung dieser auf den Nutzungszeitraum und die Dauer der Einwirkung abhängig.

Ebenso wie im Grenzzustand der Tragfähigkeit sollten die Unschärfen des Systems durch die Idealisierung, Modellierung und Berechnung auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mitberücksichtigt werden. Systemeffekte mit positiver Wirkung auf das Tragverhalten können dabei mitberücksichtigt werden.

In ÖNORM EN 1995-1-1 [4] ist der Grundsatz der Bemessung nach dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit in Punkt 2.2.3 wie folgt definiert:

*„Die Verformung einer Konstruktion infolge der Beanspruchungen (wie Normal- und Querkraft, Biegemomente und der Nachgiebigkeit der Verbindungen) und der Feuchte muss in angemessenen Grenzen bleiben, wobei mögliche Schäden an nachgeordneten Bauteilen, Decken, Fußböden, Trennwänden und Oberflächen, wie auch die Anforderungen hinsichtlich der Benutzbarkeit und des Erscheinungsbildes zu berücksichtigen sind.“ [4]*

Daraus folgt, dass für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht nur die Verformungen aus den äußeren Einwirkungen zu betrachten sind, sondern in der Berechnung auch die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel und der Knotenpunkte zu berücksichtigen ist.

## Systemeffekte aus Knotenpunkten

Als Knotenpunkt wird jene Stelle bezeichnet, an welcher zwei oder mehr Einzelbauteile miteinander zur Gesamtheit eines Tragwerkes verbunden werden. Dies kann bei Biegeträgern im Zuge einer Stoßstelle ausgebildet werden, bei Fachwerken - diese können ebenfalls gestoßen werden - ist hier der Verbindungspunkt der einzelnen Druck- und Zugstreben mit den Ober- und Untergurten gemeint.

In der statischen Berechnung wird meist von einem idealisierten Fachwerk ausgegangen. Hierbei werden die Knotenpunkte durch ein Voll- oder Halbgelenk approximiert. Dabei wird jedoch die Steifigkeit des Anschlusses und das nicht lineare Verhalten der Verbindungsmittel nicht in der Berechnung mitberücksichtigt.

In ÖNORM EN 1995-1-1 [4] sind unter Punkt 5.1 folgende Angaben zur Berücksichtigung der Systemeffekte in den Knotenpunkten gegeben:

vgl. [4]

*„(4)P Das Rechenmodell zur Bestimmung der inneren Kräfte in der Konstruktion oder in Teilen derselben muss Einflüsse aus der Nachgiebigkeit von Verbindungen berücksichtigen.“*

*„(5) Im Allgemeinen sollte der Einfluss der Nachgiebigkeit von Verbindungen durch ihre Steifigkeit (beispielsweise der Verdreh- oder Verschiebungssteifigkeit) oder durch festgelegte Verschiebungsgrößen in Abhängigkeit von der Lasthöhe in der Verbindung berücksichtigt werden.“*

Die Kapazitäten an den Knotenpunkten kann in der Modellierung zu einer großen Änderung des Gesamtsystems führen. Durch die Berücksichtigung dieser wird die Steifigkeit beeinflusst, welches einerseits zu einer Änderung der Schnittkräfte und andererseits zu einem Einfluss in der Verformung führen kann.



# 1 Druckbeanspruchte Bauteile aus Holz

Fachwerke nutzen im Tragverhalten ihre aufgelöste Form, um die meist als Biegung vorhandene Belastung in ein Kräftepaar zu zerlegen und so die Lastabtragung über Druck- und Zugkräfte durchzuführen.

vgl. [30] , [40] und [29]

Die ersten Untersuchungen zur Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Bauteilen gehen auf Euler (1707 - 1783) zurück. Dieser definierte mit der Euler-Hyperbel die kritische Last, welche auf einen Druckstab einwirken kann, um sich gerade noch in einem stabilen Zustand zu befinden. Bei Überschreitung dieser Belastung wird der indifferente Zustand erreicht, welcher durch eine Vielzahl an Verformungszuständen gekennzeichnet ist. Die Euler-Hyperbel ist jedoch nur bei langen Stäben zutreffend. Bei kurzen und gedrungenen Stäben wird die Querschnittstragfähigkeit maßgebend, bevor es zum Erreichen eines instabilen Zustandes kommt.

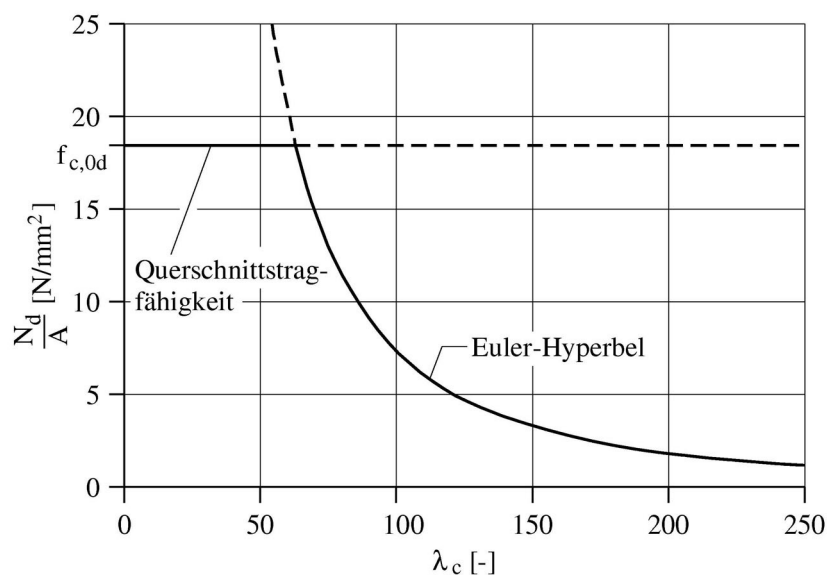


Abb. 1.1 Traglast eines quasi-perfekten Druckstabes [29]

Die Traglast eines knickgefährdeten Vollquerschnittes kann entweder analytisch unter Ansatz einer kubischen Gleichung für die Ausweichfigur oder mit Hilfe des in ÖNORM EN 1995-1 [4] definierten  $k_c$ -Verfahrens berechnet werden. Im Holzbau wird vorallem das  $k_c$ -Verfahren verwendet, da dies für die oft verwendeten Rechteckquerschnitte in ausreichender Genauigkeit vorliegt und so eine einfache Anwendung ermöglicht wird.

## 1. 1 Berechnung nach Theorie I. oder II. Ordnung

vgl. [30]

Für den Nachweis von Knickversagen innerhalb eines Bauteiles stehen zwei Rechenverfahren zur Verfügung. Die Ermittlung der Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung einerseits, bei welcher die Schnittkräfte am verformten System ermittelt werden, andererseits das Ersatzstabverfahren. Bei diesem werden die Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung, also am unverformten System berechnet und anschließend durch den Knickbeiwert  $k_c$  erhöht. Durch diese Erhöhung werden die auftretenden Verformungen mitberücksichtigt und es wird eine wirtschaftliche Lösung mit einem vertretbaren Berechnungsaufwand geliefert.

Um festzustellen, ob die Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung ermittelt werden können, oder eines der beiden anderen Verfahren angewendet werden muss, gibt es nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] folgende Ungleichung zu berücksichtigen:

$$l_{ef} \cdot \sqrt{\frac{N_d \cdot \gamma_M}{E_{mean} \cdot I}} \leq 1$$

$l_{ef}$	Ersatzstablänge (Knicklänge) des Stabes
$E_{mean}$	Mittelwert des E-Moduls
$I$	Flächenmoment zweiten Grades
$N_d$	Bemessungswert der Druckkraft
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für Holz- und Holzwerkstoffe

Aus obiger Gleichung kann der sogenannte Vergrößerungs - oder Dischingerfaktor (im Stahlbau) hergeleitet werden. Dieser in einer Ungleichung formuliert, zieht bereits die 10%ige Erhöhung der Schnittkräfte mit ein.

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{crit(t,d)}}} \leq 1, 1$$

Die hier verwendete ideale Knicklast  $N_{crit,d}$  ist die von Euler definierte kritische Knicklast eines Stabes, welche sich auf der Kapitel 3: Abb. 1.1 gezeigten Euler-Kurve befindet.

$$N_{crit(t,d)} = \frac{\pi \cdot E_{mean} \cdot I}{l_{ef}^2 \cdot \gamma_M}$$

## 1.2 $k_c$ -Verfahren nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4]

Das  $k_c$ -Verfahren ist in ÖNORM EN 1995-1-1 [4] unter Punkt 6.3.2. beschrieben. Es stellt das Ersatzstabverfahren für Stäbe unter Druck- und Biegebeanspruchung dar und berücksichtigt in seiner Form bereits die Vorverformungen und Anfangskrümmungen eines Stabes.

Dieses Modell geht davon aus, dass die Traglast eines druckbelasteten Bauteiles erreicht ist, wenn folgende Gleichung erfüllt ist: [29]

$$\frac{N_{Ed}}{k_c \cdot A \cdot f_{c,0,d}} = 1$$

$N_{Ed}$

Bemessungsnormalkraft im Stab

$A$

Querschnittsfläche des Stabes

$f_{c,0,d}$

Materialwiderstand

$k_c$

Knickbeiwert des Stabes dieser folgt aus:

$$k_c = \min \left\{ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \right\}$$

$$\lambda_c = \sqrt{12} \cdot \frac{l_{ef}}{h}$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda_c}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \beta_c \cdot \langle \lambda_{rel} - 0,3 \rangle + \lambda_{rel}^2 \right]$$

In dieser Berechnung beschreibt der Beiwert  $\beta_c$  die Imperfektionsannahme des Stabes. Diese sind nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] wie folgt geregelt:

$$\beta_c = 0,20 \text{ für Vollholz}$$

$$\beta_c = 0,10 \text{ für Brett- und Furnierschichtholz}$$

Dieser Beiwert soll die in ÖNORM EN 1995-1-1 [4] unter Punkt 10.2(1) definierten Grenzwerte der Ausmittigkeit in der Berechnung berücksichtigen.

*„Die Ausmittigkeit, die in der Mitte zwischen den Unterstützungen gemessen wird, sollte bei Druckstäben und kippgefährdeten Biegestäben sowie in Rahmenteilen auf 1/400 der Länge bei Bauteile aus Brettschichtholz oder Furnierschichtholz und auf 1/300 der Länge bei Bauteilen aus tragendem Vollholz begrenzt werden. Die Krümmungsbeschränkungen in den meisten Sortierverfahren sind für die Auswahl des Baustoffs für diese Bauteile nicht ausreichend, so dass daher ihrer Geradheit besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.“ [4]*

Imperfektionsbeiwert für Vollholz:

Wie oben beschrieben, wird für Vollholz der Imperfektionsbeiwert auf 1/300 begrenzt. Dieser stimmt, wie Abb. 1.2 zeigt mit der analytischen und numerischen Berechnung des Bauteilversagens eines Druckstabes aus Vollholz einigermaßen genau überein.

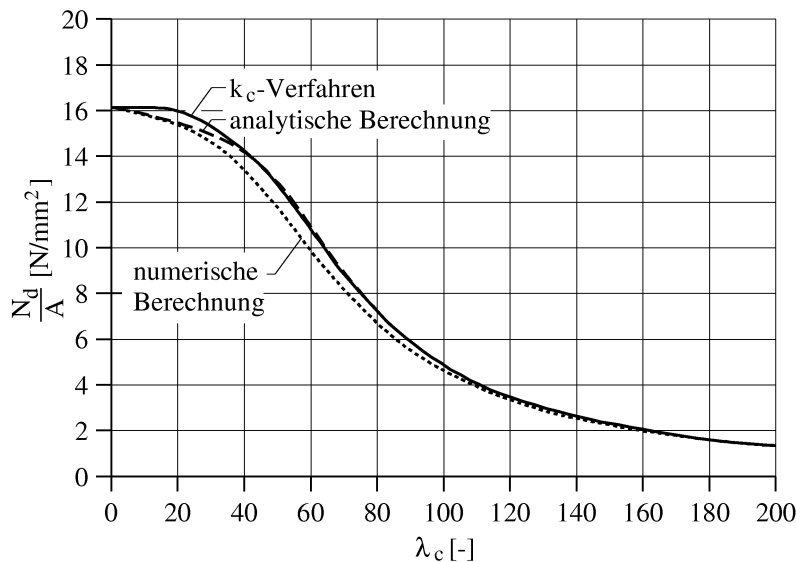


Abb. 1.2 Traglast eines Druckstabes aus Vollholz (C24) [29]

Die geringfügigen Unterschied in diesen drei Verfahren sind auf die der Berechnungen zu Grunde gelegten Annahmen zurückzuführen. Bei einer numerischen Berechnung kommt es zuerst zu einem Bauteilversagen, der Querschnitt versagt zwar nicht, jedoch gelangt er in einen indifferenten Gleichgewichtszustand, bevor ein Querschnittsversagen eintritt. In der analytischen Berechnung wird kein indifferenten Gleichgewichtszustand erreicht, da, bevor der Bauteil die Möglichkeit zu diesem hätte, ein Versagen der Zugzone durch Biegebeanspruchung den Querschnitt versagen lässt.

Imperfektionsbeiwert für Brett- und Furnierschichtholz

Für Brett- und Furnierschichtholzbauteile wurden Imperfektionen im Ausmaß von 1/500 durch den Beiwert  $\beta_c$  berücksichtigt. Dieser geringe Faktor lässt sich auf die genauere Herstellung und die Streuung von Fehlstellen bei schichtförmigen Bauteilen zurückführen. Aus den Vergleichen von Berechnungen mittels  $k_c$ -Verfahren und den numerischen und analytischen Lösungen geht jedoch hervor, dass eine viel größere Schlankheitsabhängigkeit auftritt als bei Vollholzbauteilen.

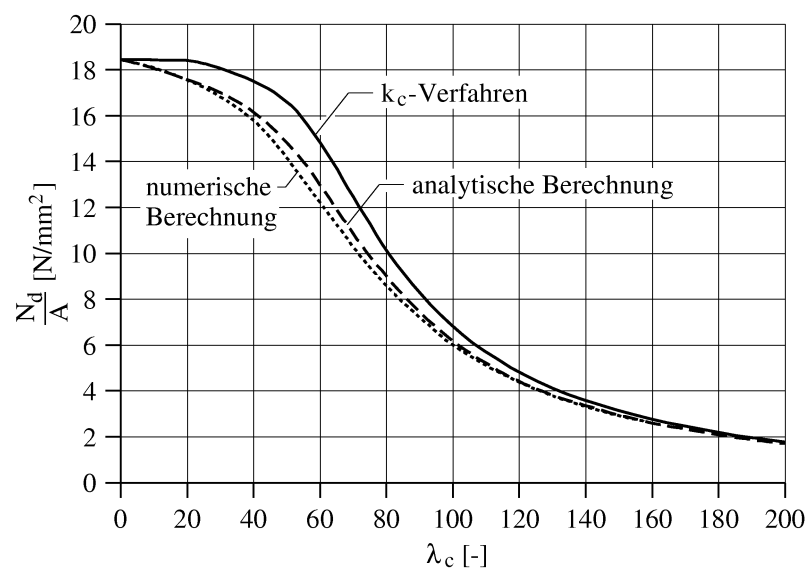


Abb. 1.3 Traglast eines Druckstabes aus Brettschichtholz (GL24h) [29]

Das Versagen des Druckstabes tritt hier bei der numerischen und der analytischen Lösung durch ein Biegezugversagen des Bauteils auf, und nicht wie im  $k_c$ -Verfahren definiert durch ein Bauteilversagen. Dabei sei zu erwähnen, dass ein Bauteilversagen zu einem indifferenten Gleichgewichtszustand führt, welcher nachwievor eine gewisse Laststeigerung ermöglicht, während eine Biegezugüberbeanspruchung zu einem spröden und damit schlagartigem Versagen des Bauteils führt.

## 1.3 Krümmung eines Stabes

Weist ein Stab unter Normalkraftbeanspruchung eine Krümmung der Stabachse auf, so kommt es zu einer Momentenbeanspruchung durch die Exzentrizität oder den Zuwachs dieser.

Die Krümmung des Stabes kann in zwei Arten unterschieden werden:

- Vorkrümmung des Stabes
- Krümmung infolge Verformung

Beide Arten der Krümmung sind normativ geregelt und sollen in der Berechnung eines Tragwerkes mitberücksichtigt werden. Die Vorkrümmungen eines Stabes sind in den Normen zu den einzelnen Werkstoffen geregelt. Krümmungen infolge Verformung werden durch die Berechnung nach Theorie II Ordnung berücksichtigt.

### 1.3.1 Vorkrümmung eines Stabes

Vorkrümmungen beschreiben Imperfektionen des Stabes, welche aus der Herstellung des Querschnittes und der Montage entstehen. Die Krümmung der Stabachse liegt auch schon im unbelasteten Zustand vor und hat einen angenommenen sinus- oder parabelförmigen und damit gleichmäßigen Verlauf über die gesamte Länge des Stabes.

#### Vorkrümmungen im Holzbau nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4]

Nach Punkt 5.4.4 der ÖNORM EN 1995-1-1 [4] sollte für die Ausmitte der Vorkrümmung eines Stabes mindestens der Wert

$$e = 0,0025 \cdot l = l/400 \text{ für Brettschicht und Furnierschichtholz} \quad [3.1]$$

$$e = 0,005 \cdot l = l/200 \text{ für Vollholz} \quad [3.2]$$

angesetzt werden.

#### Vorkrümmungen im Holzbau nach DIN 1052 [6]

Hier gelten die gleichen normativen Angaben wie für Berechnungen nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] und B 1995-1-1 [5] jedoch wird hier keine Unterscheidung zwischen Brett-Furnierschicht- und Vollholz getroffen und lediglich der Ansatz nach Gl. [3.1] verfolgt.

#### Vorkrümmungen im Stahlbau nach ÖNORM EN 1993-1 [27]

Im Stahlbau wird die Berechnung nach Theorie II Ordnung meist mit Hilfe der Knickspannungslinien durchgeführt. Da diese eine Kategorisierung der Querschnitte zu Grunde legt, wird auch bei den Vorkrümmungen eine Unterscheidung zwischen diesen verwendet. Zusätzlich zu den Querschnitten wird auch noch die Art der Berechnung bei

der Größe der Vorkrümmung miteinbezogen.

Knicklinie	elastische Berechnung	plastische Berechnung
$a_0$	$l/350$	$l/300$
a	$l/300$	$l/250$
b	$l/250$	$l/200$
c	$l/200$	$l/150$
d	$l/150$	$l/100$

Tab. 1.1 Bemessungswert der Vorkrümmung nach ÖNORM EN 1993-1-1 [27]

### 1. 3. 2 Krümmung infolge Verformung

Unter der Einwirkung von Biegemomenten kommt es zur Krümmung eines Stabes. In Folge dieser Krümmung kommt es bei Einwirkung von Normalkräften zu einer Erhöhung des Biegemomentes, welches wiederum zu einer Erhöhung der Krümmung führt. Dieser Zustand wird durch die Berechnung nach Theorie II Ordnung und dem in dieser Berechnungsmethodik enthaltenen iterativen Näherungsmethoden beschrieben.

### 1. 3. 3 Krümmungen in der statischen Berechnung und den Nachweisen

Wie in Abschnitt 1. 1 und Abschnitt 1. 2 beschrieben wurde, wird ein Nachweis der druckbeanspruchten Bauteile am Ersatzstab geführt. Dies kann auch noch, wie im Stahlbau möglich, durch das Aufbringen von Ersatzlasten erfolgen. Daraus lässt sich schließen, dass ein Aufbringen der Vorkrümmung an jedem einzelnen Stab eines Fachwerkes eine sehr große Erhöhung der inneren Schnittkräfte zur Folge haben würde, welche jedoch durch die Anschlüsse und deren Nachgiebigkeit abgebaut werden und so wiederum nur einen sehr marginalen Einfluss haben.

Ein sinnvollerer Ansatz, um die Vorkrümmung im System zu berücksichtigen, stellt hier die Normierung der ersten Eigenform dar, ähnlich der Normierung im Erdbebeningenieurwesen. Die größte Amplitude der Eigenform aller druckbeanspruchten Bauteile soll auf „1“ normiert werden, um eine Skalierung der Vorkrümmung auf alle anderen Stäbe anpassen zu können.

## 1.4 Schiefstellung eines Stabes

Schiefstellungen stellen eine außerplanmäßige Verschiebung der Auflagerpunkte einer Konstruktion dar. Dies wird hauptsächlich bei Rahmen angewendet und soll die nicht lotrechte Aufstellung von Stützen unter Normalkraft und Biegebeanspruchung wiedergeben, welche nach Theorie II. Ordnung zu einer Erhöhung der im System eingebrachten Schnittkräfte führt.

Bei Fachwerken ist diese Art der geometrischen Imperfektion eher unwahrscheinlich, da diese Effekte folgenden Forderungen unterliegen:

- Stablänge  $> 5,00$  m (Ausnahmen: Obergurte und Druckstreben)
- rahmenartige Bauwerke mit momententragfähigen Eckausbildungen, welche zu einer Momentenbelastung von vertikalen Bauteilen führt

Da diese beiden Punkte bei Fachwerken meist nicht erfüllt sind, kann in der Modellierung von Fachwerken auf diese Systemeffekte verzichtet werden. Bei Fachwerken, bei denen die Umhüllende als Rahmen ausgeführt wird, sind die Schiefstellungen jedoch in der Berechnung mitzubetrachten. Da diese Art der Fachwerke im Holzbau auf Grund seiner eher weniger tragfähigen Anschlüsse meist nicht sinnvoll ist, wird dies nur im Stahl- und Betonbau verwendet.

Des Weiteren ist auf Grund der Fertigung eines Fachwerkes nicht von einer Schiefstellung der Stäbe auszugehen, da sie in den Knotenpunkten durch Fügeverbindungen miteinander verbunden werden. Eine Schiefstellung des Stabes würde bedeuten, dass sich die gefügten Stäbe nicht in ihren vordefinierten Anschlusspunkten treffen würden, was wiederum eine geometrische Unmöglichkeit darstellt. Ein Effekt der jedoch trotzdem auftreten kann ist, dass diese Ungenauigkeiten in der Fertigung durch Einwirkung „äußerer Gewalt“ im Zuge der Montage behoben werden und daher Ersatzspannungen und Vorverformungen in das System eingebracht werden.

Meist ist es jedoch nicht möglich, diese Effekte der Herstellung und Montage auf Grund ihrer großen Streuung und der Abhängigkeit anderer Faktoren in der Berechnung zu berücksichtigen.



## 1.5 Lagerungsbedingungen eines Stabes

Bei druckbeanspruchten Stäben tritt sehr oft ein Knickversagen dieser auf. Als Knickversagen wird dabei ein seitliches Ausweichen des Stabes infolge der Überschreitung der zulässigen Normalkraft bezeichnet. Dieses Ausweichen wird oft von den Lagerungsbedingungen des Stabes definiert. Maßgebend für das Knickverhalten eines Stabes ist dabei die Knicklänge des Stabes, welche sich aus der geometrischen Länge des Stabes und dem Knickfaktor ergibt.

Die geometrische Länge beschreibt dabei die tatsächlich abgewinkelte Länge des Stabes, also meist den Abstand zwischen den Auflagerpunkten eines Stabes. Oftmals ist die Knicklänge nicht für beide möglichen Betrachtungsrichtungen des Stabes identisch, da Hilfskonstruktionen zur Verringerung der Knicklänge in die Richtung der schwächeren Achse des Stabes angebracht werden, um einerseits eine Materialeinsparung zu ermöglichen und andererseits eine Unterkonstruktion für Fassadenkonstruktionen zu schaffen.



Abb. 1.4 Stützen als Hallentragwerk mit Hilfskonstruktionen an der Außenseite zur Verringerung der Knicklänge und als Unterkonstruktion für die Fassade [21]

Für einfache Fälle sind die Knickfaktoren durch die vier bekannten Eulerfälle beschrieben.

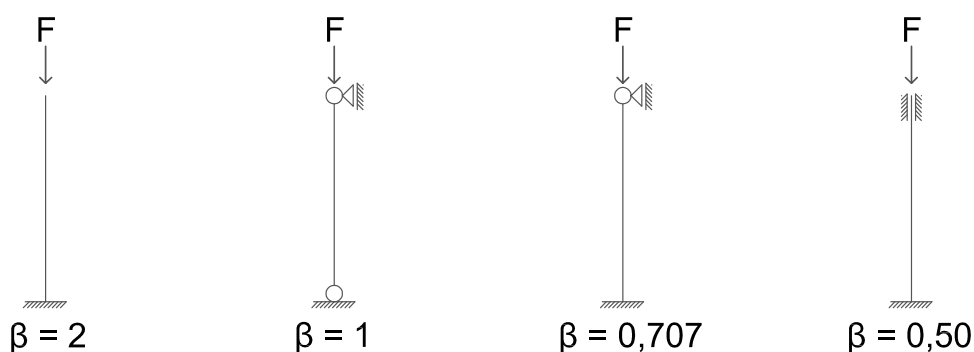


Abb. 1.5 Eulerfälle für Knickstäbe

Diese Fälle gelten für reine Knickstäbe, welche sich nicht in einem Verband von miteinander wirkenden Stäben, wie etwa Rahmen oder Stabsystemen befinden. Bei Rahmen muss dabei der Einfluss der benachbarten Stäbe mitberücksichtigt werden.

Bei Fachwerken werden sowohl das Stabende als auch der Stabanfang durch ein Gelenk gebildet. Wird die Berechnung des Fachwerkes durch ein ideelles Modell abgebildet, so kann für die Stäbe die Knickfigur mit einem Knickfaktor  $\beta=1$  verwendet werden. Ebenso bei Fachwerken, welche durch ein reelles Modell abgebildet werden, ist diese Annahme für die Pfosten und Streben des Fachwerkes zulässig. Diese Annahme ist allgemein auf der sicheren Seite liegend, da die Knickfigur des realen Fachwerkes überschätzt wird. Um jedoch eine wirtschaftliche und ökologische Bemessung zu gewährleisten, sollten diese Faktoren in der Querschnittsbemessung nicht unberücksichtigt bleiben.

Werden Anschlüsse in der Berechnung mitberücksichtigt, so befinden sich an den Enden der Stäbe Federn, welche Einfluss auf die Knickgeometrie des Stabes haben. Dabei handelt es sich bei Fachwerkstäben um beidseitig gelagerte Stabelemente, welche dadurch sowohl von den Eigenschaften der Ober- und Untergurte als auch der anderen, an diesen befindlichen Stäben abhängen. Deswegen kann die Knickfigur eines Stabes innerhalb des Fachwerkes nur durch Berücksichtigung des gesamten Systemes genau ermittelt werden.

## 2 Modellierung und Kapazität eines Holzbauanschlusses

Durch Anschlüsse im Holzbau ist es möglich, ein duktileres Verhalten des gesamten Bauteiles hervorzurufen. Dabei wird eine Umverteilung der Kräfte in den Anschlüssen durch deren Verschiebungs- und Rotationskapazität herbeigeführt. Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] Punkt 5.1 (3) ff muss diese Fähigkeit der Anschlüsse in der Berechnung berücksichtigt werden.

*„(3) Bei Konstruktionen, die in der Lage sind, die inneren Kräfte über Verbindungen entsprechender Duktilität umzuverteilen, dürfen plastisch-elastische Methoden zur Berechnung der inneren Kräfte in den Bauteilen verwendet werden.“ [4]*

*„Nationale Erläuterung: Wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Umlagerung der Schnittkräfte über Verbindungen entsprechender Duktilität, d.h. mit einem zumindest begrenzten plastischen Verformungsvermögen genutzt, so ist die für die teil-plastische oder (in seltenen Fällen) voll-plastische Schnittgrößenumlagerung erforderliche plastische Verformungskapazität (Verschiebe- bzw. Rotationskapazität) der Verbindungen von Tragwerkselementen nachzuweisen und konstruktiv sicherzustellen. Die dazu erforderlichen Traglastberechnungen erfolgen auf Basis vereinfachter bilinearer ideal-elastisch-plastischer Last-Verformungscharakteristiken der Einzelverbindungsmittel mit prinzipiell begrenztem plastischem Plateau (gemäß Bild NA.1).“ [5]*

Daraus folgt, dass es erforderlich ist, den Anschlusstyp und dessen Charakteristika im Zuge der Querschnitts- und Bauteilbemessung zu kennen, diese im statischen Modell mit zu berücksichtigen und die daraus folgenden Auswirkungen auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen. In ÖNORM EN 1995-1-1 [4] ist unter Punkt 5.1 (5) definiert, dass dies in Abhängigkeit der Lasthöhe im Anschlussquerschnitt zu erfolgen hat. Diese Forderung führt unweigerlich zu einer höherlinearen Arbeitslinie des Anschlusses.

## 2.1 Definition der Anschlussgeometrie

Um einen Anschluss zu definieren und näher zu beschreiben, ist es notwendig, eine eindeutige Nomenklatur zu verwenden. Dazu werden nachfolgend die häufigst verwendeten Begriffe näher beschrieben, um Klarheit über die Aussagen zu ermöglichen.

- Stabachse: Achse entlang des Schwerpunktes im Stab;
- angeschlossener Stab: Stab, an welchen der anzuschließende Stab angeschlossen wird;
- anzuschließender Stab: Stab, welcher mit dem angeschlossenen Stab verbunden wird, und von diesem direkt Schnittkräfte erhält;
- Anschlussknoten: Alle, zum Verbinden des anzuschließenden an den angeschlossenen Stab zur Kraftübertragung notwendigen Elemente;
- Anschlusspunkt: Punkt in der Geometrie des Anschlusses, in welchem die Schnittkräfte in den Anschluss eingeleitet werden. Dieser liegt meist im Schwerpunkt der Verbindung;
- Drehpunkt: Punkt auf einer oder mehreren Stabachsen, in welchem die Verdrehungen des Anschlussknotens Null sind;
- Schwerpunkt: Summe der Einzelschwerpunkte einer Verbindung;
- Lastangriffspunkt: Bereich, in welchem die Last in einem Anschluss ein- bzw. ausgeleitet wird und somit die Lastübertragung auf den Holzquerschnitt angenommen werden kann. Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit angenommen, dass dieser Punkt bei Anschlüssen mit Stabdübeln gleich dem Schwerpunkt der gesamten Verbindung ist;
- imperfekte Lasteinleitung: Diese tritt auf, wenn der Lastangriffspunkt eines Anschlusses eine Verschiebung zur Stabachse des anzuschließenden Holzquerschnittes aufweist. Dies wird auch nachfolgend als „Ausmittigkeit“ bezeichnet.

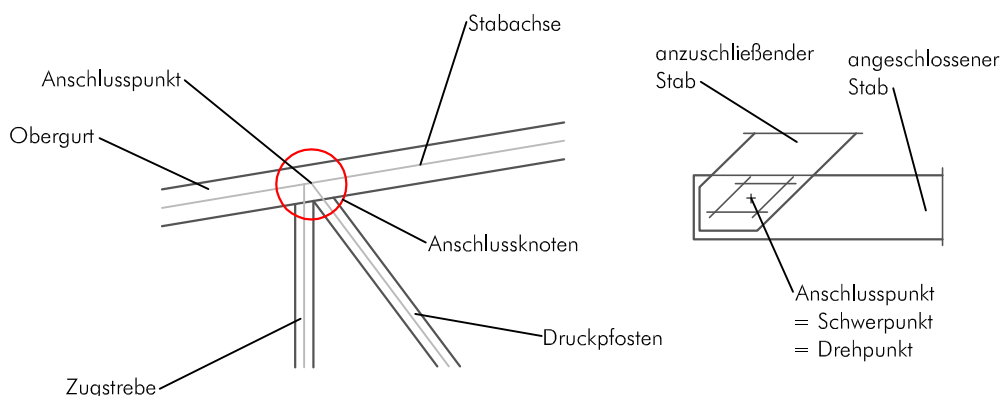


Abb. 2.1 Definition der Anschlussgeometrie

## 2.2 Rotationskapazität

Mit Hilfe der Rotationskapazität eines Anschlusses ist es möglich, dessen Nachgiebigkeit in Folge der auf ihn einwirkenden Biegebelastung zu beschreiben. Dazu ist es notwendig, die einzelnen Verschiebungsmoduli aus welchen sich der Anschluss zusammensetzt, zu kennen und diese auf den Drehpunkt, um welchen der Anschluss rotiert, zu beziehen.

Solange in einem Stab und dessen Anschluss elastisches Verhalten vorliegt, ist die Winkeländerung  $\Delta\varphi$  proportional zur Änderung des Momentes  $M$ . Dieser Proportionalitätsfaktor wird im Holzbau mit der Drehfeder  $K_\varphi$  bezeichnet und ist wie folgt definiert:

$$K_\varphi = \frac{M}{\Delta\varphi}$$

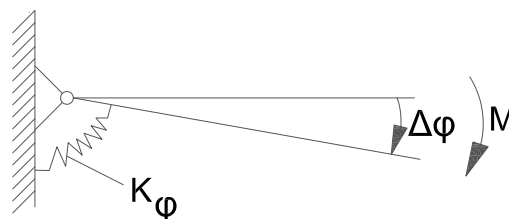


Abb. 2.2 Schema eines Drehfederanschlusses unter Momentenbeanspruchung [30]

Die Rotationskapazität lässt sich aus der Summe des Quadrates der einzelnen Verbindungsmittelabstände um den Drehpunkt ermitteln. Die Summe der Drehpunkte ist von der Geometrie des Anschlusses und der verwendeten einzelnen Verbindungsmittel abhängig.

Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] und B 1995-1-1 [5] wird die Rotationskapazität eines Anschlusses in Punkt 5.1 (4) wie folgt ermittelt.

Die Drehsteifigkeit einer elastisch-nachgiebigen Rahmeneckverbindung  $K_\varphi$  (in  $\text{N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$ ) bei reiner Momentenbeanspruchung ergibt sich wie folgt:

$$K_\varphi = \sum_i r_i^2 \cdot K \quad (\text{NA.1})$$

Es bedeutet:

$r_i$  polarer Abstand der Einzelverbindungsmittel vom Drehpunkt, in mm

$K$  mittlerer elastischer Anfangsverschiebungsmodul, in  $\text{N}/\text{mm}$

Gleichung (NA.1) gilt für den Fall gleicher Verschiebungsmoduln aller Einzelverbindungsmittel der Rahmeneckverbindung. Die Abhängigkeit der Verschiebungsmoduln von den abweichenden Orientierungen zwischen Faserrichtung und Beanspruchungsrichtung ist gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Abb. 2.3 Auszug aus ÖNORM EN 1995-1-1 [4] Formel NA.1

Die in Kapitel 3: Abb. 2.3 definierte Formel stellt den Allgemeinfall für eine Rahmenecke dar. Andere Anschlüsse wie Dübelkreise und zweiteilige Binderstützen sind jedoch auf Grund ihrer Geometrie und der Lasteinleitungszonen unterschiedlich definiert:

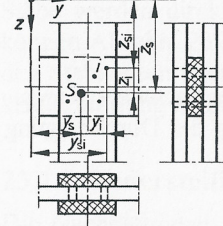
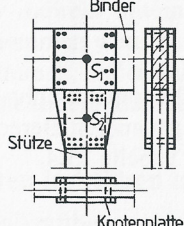
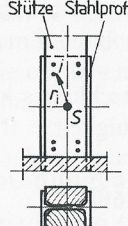
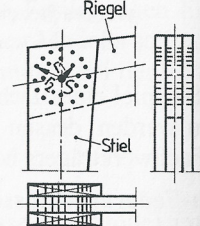
Anschluss, allgemein	Binder-Stütze	Stütze-Fundament	Rahmenecke (Dübelkreis)
			
$K_{\varphi} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot r_i^2$ $r_i^2 = y_i^2 + z_i^2$ <p>Schwerpunkt S des Anschlusses:</p> $y_s = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot y_{si}}{\sum_{i=1}^n K_i}$ $z_s = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot z_{si}}{\sum_{i=1}^n K_i}$	$K_{\varphi} = \frac{K_{\varphi 1} \cdot K_{\varphi 2}}{K_{\varphi 1} + K_{\varphi 2}}$ $K_{\varphi 1,2} = K \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2$ $r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)$ <p><math>K_{\varphi 1}</math> Drehfederkonstante Binder-Knotenplatte</p> <p><math>K_{\varphi 2}</math> Drehfederkonstante Stütze-Knotenplatte</p> <p>Voraussetzungen: <math>K = \text{konstant}</math>, <math>y_s = 0</math>, <math>z_s = 0</math>, symmetrische Anordnung der Verbindungsmittel, beidseitig gleiche Ausführung</p>	$K_{\varphi} = K \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2$ $r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2)$	<p>ein Dübelkreis:</p> $K_{\varphi 1} = K \cdot n_1 \cdot r_1^2$ <p>zwei Dübelkreise:</p> $K_{\varphi 2} = K \cdot (n_1 \cdot r_1^2 + n_2 \cdot r_2^2)$ <p><math>n_{1,2}</math> Anzahl der Dübel im jeweiligen Dübelkreis</p>

Abb. 2.4 Drehfederkonstanten für unterschiedliche Anschlussstypen [30]

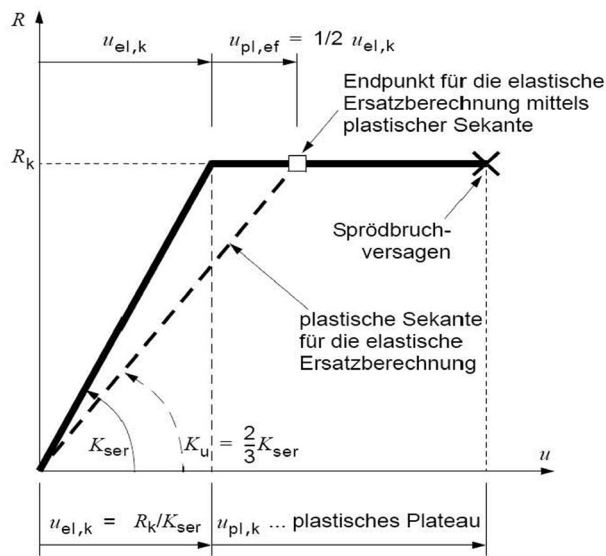


Abb. 2.5 Auszug aus ÖNORM B 1995-1-1 [5] Punkt 5.1 (4)

Um die Rotationskapazität eines Anschlusses in der statischen Berechnung berücksichtigen zu können, ist die Abbildung des Anschlusses im statischen System erforderlich. Da es sich hierbei um eine Rotations- und keine Verschiebungskapazität handelt, wird dies durch das Anbringen einer Drehfeder verwirklicht. Diese Änderung hat aber auch zur Folge, dass meist das statische System, welches im Zuge der Querschnittsdimensionierung erstellt wurde, abzuändern ist, da nicht von Beginn der Berechnung die Art und Charakteristik der Anschlüsse bekannt ist. Daraus entsteht nun ein iteratives Modell, welches jeweils den gegebenen Geometrien und Beanspruchungen im Verlauf der Bemessung anzupassen ist.

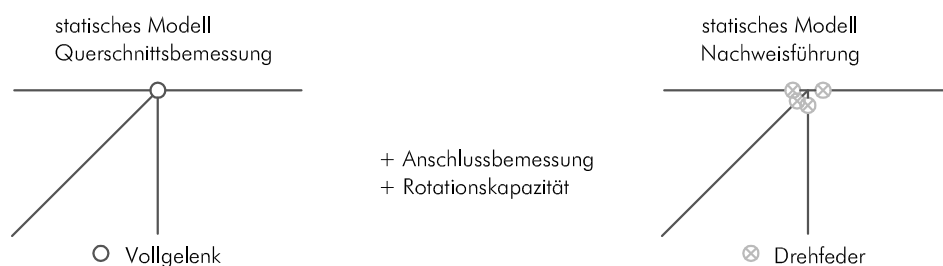


Abb. 2.6 Änderung des statischen Systems durch Einbindung der Rotationskapazität

Durch die Berücksichtigung der Rotationskapazität des Anschlusses kommt es einerseits zu einer Erhöhung der Schnittkräfte in einzelnen Stäben des Fachwerkes, zusätzlich zu diesen treten jedoch auch noch Schnittkräfte in den Stäben auf, welche im ersten Schritt der Berechnung nicht vorhanden waren. Auf Grund seiner Anschlusssteifigkeit wird aus einem reinen Druckstab ein Druckstab mit zusätzlichem Biegemoment. Diese Erhöhung der Schnittkräfte hat sowohl Auswirkungen auf die Tragfähigkeit als auch auf die Gebrauchstauglichkeit.

Bei der Modellierung des Anschlusses im statischen System ist die Berücksichtigung der Verbindung maßgebend. Hierbei können im Holzbau entweder direkte Verbindungen oder indirekte Verbindungen vorhanden sein.

vgl. [30]

- direkte Verbindung
  - Versätze - Lasteinleitung über Druckkontakt
  - symmetrische Anschlüsse mit Stabdübeln, Passbolzen, Nägeln, Schrauben und Dübel besonderer Bauart
- indirekte Verbindung
  - symmetrische Verbindungen über Verbindungselemente z.B.: Nagelplatten sowie Knotenplatten, Knotenbleche und Laschen mit mechanischen Verbindungsmitteln

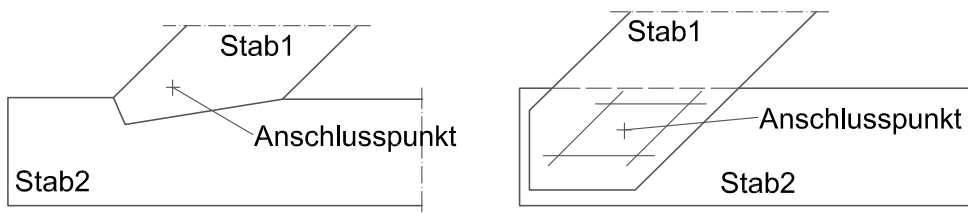


Abb. 2.7 Beispiele für direkte Verbindungen [30]

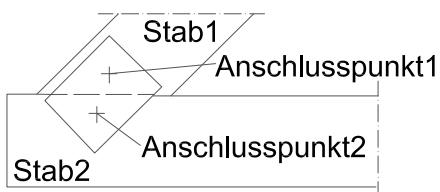


Abb. 2.8 Beispiel für indirekte Verbindung [30]; Stabdübelanschluss in Fachwerken [15]

Bei der Anschlussmodellierung sind zusätzlich zur Art der Verbindung auch noch folgende Angaben zum Anschluss und dessen Geometrie zu berücksichtigen vgl. [30]

- Anschlusspunkt:
  - direkte Verbindung
    - Lasteinleitungspunkt ist der Schwerpunkt der Anschlussmittel;
  - indirekte Verbindung:
    - Lasteinleitungspunkt ist der Schwerpunkt der Anschlussmittel, die zum Anschluss an ein Verbindungsmittel gehören;
- ausmittiger Anschluss
  - liegt vor, wenn der Anschlusspunkt eines Stabes nicht auf seiner Stabachse liegt;
  - der Anschlusspunkt darf im statischen Modell durch einen fiktiven Stab starr mit der zugehörigen Stabachse verbunden werden.



Um die Auswirkungen der Rotationskapazität eines Anschlusses zu veranschaulichen, nachfolgend ein Beispiel. Da es bei Stäben von Fachwerken zu einer Beeinflussung durch die benachbarten Stäbe kommt, wird hier ein Stab aus einem fiktiven Fachwerk herausgeschnitten.

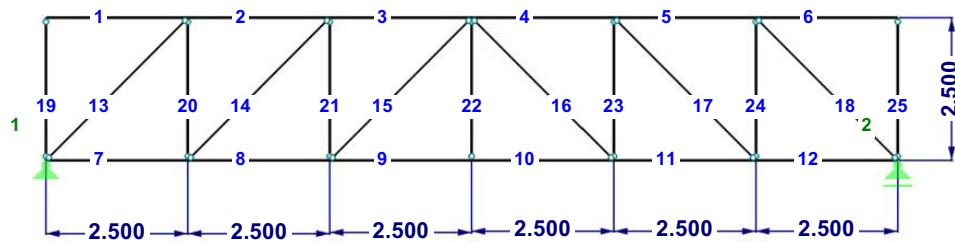


Abb. 2.9 Statisches System des betrachteten Fachwerkes

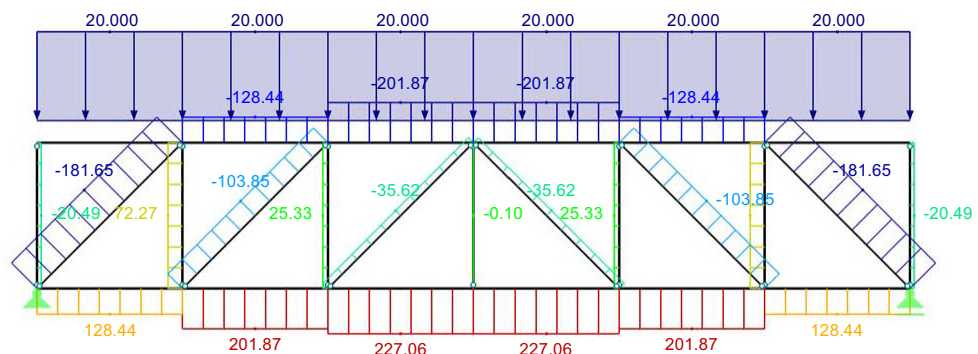


Abb. 2.10 Schnittkräfte des betrachteten Fachwerkes

Stab Nummer 14 stellt bei diesem Fachwerk einen fallenden Druckstab dar, welcher in der ersten Modellierung zur Vorbemessung planmäßig nur mit Druckkraft beansprucht wird und kein Biegemoment erhält. Bei einer Druckkraft von 103,85 kN und einem Querschnitt von 160/160 mm GL24h liegt die Ausnutzung der Tragfähigkeit bei 46%.

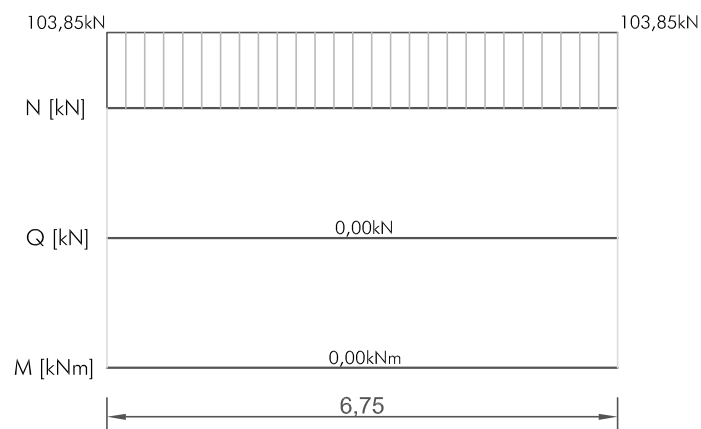


Abb. 2.11 Schnittkräfte im Stab Nummer 14

Um die Druckkraft in den Querschnitt einzuleiten, wird ein zweischnittiger Stabdübelanschluss mit 3 x 3 Stabdübeln verwendet.

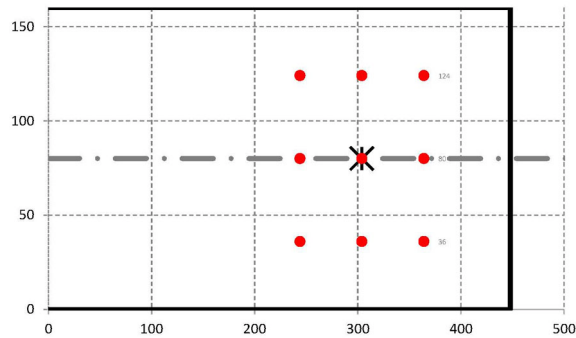


Abb. 2.12 Geometrie des Stabdübelanschlusses

Der Anschluss weist folgende Charakteristik auf:

Bezeichnung	Größe	Einheit
Tragfähigkeit $R_{d,ges}$	111,40	kN
Verschiebungskapazität $K_{u,ges}$	38.905,43	kN/m
Rotationskapazität $K_{\varphi,ges}$	1.292,28	kNm/rad

Tab. 2.1 Kenndaten des Anschlusses

Mit den aus der Anschlussbemessung erhaltenen Charakteristika kann nun ein neues statisches Modell für den Stab Nummer 14 erstellt werden. Da in diesem Punkt nur die Rotationskapazität eines Anschlusses betrachtet wird, kommt in der Modellierung nur die in Tab. 2.1 definierte Rotationskapazität des Anschlusses zur Verwendung. Daraus ergeben sich folgende Erhöhungen in den Schnittkräften des Stabes:

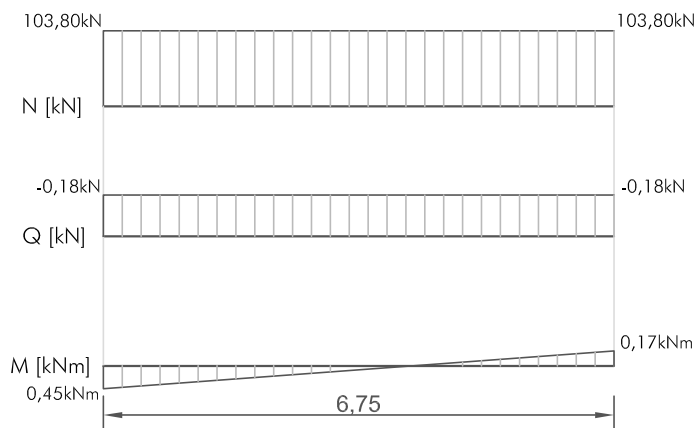


Abb. 2.13 Schnittkräfte des Stabes Nummer 14 mit Berücksichtigung der Rotationskapazität

Nachfolgend werden nur die Querschnittsnachweise geführt, da durch die Änderung der Lagerungsbedingungen des Stabes keine eindeutige Vergleichbarkeit des Bauteilnachweises möglich ist.

Diese kleine Änderung in den Schnittkräften ist durch die veränderte Tragfähigkeit des Stabes im Bereich des Anschlussgelenkes hervorgerufen worden. Zusätzlich zu einer Änderung entlang des Stabes kommt es zu einer Schnittkraftumlagerung im gesamten System. Die zusätzliche Schnittkraft entlang des Stabes führt dazu, dass nun nicht mehr reine Drucktragfähigkeit sondern Druck und Biegung zu erfolgen hat.

Der ungleichmäßige Verlauf der Momentenlinie (kein Nulldurchgang in Stabmitte) spiegelt den unterschiedlichen Momentverlauf in den Ober- und Untergurten des Fachwerkes wider. Wird die Last nicht mehr als Streckenlast auf dem Obergurt des Fachwerkes eingeleitet, sondern stattdessen als Punktlasten in den Knoten des Fachwerkes, so lässt sich dieser Fehler minimieren. Auf Grund des unterschiedlichen Tragverhaltens zwischen Druck- und Zugstäben des Fachwerkes, kann er jedoch nie ausgeschlossen werden. Da jedoch der Normalkraftverlauf entlang des Stabes und die Größe des Momentes unabhängig der Position gleich groß sind, hat dies keinen Einfluss auf die Biegeknicktragfähigkeit des Stabes.

Die Nachweisführung für den Stab wird nach folgenden Gleichungen nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4], geführt:

$$\left(\frac{\sigma_{c, 0, d}}{f_{c, 0, d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m, y, d}}{f_{m, y, d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m, z, d}}{f_{m, z, d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c, 0, d}}{f_{c, 0, d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m, y, d}}{f_{m, y, d}} + \frac{\sigma_{m, z, d}}{f_{m, z, d}} \leq 1$$

Die oben dargestellten Nachweise führen zu einer Erhöhung der Ausnutzung des Querschnittes und können zu einem Überschreiten der Tragfähigkeit führen.

Bei obigem Beispiel führt dies zu einer Erhöhung der Ausnutzung des Stabes von 46 % auf 51%. Diese 5%ige Änderung ergibt sich rein aus der zusätzlichen Momentenbeanspruchung im Anschlusspunkt des Stabes.

Allgemein ist anzumerken, dass die Rotationskapazität des Anschlusses aus normativen Grundlagen in der statischen Berechnung zu berücksichtigen ist. Wie obiges Beispiel zeigt, ist der Einfluss dieser auf die Schnittkräfte und Verformungen des Stabes durchaus relevant und kann erheblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit haben.

## 2.3 Verschiebungskapazität eines Anschlusses

Die Verschiebungskapazität eines Anschlusses definiert dessen Verhalten bei Einwirkung durch Kräfte entlang oder normal zur Stabachse. Die Modellierung erfolgt durch eine Wegfeder an der Verbindung der anzuschließenden Stäbe.

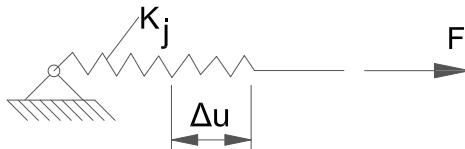


Abb. 2.14 Schema eines Wegfederanschlusses unter Normkraftbeanspruchung [30]

Dabei ist die Längenänderung  $\Delta u$  proportional zur Änderung der Normalkraft  $F$ .

$$K_j = F \cdot \Delta u$$

Bei zimmermannsmäßigen Verbindungen wie Zapfen oder Versätze ist die Verschiebung meist durch die Herstellungsgenauigkeit definiert und daher nur schwer abschätzbar.

Bei mechanischen Verbindungen liegt ein nicht-lineares Tragverhalten vor und es bilden sich elastische und plastische Anteile in der Verformung. Daher ist in ÖNORM EN 1995-1-1 [4] das Verhalten von Verbindungen für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unterschiedlich definiert. Der Sekantenmodul der Last-Verformungskurve stellt das Tragverhalten für die Tragfähigkeitsberechnung dar. Die Gebrauchstauglichkeit wird mittels der Steigung des gesamten elastischen Bereiches der Verbindung beschrieben und wird mit  $K_{ser}$  bezeichnet.

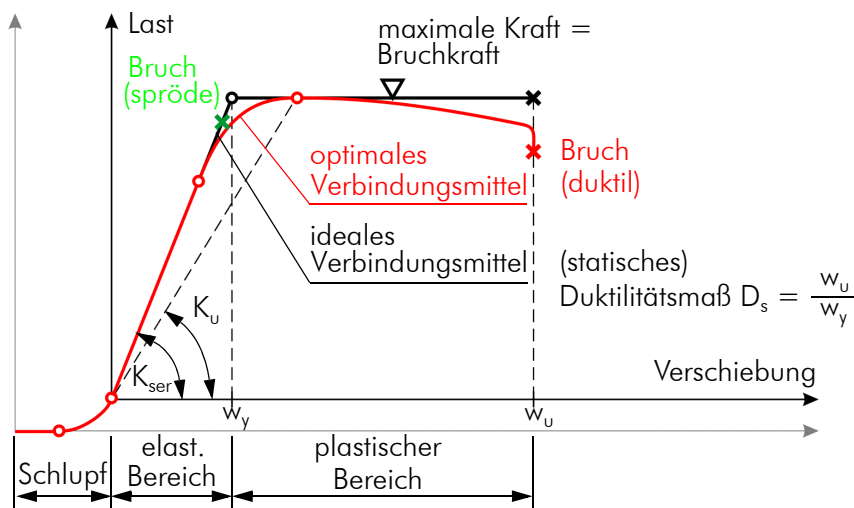


Abb. 2.15 Arbeitslinie eines Anschlusses [31]

Das bereits in Kapitel 3: 2. 2 verwendete Beispiel wird hier herangezogen, um den Einfluss des Anschlusses auf die Stabschnittkräfte darzustellen.

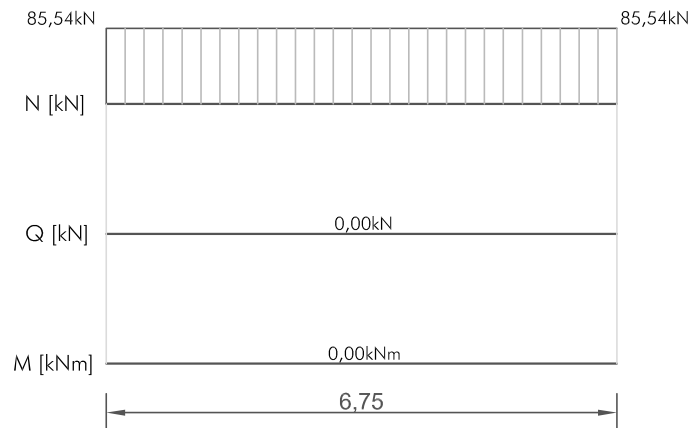


Abb. 2.16 Schnittkräfte des Stabes Nummer 14 unter Berücksichtigung der Verschiebungskapazität

Die Ausnutzung des Stabes erhöht sich von 46% auf 32% und wird rein durch die Abnahme der Normalkraft verursacht. Dieser Vergleich stellt nur die Änderungen der Querschnittsnachweise dar. Wie bereits bei der Berücksichtigung der Rotationskapazität, wird auf Grund der Änderung des Knickverhaltens das Bauteilverhalten nicht untersucht.

Da bei dieser Modellierung des Anschlusses nur eine Wegfeder entlang der Stabachse angebracht wurde, kommt es zu einer Änderung der Normalkräfte entlang des Stabes jedoch zu keiner Momentenbeanspruchung. Die große Änderung der Schnittkräfte lässt sich damit rechtfertigen, dass nur der Anschluss eines einzelnen Stabes modelliert wurde und daher alle anschließenden Stäbe genügend Kapazität aufweisen, um die Differenzkräfte aufzunehmen. Werden in der Modellierung alle Anschlüsse des statischen Systems miteinbezogen, so kann diese Differenz in den Schnittkräften nur durch eine zusätzliche Verformung des Systems aufgenommen werden.

Die Betrachtung und Modellierung des Verschiebungsweges eines Anschlusses ist im Gegensatz zur Modellierung der Rotationskapazität die einfachste Form, den Anschluss mitzuberücksichtigen. Alle Verbindungen, sowohl zimmermannsmäßige als auch mechanische Verbindungsmittel weisen einen Verschiebungsweg auf und können daher in Form einer Wegfeder in der Modellbildung berücksichtigt werden.

## 2. 4 Modellierung von direkten Anschlüssen

Ein direkter Anschluss kann durch die Abbildung beider Federn, welche die Rotations- und die Verschiebungskapazität eines Anschluss definieren, dargestellt werden. Hierbei gibt es in der ÖNORM EN 1995-1-1 [4] die beiden Verfahren der einfachen und der genauen Modellierung.

### 2. 4. 1 vereinfachtes Modell

Für das vereinfachte Modell gilt der Ansatz, dass der Anschluss durch ein Gelenk simuliert werden kann. Dieser Ansatz ist dann zutreffend, wenn die Kapazitäten des Anschlusses sehr gering sind und daher keine Auswirkungen auf die Schnittkräfte und Verformungen des Systems zu erwarten sind.

- für Anschlüsse über Kontakt

Bei Anschlüssen über Kontakt, wie es bei Zapfen oder Versätzen der Fall ist, kann der Anschluss vereinfacht durch die Verschiebung des Schwerpunktes des anzuschließenden Stabes modelliert werden.

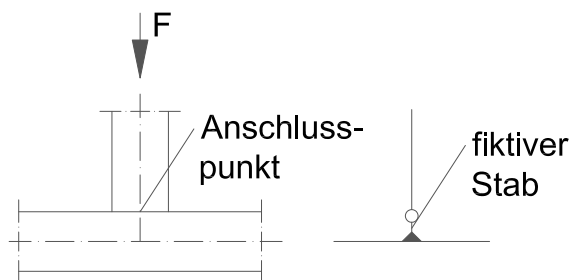


Abb. 2.17 Vereinfachter Anschluss über Kontakt [30]

- für eine Verbindungsmittelachse

Wird nur ein Verbindungsmittel verwendet, welches sich genau am Schnittpunkt der beiden anzuschließenden Stabachsen befindet, so kann vereinfacht an Stelle des Anschlusses ein Gelenk zur Modellierung verwendet werden. Bei der Verwendung von einzelnen Verbindungsmitteln oder Dübel besonderer Bauart kann dieser Fall der Modellbildung angewendet werden.

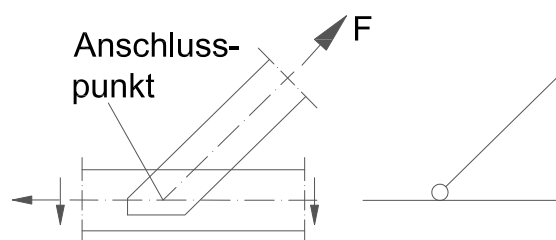


Abb. 2.18 Vereinfachter Anschluss über eine Verbindungsmittelachse [30]

- für mehrere Verbindungsmittelachsen im Schwerpunkt beider Stabachsen

Werden mehrere Verbindungsmittel verwendet und befindet sich der Schwerpunkt dieser auf dem Schnittpunkt der Schwerachsen der anzuschließenden Stabelemente, so kann hierfür vereinfacht ein Gelenk modelliert werden. Dieses Modell kann für die Abbildung von mehreren Stabdübeln, welche sich innerhalb der Schnittflächen der Stabelemente befinden im statischen System verwendet werden.

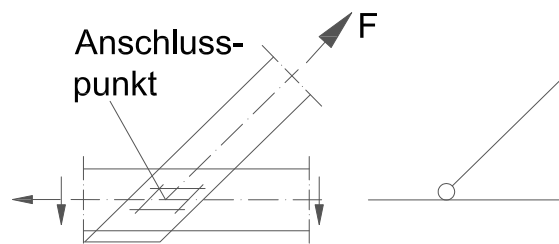


Abb. 2.19 Vereinfachter Anschluss bei mehreren Verbindungsmitteln mit Schwerpunkt in beiden Stabachsen [30]

- für mehrere Verbindungsmittelachsen ohne Schnittpunkt der Schwerpunktsachsen

Liegen der Schwerpunkt mehrerer Verbindungsmittel und jener der Stabachsen der anzuschließenden Stabelemente nicht übereinander, so entsteht aus dieser Differenz ein Versatz. Diese Versatzstrecke kann vereinfacht durch einen fiktiv eingeführten Stab, welcher als Länge die Versatzstrecke aufweist, modelliert werden.

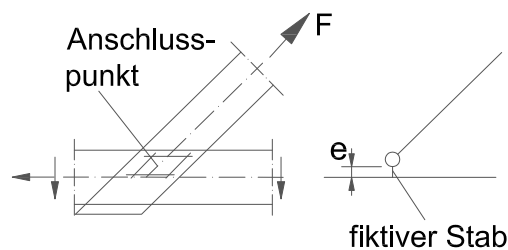


Abb. 2.20 Vereinfachter Anschluss bei mehreren Verbindungsmitteln ohne Schnittpunkt der Schwerachsen [30]

Die vereinfachte Modellierung stellt, wie der Name dies schon besagt, die einfachste Form der Berücksichtigung des Anschlusses dar. Daraus folgt jedoch auch, dass mit dieser Art der Modellierung nicht alle auftretenden Einflüsse durch den Anschluss berücksichtigt werden können. Wie jedoch aus den obigen Abbildungen und dazugehörigen Beschreibungen ersichtlich ist, handelt es sich bei diesen Anschlüssen um sehr gering tragfähige Anschlüsse, was wiederum auf die Verwendung dieser in einfachen Bereichen des konstruktiven Holzbaues schließen lässt. Da in diesen Bereichen geringe Spannweiten und einfache statische Systeme zum Einsatz kommen, ist eine Modellierung der Anschlusskapazitäten weder wirtschaftlich noch sinnvoll, da sich dadurch kaum ein Vorteil im Bezug auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Tragwerkes realisieren lässt.

### 2. 4. 2 genaues Modell

Bei Verwendung des genauen Modelles nach ÖNORM EN 1995-1-1 [4] werden im Unterschied zum vereinfachten Modell auch die Kapazitäten des Anschlusses in der Modellierung des statischen Systemes mitberücksichtigt. Die geometrischen Verschiebungen der Schwerpunkte werden wie im vereinfachten Modell abgebildet, zusätzlich zu diesen werden jedoch auch die Rotations- und Verschiebungskapazität der Verbindungsmittel berücksichtigt.

- für Anschlüsse über Kontakt

Die Verschiebung des Verbindungsmittelschwerpunktes wird durch einen fiktiven Stab abgebildet. Zusätzlich zu diesem wird die Verschiebungskapazität des Anschlusses durch eine Wegfeder mitberücksichtigt. Da es sich bei dieser Art des Anschlusses meist um zimmermannsmäßige Verbindungen handelt, kann eine Rotationskapazität des Anschlusses ausgeschlossen werden, da diese nur über Reibung geführt werden könnte und dieser Ansatz auf Grund der unbekanntenen Fertigungsgenauigkeiten vernachlässigbar klein ist.

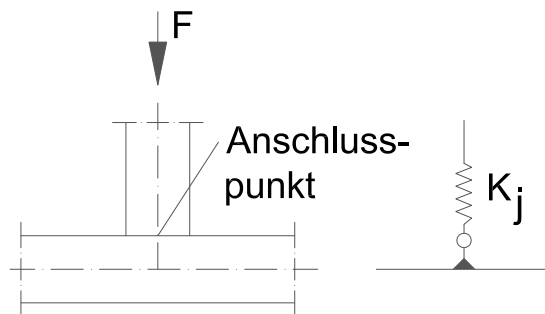


Abb. 2.21 Vereinfachter Anschluss über Kontakt [30]

- für eine Verbindungsmittelachse

Liegt nur eine Verbindungsmittelachse im Anschluss vor, so wird diese durch ein einziges Verbindungsmittel dargestellt. Dieses einzelne Verbindungsmittel weist wiederum nur ein Verschiebungs- jedoch keine Rotationskapazität auf. Eine sehr geringe Rotationskapazität würde durch die Berücksichtigung der Reibung zwischen den beiden angeschlossenen Stabelementen erreicht werden, diese ist jedoch wieder von der unbekanntenen Fertigungsgenauigkeit und dem Quell- und Schwindverhalten der Verbindung abhängig.

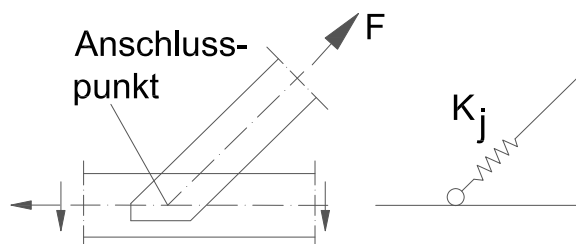


Abb. 2.22 Vereinfachter Anschluss über eine Verbindungsmittelachse [30]



- für mehrere Verbindungsmittelachsen im Schwerpunkt beider Stabachsen

Mehrere Verbindungsmittel, mit welchen eine Verbindung hergestellt wird, können auf Grund ihrer geometrischen Position zueinander ein Moment aufnehmen und weisen daher nicht nur eine Verschiebungs- sondern auch Rotationskapazität auf. Diese beiden werden durch die Anbindung einer Wegfeder und einer Drehfeder am Anschlusspunkt im statischen Modell berücksichtigt.

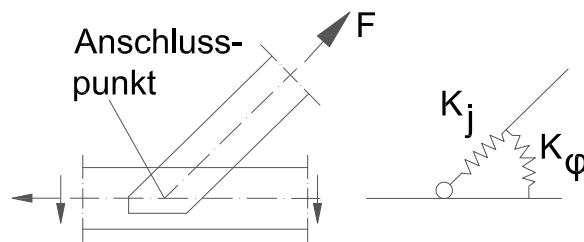


Abb. 2.23 Vereinfachter Anschluss bei mehreren Verbindungsmitteln mit Schwerpunkt in beiden Stabachsen [30]

- für mehrere Verbindungsmittelachsen ohne Schnittpunkt der Schwerpunktsachsen

Wie im oberen Fall wird ein Anschluss mit mehreren Verbindungsmitteln durch eine Weg- und Drehfeder modelliert. Wenn sich zusätzlich die Schwerpunkte der Stabachsen und des Anschlusses nicht in einem Punkt treffen, wird der für diese Versatzstrecke erforderliche Abstand durch einen fiktiven Stab berücksichtigt.

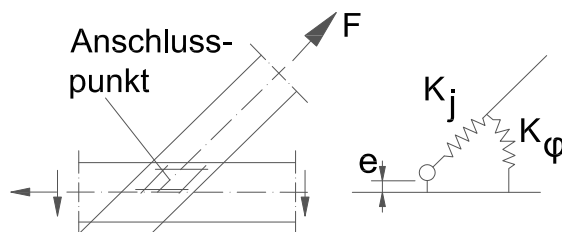


Abb. 2.24 Vereinfachter Anschluss bei mehreren Verbindungsmitteln ohne Schnittpunkt der Schwerachsen [30]

Da das genauere Modell im Gegensatz zum vereinfachten Modell nicht nur die geometrischen Einflüsse des Anschlusses sondern auch die Kapazitäten dieses in der Modellierung berücksichtigt, wird der Einfluss der Anschlüsse nicht nur genauer berücksichtigt, sondern auch wirklichkeitsnäher. Dadurch ist eine genauere Abbildung des gesamten Tragverhaltens möglich, wodurch die Versagens- und Verhaltensaussagen eines Fachwerkes genauer werden und so auch eine wirtschaftlichere und realitätsnahe Bemessung des gesamten Fachwerkes ermöglicht wird.

## 2.5 Modellierung von indirekten Anschlüssen

Indirekte Anschlüsse stellen bei hochbelasteten Fachwerken den Regelfall dar. Um die Kräfte in die Stabelemente einzuleiten, sind oftmals Stahleinbauteile erforderlich, welche durch holztechnische Verbindungsmittel wie Stabdübel oder Schrauben die Kräfte an den anzuschließenden Holzstab weitergeben und diese dort einleiten. Die Modellierung dieser sieht die gleichen Elemente wie fiktive Stäbe, Wegfedern und Drehfedern vor, nur kann es bei einem indirekten Anschluss zusätzlich, zum Auftreten von Stabnichtlinearitäten kommen.

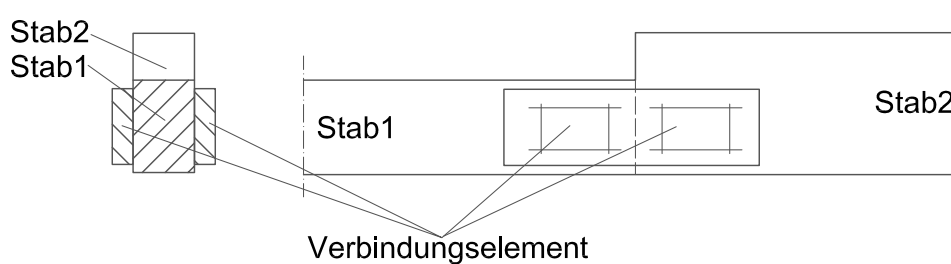


Abb. 2.25 Indirekter Anschluss am Beispiel zweier ungleich großer Querschnitte [30]

Diese Stabnichtlinearitäten können durch folgende Punkte beschrieben und berücksichtigt werden:

- Drehsteifigkeit aller Anschlüsse berücksichtigen

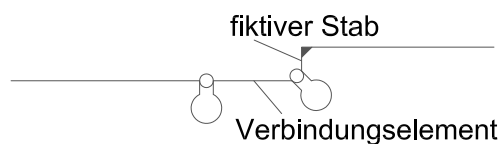


Abb. 2.26 indirekter Anschluss durch mehrere Drehsteifigkeiten [30]

- am gemeinsamen Gelenkpunkt der Verbindungsmittel anschließen

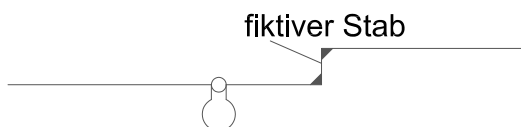


Abb. 2.27 indirekter Anschluss durch den Gelenkpunkt aller Verbindungsmittel [30]

- alle Stäbe drehstarr am Verbindungselement anschließen

Bei der Modellierung von indirekten Anschlüssen ist vor allem der Höhenversatz zwischen den Bauteilen maßgebend. Dies ist jedoch im Holzbau meist nur bei Ausbesserungen oder Zubauten der Fall, da ansonsten auf die Durchgängigkeit des Systems geachtet wird. Da durch die Verschiebung der Stabachsen jedoch Zusatzschnittkräfte auftreten, hat diese Art des Anschlusses einen sehr hohen Einfluss auf die Schnittkräfte.

## 3 Anschlusszentritäten

Die Anschlusszentrität lässt sich in zwei einzelne Effekte unterteilen:

- Exzentrität der Anschlussgeometrie und
- Exzentrität der anzuschließenden Stabachsen.

Beide Effekte sind von der Geometrie und den erforderlichen Abmessungen des Anschlusses abhängig.

### 3.1 Anschlussgeometrie

Die durch die Anschlussgeometrie entstehende Exzentrität erzeugt zusätzliche Schnittkräfte, welche in den anzuschließenden Stab eingeleitet werden müssen. Dieser Effekt wird in der Modellierung durch die bereits in Kapitel 3: 2. 4 unter dem genauen Verfahren beschriebenen fiktiven Stab berücksichtigt.

Da die Anschlussgeometrie maßgebend durch die auf den Stab einwirkenden Kraft definiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt direkt proportional zu den Schnittkräften ist. Wird die Kraft in einem Anschluss höher, so muss der Anschluss durch eine angepasste Geometrie auf diese Erhöhung antworten. Aus dieser geometrischen Differenz entsteht wiederum eine größere Anschlusszentrität, folglich tritt eine Erhöhung der Schnittkräfte auf.

Die Anschlussgeometrie wird daher durch die bereits beschriebenen Punkte

- Rotationskapazität,
- Verschiebungskapazität und
- Modellierung eines Anschlusses

definiert und durch deren Abbildung berücksichtigt.

Es gibt mehrere Bedingungen, durch welche die Anschlussgeometrie beschrieben wird und auf Grund derer sich Änderungen in der Geometrie ergeben:

- anzuschließende Stabachsen,
- Abmessungen der anzuschließenden Bauteile,
- Platzbedarf der Verbindungsmittel und
- sonstiger Platzbedarf für Leitungsführungen oder Aussparungen in den Querschnitten

## 3.2 Anzuschließende Stabachsen

Im Gegensatz zur Anschlussgeometrie sind die anzuschließenden Stabachsen nicht nur durch die Geometrie des Anschlusses, sondern auch durch den Winkel und die Querschnittsgröße der Bauteile definiert. Wenn sich die Stabachsen der anzuschließenden Querschnitte nicht in einem Punkt schneiden, so wird durch diese asymmetrische Lasteinleitung eine zusätzliche Laststeigerung erwirkt, welche zu einer Schnittkraftumlagerung entlang der Differenzstrecke  $\Delta l$  zwischen den schneidenden Stabachsen entsteht.

Diese Differenzstrecke kann sowohl parallel zur Stabachse als auch normal zur Stabachse vorliegen. Diese Differenz zwischen den Anschlusspunkten führt sowohl in  $x$ , als auch in  $z$  Richtung zu einer Erhöhung der Querkräfte und Biegemomente des Stabes.

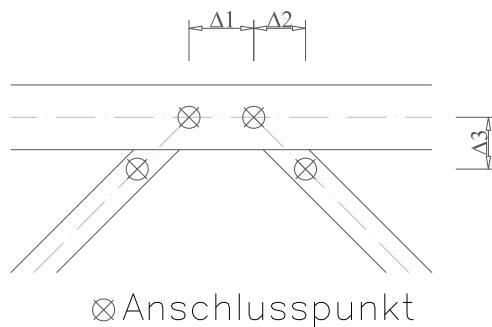


Abb. 3.1 Differenzstrecken eines Anschlusses

- $\Delta 1$ : Differenz bei Anschlüssen mit mehr als zwei Stäben in einem Knoten,
- $\Delta 2$ : Differenz in Stabachse des angeschlossenen Stabes,
- $\Delta 3$ : Differenz in Stabachse des anzuschließenden Stabes.

Mit Hilfe der Längen der Differenzstrecken kann durch das Anbringen eines fiktiven Stabes im statischen System der Einfluss dieser berücksichtigt werden. Da diese Abmessungen jedoch erst nach der Vorbemessung der Stäbe und der Anschlüsse bekannt ist, führt dies zu einer Änderung des statischen Systems im Berechnungsablauf und erfordert die Einführung eines iterativen Prozesses in der Berechnung.

### 3.3 Abmessungen der anzuschließenden Bauteile

Die Abmessungen der Bauteile werden größtenteils durch die Schnittkräfte und daraus resultierenden Spannungen innerhalb dieser definiert. Jedoch kann auch der Fall eintreten, dass die Querschnitte der Stäbe im Zuge der Anschlussbemessung abgeändert werden müssen.

Diese Abänderung der Querschnitte kann auf folgende Punkte zurückgeführt werden:

- Platzbedarf für die erforderliche Anzahl von Verbindungsmitteln  
Die erforderliche Anzahl von Verbindungsmitteln wird erst durch die Anschlussbemessung, welche nach der Querschnittsbemessung stattfindet, ermittelt. Daraus folgend kann eine geometrische Differenz zwischen dem Querschnitt für die Spannungsnachweise und jenem für die Platzierung der Verbindungsmittel entstehen. Daraus wiederum folgend, muss der Querschnitt an die Verbindungsmittel angepasst werden, was zu einer Änderung der Schnittkraftberechnung führen kann.
- Querschnittsvergrößerung, um Nettoquerschnittsnachweise erfüllen zu können  
Nach der Platzierung der Verbindungsmittel sind die Nettoquerschnitte auf deren Spannungen nachzuweisen. Im Zuge dieser Bemessung kann es vorkommen, dass der Nettoquerschnittsnachweis zu einer Überlastung des Querschnittes führt. Diese Überbeanspruchung kann meist nur durch eine Anpassung des Querschnittes oder einer Erhöhung der Materialgüte verhindert werden.
- Platzbedarf für die Montage von Verbindungsmittel  
Um das Einbringen der Verbindungsmittel zu ermöglichen ist oft ein gewisser Platzbedarf erforderlich. Die Einhaltung gewisser geometrischer Grenzen kann zu einer erforderlichen Anpassung des Querschnittes oder zu einer Umänderung der Lage von Verbindungsmitteln führen.
- Platzbedarf zur Montage anderer Bauteile  
Um die Montage und das Zusammenfügen unterschiedlicher Bauteile zu ermöglichen, kann es erforderlich sein, gewisse geometrische Bedingungen einzuhalten. Dies hängt mit der Montage und Art der Verbindungsmittel zusammen.



## Parameterstudie

Um den Einfluss der in Kapitel 3 beschriebenen Effekte auf die Bauteile und Anschlüsse eines Fachwerkes und die daraus folgenden Veränderungen in der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit beurteilen zu können, wird im nachfolgenden Kapitel eine Parameterstudie zu den unterschiedlichen Fachwerktypen, Spannweiten und Belastungen durchgeführt.

Ziele dieser Parameterstudie sind:

- der Einfluss der Modellierung eines Fachwerkes, der
- der Einfluss der Effekte in Abhängigkeit der Spannweite eines Fachwerkes, der
- der Einfluss der Effekte auf unterschiedliche Fachwerktypen, die
- die Auswirkungen der Steifigkeit von Anschlüssen und die
- die Auswirkungen der Anschlusskonzentritäten.

Durch die Ergebnisse dieser Parameterstudie soll die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieser Effekte in der Modellierung und Berechnung geklärt und die normative Grundlage dieser wiedergespiegelt werden. Dabei wird im Zuge der Parameterstudie eine Änderung und eine Anpassung des statischen Systemes in der Modellierung vorgenommen.

Zusätzlich zu den Einflüssen auf die Bauteile und Querschnitte, soll auch der Einfluss auf die Anschlüsse und Verbindungsmittel geklärt werden. Bei diesen wird in der Ausführung der unterschiedlichen Parameterstudien dazu keine Veränderung oder Anpassung an die aktuelle Belastung vorgenommen.

Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben wurde, gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Typen von Fachwerken. Da bestimmte Fachwerke nur eine Variation oder Anpassung eines anderen Typs darstellen, werden hier die am häufigsten verwendeten Typen herangezogen.

# 1 Einfluss der Modellierung eines Fachwerkes

Wie bereits im Kapitel 2: 1. 4 beschrieben wurde, ist die Berechnung von Fachwerken durch eine unterschiedliche Art der Modellierung möglich. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Modellierungsarten nur im Bezug auf ihre Abbildungsgenauigkeit. Diese beschreibt hierbei die Berücksichtigung der „Wirklichkeit“ und somit des Unterschiedes zwischen dem in der statischen Berechnung abgebildeten System und dem in der Realität ausgeführten Fachwerk.

## 1. 1 Ablauf der Modellierung in der Parameterstudie

Um den Einfluss der einzelnen Systemeffekte auf die Modellierung berücksichtigen zu können, wird in allen Parameterstudien der nachfolgende Modellierungsablauf beibehalten.

Nach der Modellierung als ein ideelles Fachwerk, wird dieses durch ein reelles Fachwerkssystem abgebildet, welches als Ausgangsmodell für die nachfolgenden Modellierungen dient. In diesem realen Fachwerk werden die Einflüsse der Systemeffekte und Exzentrizitäten modelliert, untersucht und gegenübergestellt.

### 1. 1. 1 ideelles Fachwerk (Schritt 1)

Das Fachwerk besteht nur aus Fachwerkstäben (nur Normalkräfte), welche durch Vollgelenke miteinander verbunden werden. In diesem einfachsten Fall der Modellierung wird die Bemessung der Querschnitte und der Anschlüsse durchgeführt. Dabei wird die maximale Ausnutzung der Querschnitte und Anschlüsse auf rund 80% begrenzt.

### 1. 1. 2 reelles Fachwerk (Schritt 2)

Um die Modellierung zu optimieren und an die Ausführung in der Praxis anzupassen, werden die Ober- und Untergurte des Fachwerkes als Biegeträger modelliert. Die Druck- und Zugelemente des Fachwerkes, welche nun auch als Biegeträger modelliert werden, schließen an diese mittels Halbgelenken an. Es erfolgt keine Berücksichtigung etwaiger Montagepunkte oder Stöße.

### 1. 1. 3 reelles Fachwerk mit Wegfedern (Schritt 3)

In dem in Schritt 2 modellierten realen Fachwerk werden nun die Wegfedern der Anschlüsse (nur entlang der Achse des Stabes) mitberücksichtigt. Dabei schließen nun die Druck- und Zugelemente, verbunden durch eine Wegfeder, an die Halbgelenke und somit an die Ober- und Untergurte an. Hierbei werden jedoch nur die Steifigkeiten des Anschlusses für den Tragfähigkeitsnachweis verwendet. Da ein linearer Zusammenhang zwischen den Steifigkeiten für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit besteht, kann dieser auf die Interpretation der Ergebnisse angewendet werden.



#### 1. 1. 4 reelles Fachwerk mit Drehfedern (Schritt 4)

Die in Schritt 3 definierten Wegfedern werden nun durch Drehfedern ersetzt. Diese Aufteilung in zwei unterschiedliche Parameterstudien soll den Sinn haben, die unterschiedlichen Einflüsse einer Weg- oder Drehfeder und deren Notwendigkeit in der Modellierung herauszufinden.

#### 1. 1. 5 reelles Fachwerk mit Weg- und Drehfedern (Schritt 5)

Da nahezu jeder Anschluss im Holzbau sowohl eine Verschiebungs- als auch eine Rotationskapazität aufweist, werden in diesem Schritt die Modellierungen der Schritt 3 und Schritt 4 vereint.

#### 1. 1. 6 reelles Fachwerk mit Exzentrizitäten (Schritt 6)

In dem in Schritt 2 modellierten realen Fachwerk werden nun die Exzentrizitäten der Stabachsen und der Schwerpunkte der Verbindungsmittel mitberücksichtigt. Dabei werden die Exzentrizitäten, welche aus den Differenzen der Schnittpunkte der Stabachsen entstehen, und jene, aus den Verschiebungen der Lastangriffspunkte in den Schwerpunkt der Verbindungsmittel durch die Modellierung des Stahlbleches, welche die Verbindungsmittel miteinander verbindet, berücksichtigt.

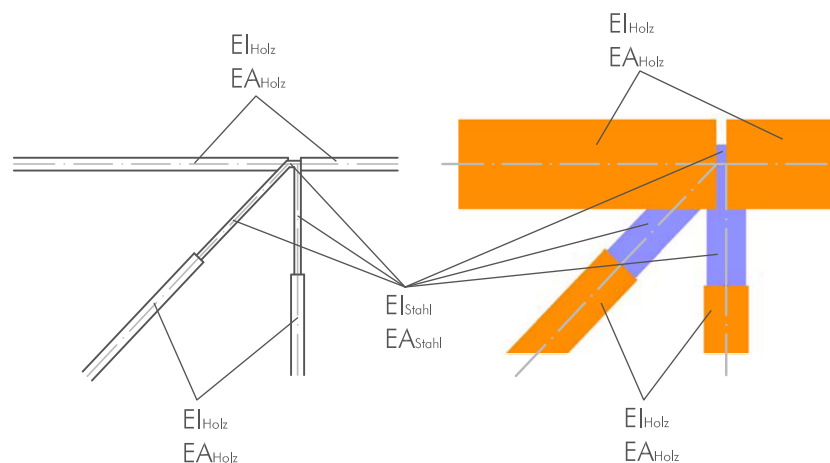


Abb. 1.1 Schema der Modellierung der Exzentrizitäten zwischen den Stabachsen und der Schwerpunkte der Anschlüsse als Stabmodell (links) und Rendering (rechts)

#### 1. 1. 7 reelles Fachwerk mit Berücksichtigung aller Effekte (Schritt 7)

Um den Gesamteinfluss der Anschlüsse und deren Modellierung betrachten zu können, werden in diesem Schritt die in den Schritten 2 bis 6 modellierten Steifigkeiten und Effekte gemeinsam abgebildet. Dies soll den genauest möglichen Fall der Modellierung darstellen und somit den Stand der Technik in der Modellierung abbilden.

Allen Schritten gemein ist eine Anpassung an die Realität und eine daraus folgende Erhöhung der Genauigkeit.

## 2 Ausgewählte Fachwerktypen für die Parameterstudie

Bei der Gestaltung der Form des Fachwerkes sind dem Architekten in der Planung und dem Ingenieur in der Berechnung kaum Grenzen gesetzt. Aus diesen beiden Gründen gibt es eine Vielzahl von Typen, welche in der Praxis verwendet werden. Um die Parameterstudie an die Verwendung in der Praxis anzupassen, werden für diese die in der Praxis am gebräuchlichsten und auf Grund ihrer Vorteile am häufigsten verwendeten Fachwerke bearbeitet.

Zusätzlich zu den unterschiedlichen Typen, werden die Fachwerke mit Spannweiten von 20 m, 40 m und 60 m modelliert.

Nachfolgend eine Auflistung der beiden untersuchten Fachwerktypen und deren Darstellung und Charakteristik:

### 2.1 Streben/Pfosten - Fachwerk

Dieser Typ stellt, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, den häufigsten Fall für Fachwerke aus Holz mit einer Spannweite bis rund 25 m dar. Da alle verwendeten Querschnitte aus Holz bestehen, ist keine Anpassung der Anschlüsse erforderlich. Die Herstellung und Montage gestalten sich als sehr einfach, da die einzelnen Teile nur ineinander gefügt werden müssen und durch die Einbringung der Verbindungsmittel eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt wird. Zusätzlich sind zu diesem Fachwerktyp ausreichende Erfahrungen und eine Vielzahl an einfachen Bemessungshilfen vorhanden.

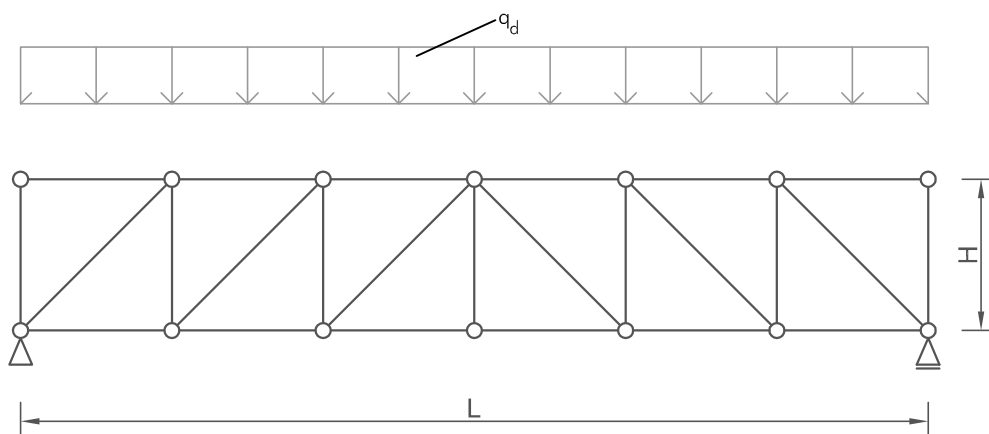


Abb. 2.1 Systemskizze eines Streben/Pfosten - Fachwerkes

## 2.2 Strebenfachwerk

Ein reines Strebenfachwerk stellt einen Sonderfall des Streben/Pfosten Fachwerkes dar und wird meist zur Herstellung von Brücken und weitgespannten Hallentragwerken verwendet. Aus der Erfahrung ergibt sich eine Strebenneigung von ca.  $45^\circ$ , um einen guten geometrischen Zusammenhang zwischen Spannweite und der erforderlichen Höhe zu erreichen.

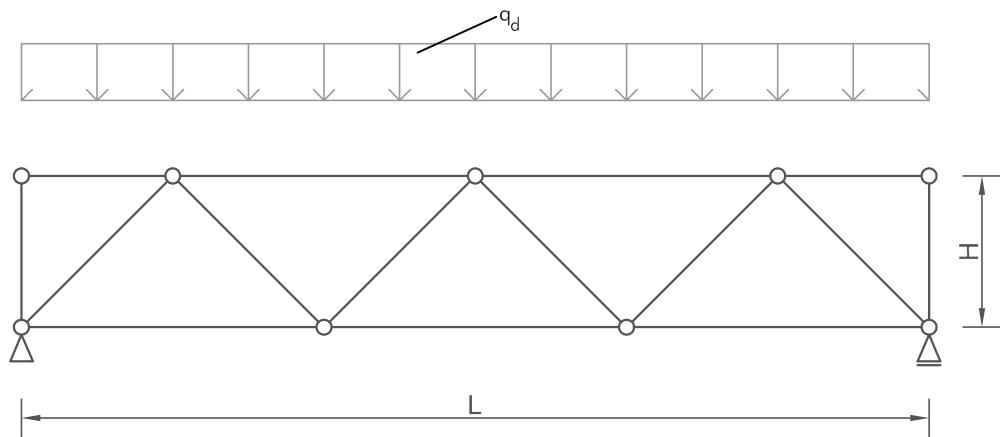


Abb. 2.2 Systemskizze eines Strebenfachwerkes

### 3 Ausgewählte Anschlüsse für die Parameterstudie

Da es sich in der Arbeit grundsätzlich um die Systemeffekte bei Holzfachwerken handelt und bei der Lösung von Fachwerken eine Unzahl von Anslusstypen zum Einsatz kommt, wird in der Parameterstudie nur der Einfluss einer begrenzten Anzahl an Anschlüssen untersucht. Diese variieren zwar mit jenen in der Praxis verwendeten Lösungen, jedoch sollen die Ergebnisse aus der Studie auf diese anwendbar sein, da sich zwar die Geometrie der Anschlüsse ändert, allerdings deren Eigenschaften, wie Steifigkeiten oder Kapazitäten, gleichbleiben.

#### 3.1 Einzelanschlüsse für Bauteile

Für die Druck- und Zuganschlüsse von Fachwerkstäben aus Holzbauteilen werden Knotenbleche mit Stabdübeln verwendet. Diese stellen eine gängige, häufig verwendete Lösung in der Praxis dar und sind in unterschiedlichsten Arbeiten bereits hinreichend untersucht worden.

Die Zuganschlüsse von Streben aus Holzquerschnitten, werden ebenfalls aus Stahlbauteilen hergestellt. Dabei kommt eine ähnliche Ausführung wie bei Druckanschlüssen zur Anwendung.

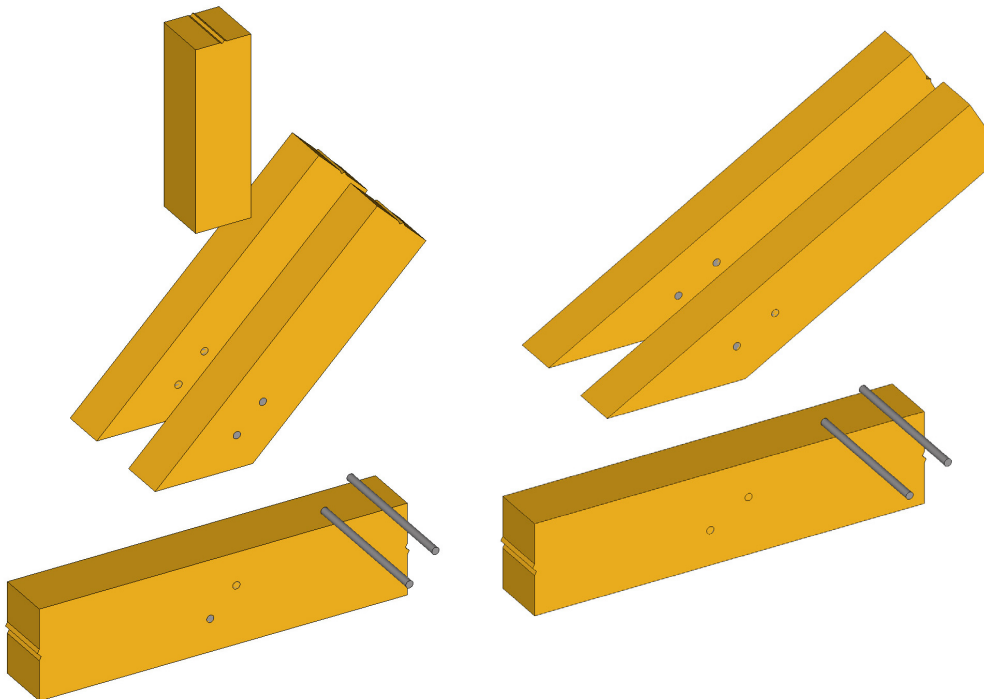


Abb. 3.1 Darstellung für einen Normalkraftanschluss mit Holzquerschnitten

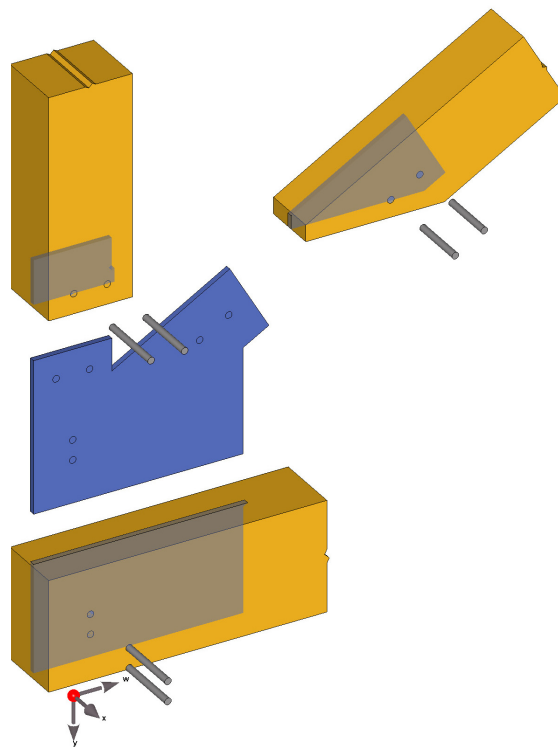


Abb. 3.2 Darstellung für einen Normkraftanschluss mit Stahlbauteilen

## 3.2 Kombinierte Anschlüsse

Der Anschluss aller Querschnitte (sowohl Druck als auch Zug) wird durch ein Stahlbauteil im anzuschließenden Bauteil hergestellt. Dieses Stahlblech wird durch Stabdübel mit dem anzuschließenden und dem angeschlossenen Bauteil verbunden und leitet die auftretenden Kräfte weiter.

Um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Systeme zu ermöglichen, werden typisierte Anschlüsse ausgearbeitet, welche sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufnehmen können.

Dabei werden die in Abschnitt 3.1 definierten und beschriebenen Anschlussarten für die Herstellung der kombinierten Anschlüsse verwendet. Um die Ausführbarkeit der Anschlüsse und die geometrische Machbarkeit sicherzustellen, kann jedoch eine Anpassung der einzelnen Typen je nach anfallendem Lastniveau notwendig sein.

Um den Vergleich aller Anschlüsse und deren Auswirkungen berücksichtigen zu können, werden im gesamten Fachwerk (an jedem anfallenden Knoten) idente Anschlüsse verwendet und diese nicht an das in den Stäben vorliegende Lastniveau angepasst. Die daraus folgende Überbemessung der Stabquerschnitte und der Verbindungen wird jedoch für den besseren Vergleich der Ergebnisse in Kauf genommen.

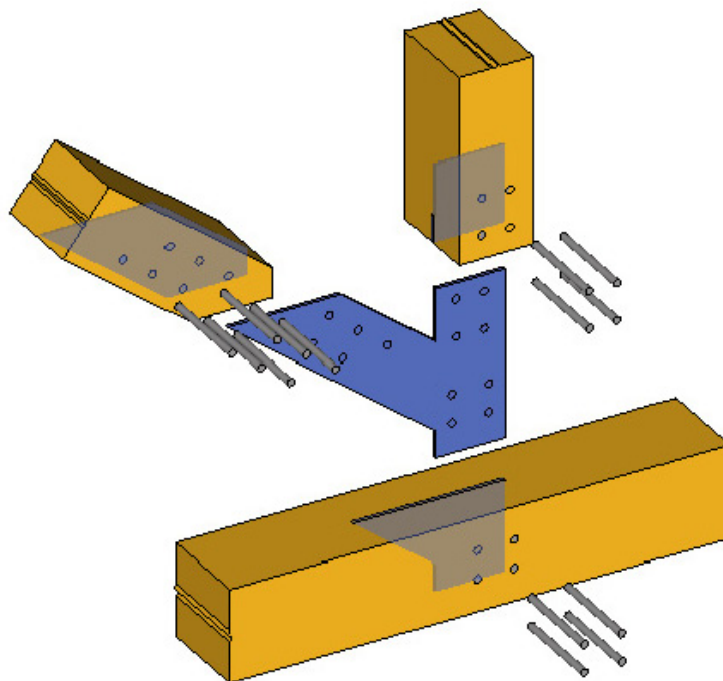


Abb. 3.3 Modell eines Anschlusses mit Holzquerschnitten (oben links) [15]; Umsetzung eines kombinierten Anschlusses aus einem Holz-Druckelement und einem Stahl-Zugglied (oben rechts) [34]; Schematische Darstellung eines Fachwerkanschlusses aus Holzbauteilen (unten) [36]

Bei einem kombinierten Anschluss von Druck- und Zugelementen aus Holz wird ein Y-förmiges Stahlblech in den anzuschließenden und angeschlossenen Bauteilen mittels Stabdübeln befestigt. Dieses Stahlblech leitet die Schnittkräfte aus dem angeschlossenen Bauteil in das anzuschließende Bauteile ein. In einem kombinierten Anschluss von Druckelementen aus Holzbauteilen und Zugelementen aus Stahlbauteilen wird der Druckstab aus Holz mittels Stahlblech und Stabdübeln an den angeschlossenen Bauteil angebracht und das Zugelement aus Stahl wird durch eine Kopfplatte und einer Schraubenverbindung angeschlossen.

## 4 Festgehaltene und variierte Parameter

Um die Vergleichbarkeit der in der Parameterstudie betrachteten Fachwerke zu ermöglichen, werden maßgebende Parameter in ihrer Größe beibehalten. Die als „Systemeffekte“ definierten Parameter werden in der Studie verändert und auf ihren Einfluss bezüglich Belastung und Spannweite untersucht.

Folgende Parameter werden unter dem Oberbegriff der Systemeffekte in der Studie variiert:

- Modellierung der Anschlüsse als Wegfeder
- Modellierung der Anschlüsse als Drehfeder
- Modellierung der Anschlüsse als Weg- und Drehfeder

Zusätzlich zu den Systemeffekten werden die unter dem Oberbegriff der Imperfektion zusammengefassten Einflüsse, welche maßgeblich auf Theorie II. Ordnung beruhen, modelliert:

- Modellierung der Knotenexzentrizitäten
- Modellierung der Anschlusssexzentrizitäten

Folgende Parameter werden in der Parameterstudie beibehalten:

- Belastung  $q_d = 3,75 \text{ kN/m}^2 * L/5$

dies ergibt sich aus:

$$q_d = (\gamma_G * g_k + \gamma_Q * q_k) * e$$

$\gamma_G = 1,35$  Sicherheitsfaktor für Eigenlasten

$g_k = 0,50 \text{ kN/m}^2$  Flächenlasten für das Eigengewicht des Dachaufbaues

$\gamma_Q = 1,50$  Sicherheitsfaktor für veränderliche Lasten

$s_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$  Flächenlasten aus Schnee

$$q_d = (1,35 * 0,50 \text{ kN/m}^2 + 1,50 * 2,00 \text{ kN/m}^2) = 3,75 \text{ kN/m}^2$$

$e = L/5$  ; Lasteinzugsbreite des Fachwerkes

$L$  = Spannweite des betrachteten Systemes

Dies scheint für übliche Dachaufbauten und übliche Schneelasten in Österreich eine ausreichende Annahme zu sein. Diese Last wird wie in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 als Streckenlast auf die Obergurte angebracht.

- Festigkeitsklasse GL28h für alle Bauteile und  $k_{mod} = 0,80$
- Stahlgüte S235 für alle Stahlbauteile
- Knick- und Kippsicherung der Obergurte durch Pfetten in Dachebene
- Querschnittsnachweise im ersten Bemessungsschritt rund 85%

## 5 Parameterstudie

Aus den in den Abschnitten 1 bis 4 definierten Angaben ergibt sich folgende Anzahl der durchzuführenden Parameterstudien für jeden Fachwerktyp:

- 2 x Fachwerktypen
- 3 x Spannweite mit unterschiedlicher Belastung
- 3 x Modellierung + jeweils Systemeffekt und Imperfektionen

Da die Parameterstudie für beide Fachwerktypen den gleichen Ablauf aufzeigt, soll die nachfolgende Darstellung die durchzuführenden Schritte verdeutlichen:

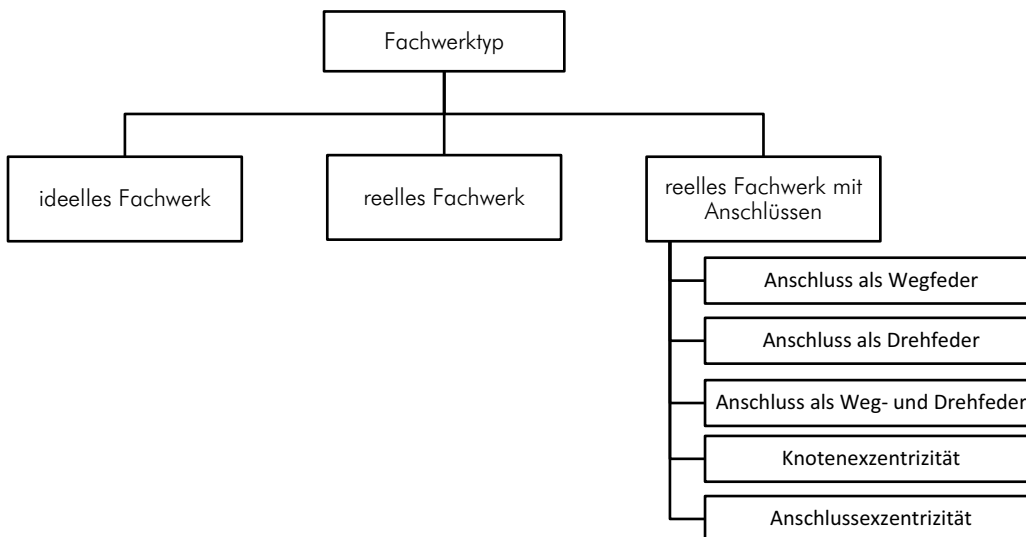


Abb. 5.1 Schritte der Parameterstudie für einen Fachwerktyp

Aus Abb. 5.1 ist ersichtlich, dass für jeden Fachwerktyp sieben Kombinationen durchzuführen sind. Daraus ergibt sich gemeinsam mit den zwei Fachwerktypen und den drei Variationen der Spannweiten insgesamt eine Anzahl von 42 durchzuführenden Kombinationen.



## 5.1 Bezeichnung der Kombinationen:

Zur Gewährleistung der Übersichtlichkeit in der Parameterstudie, wird nachfolgendes Bezeichnungssystem eingeführt:

$FX_{i,j}$

X = Art des Fachwerkes

A = Streben / Pfosten Fachwerk

B = Strebenfachwerk

C = zusätzliche Betrachtungen

i = Spannweite des Fachwerkes

1 = 20,00 m;  $q_d = 15,00$  kN/m

2 = 40,00 m;  $q_d = 30,00$  kN/m

3 = 60,00 m;  $q_d = 45,00$  kN/m

j = Modellierung, Systemeffekte und Imperfektionen des Fachwerkes

1 = ideelles Fachwerk

2 = reelles Fachwerk

3 = reelles Fachwerk mit Anschluss als Wegfeder

4 = reelles Fachwerk mit Anschluss als Drehfeder

5 = reelles Fachwerk mit Anschluss als Weg- und Drehfeder

6 = reelles Fachwerk mit Modellierung der Knoten- und Anschluss exzentrität

7 = reelles Fachwerk mit allen Systemeffekten (Summe 2 bis 6)

## 5.2 Fachwerk FA1.j

Die Parameterstudie FA1.j stellt die erste Modellierung des Streben/Pfosten - Fachwerktypes dar. Nachfolgend eine Auflistung der maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

Beschreibung	
Fachwerktyp	Streben/Pfosten
Spannweite	20,00 m

Tab. 5.1 Informationen zu Fachwerkstudie FA1.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Um möglichst geringe Querschnittsabmessungen und somit die Möglichkeit duktiler Anschlüsse und ein symetrisches Fachwerk zu erhalten, wurde L/14 für die Abschätzung der Höhe des Fachwerkträgers gewählt. Mit dieser Höhe und der definierten Spannweite und Belastung wurde in FA1.1 die Vorbemessung durchgeführt. Daraus ergeben sich nachfolgende geometrische Abmessungen:

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	1429
Obergurt	160x320
Untergurt	160x320
Druckpfosten	160x160
Zugstreben	160x160

Tab. 5.2 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

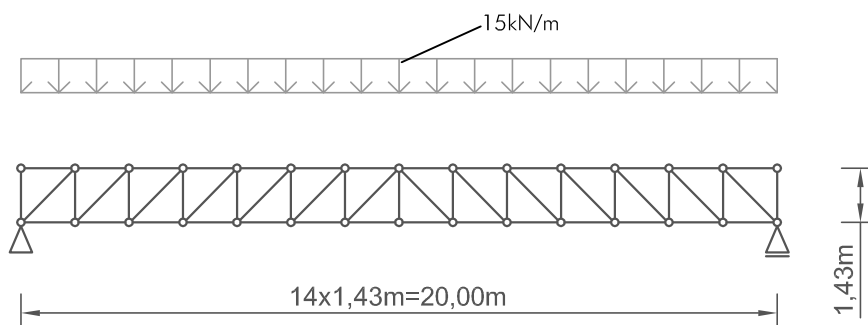


Abb. 5.2 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FA1.j

Mit den aus Parameterstudie FA1.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	2
Stabdübeldurchmesser	12
Druckpfosten	3 x 6
Zugstreben	3 x 3
Obergurt	2 x 3
Untergurt	2 x 3

Tab. 5.3 Anschlüsse des Fachwerkes FA1

Die gesamte Verbindung wird zweischnittig (ein Stahlblech) bemessen. Dieses Blech weist eine Stärke von 10 mm auf.

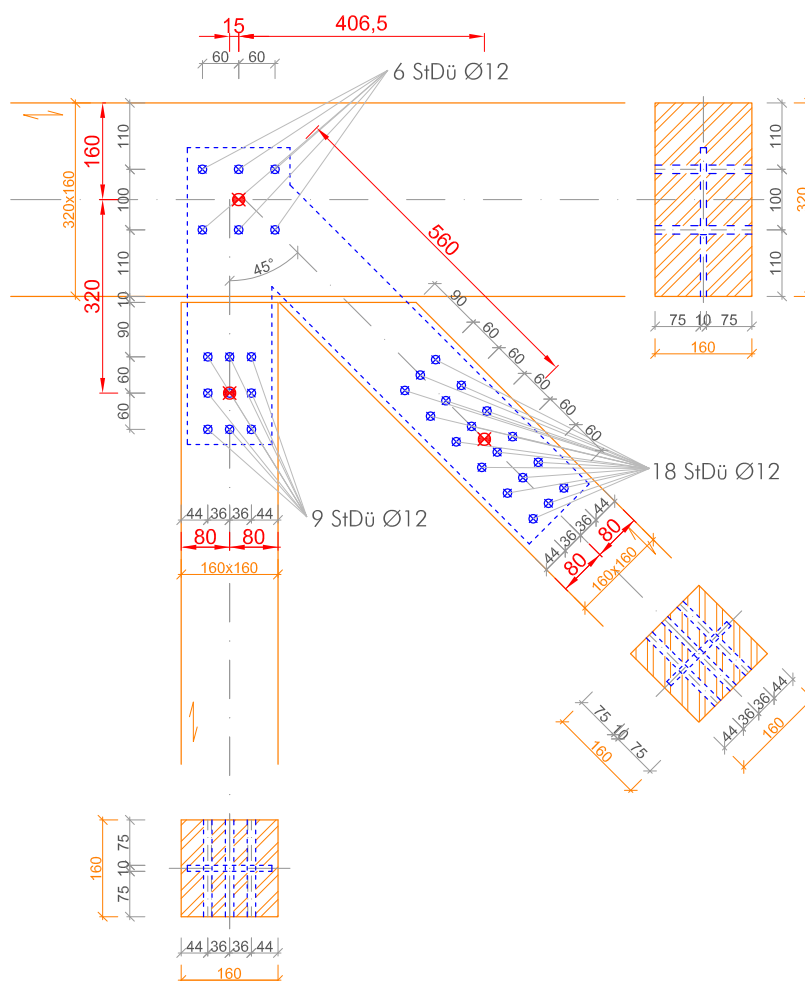


Abb. 5.3 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FA1.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.3 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.3 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	118.351 kN/m
	$K_{\varphi}$	672k Nm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	59.176 kN/m
	$K_{\varphi}$	97k Nm/rad
AnschlussOber/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	39.450 kN/m
	$K_{\varphi}$	97 kNm/rad

Tab. 5.4 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FA1.j

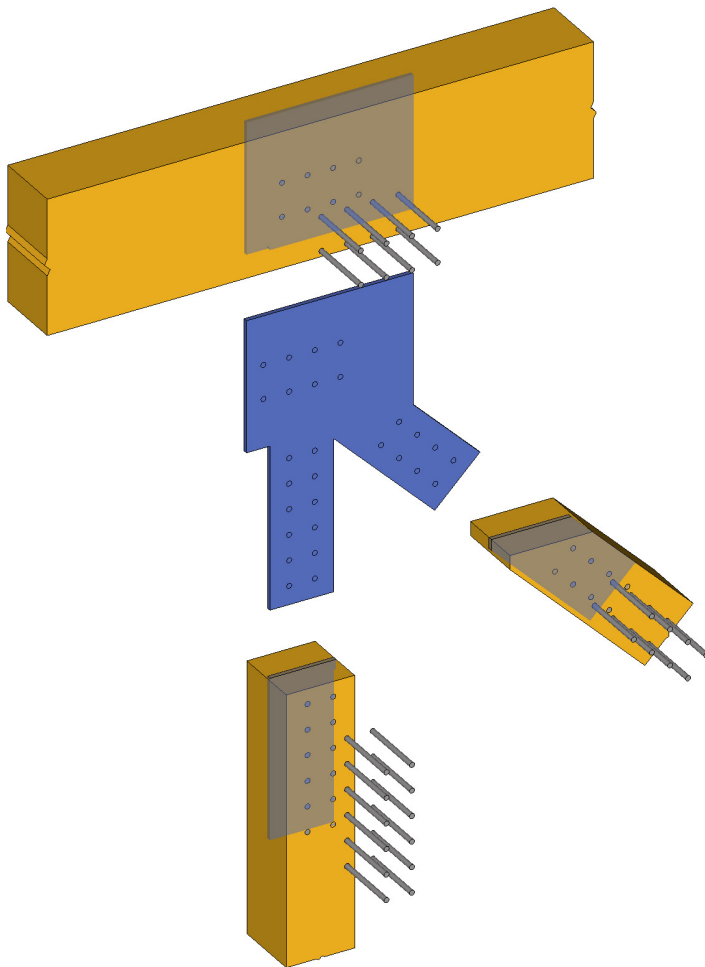


Abb. 5.4 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FA1.j

### 5.3 Fachwerk FA2.j

Die Parameterstudie FA2.j stellt die zweite Modellierung des Streben/Pfosten - Fachwerktypes dar. Nachfolgend eine Auflistung der maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

Beschreibung	
Fachwerktyp	Streben/Pfosten
Spannweite	40,00 m

Tab. 5.5 Informationen zu Fachwerkstudie FA2.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Um eine möglichst gute Querschnittsausnutzung zu erhalten, und um eine gerade Anzahl an Feldern zu erhalten, wurde für die Vordimensionierung L/16 verwendet.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	2500
Obergurt	280x600
Untergurt	280x720
Druckpfosten	200x240
Zugstreben	200x240

Tab. 5.6 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

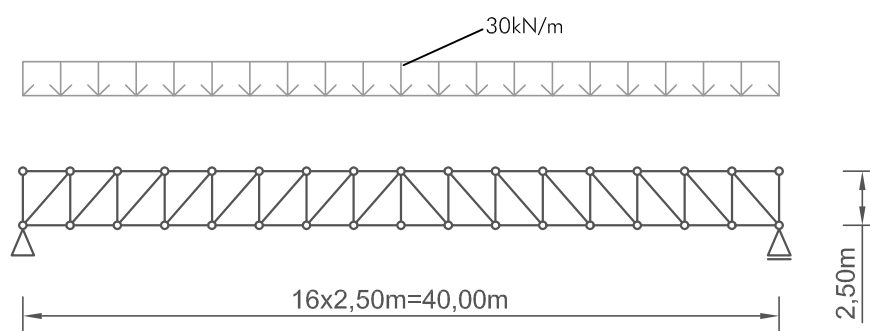


Abb. 5.5 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FA2.j

Mit den aus Parameterstudie FA2.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	4
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	3 x 5
Zugstreben	2 x 4
Obergurt	3 x 3
Untergurt	3 x 3

Tab. 5.7 Anschlüsse des Fachwerkes FA2

Die gesamte Verbindung wird vierschnittig (zwei Stahlbleche) bemessen. Diese Bleche weisen eine Stärke von 10 mm auf.

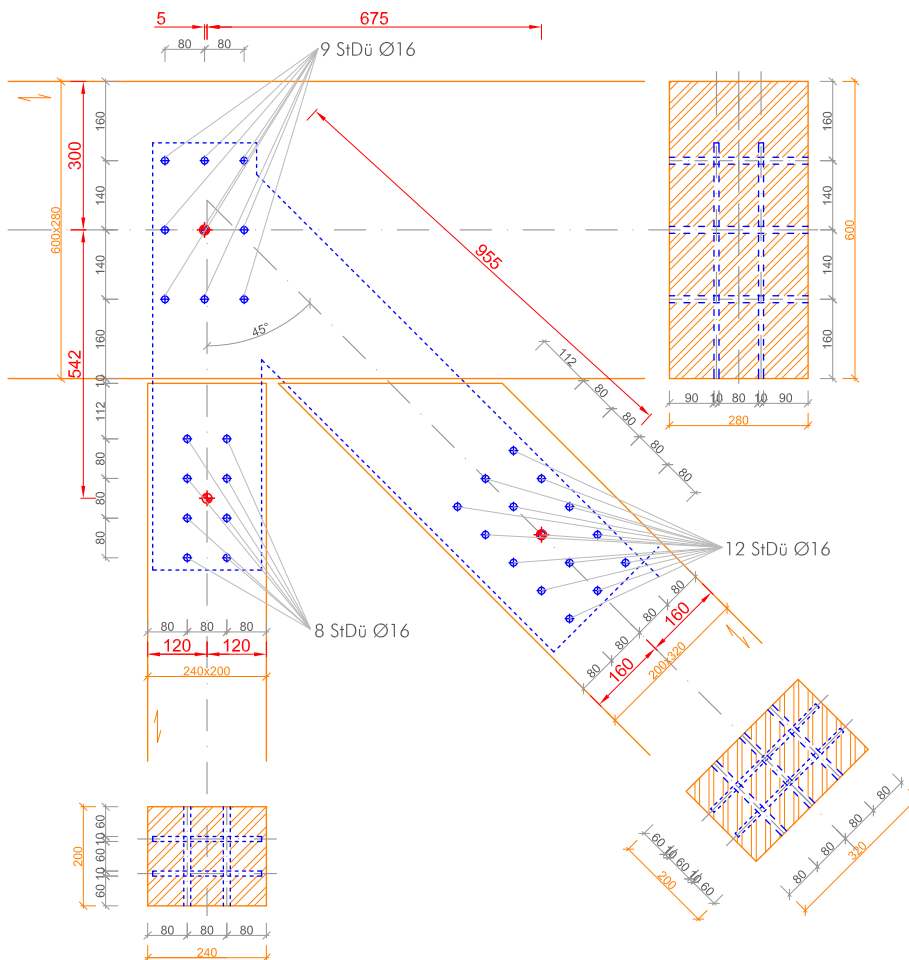


Abb. 5.6 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FA2.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.7 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.6 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	263.003 kN/m
	$K_{\varphi}$	999 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	140.268 kN/m
	$K_{\varphi}$	337 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	157.802 kN/m
	$K_{\varphi}$	684 kNm/rad

Tab. 5.8 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FA2.j

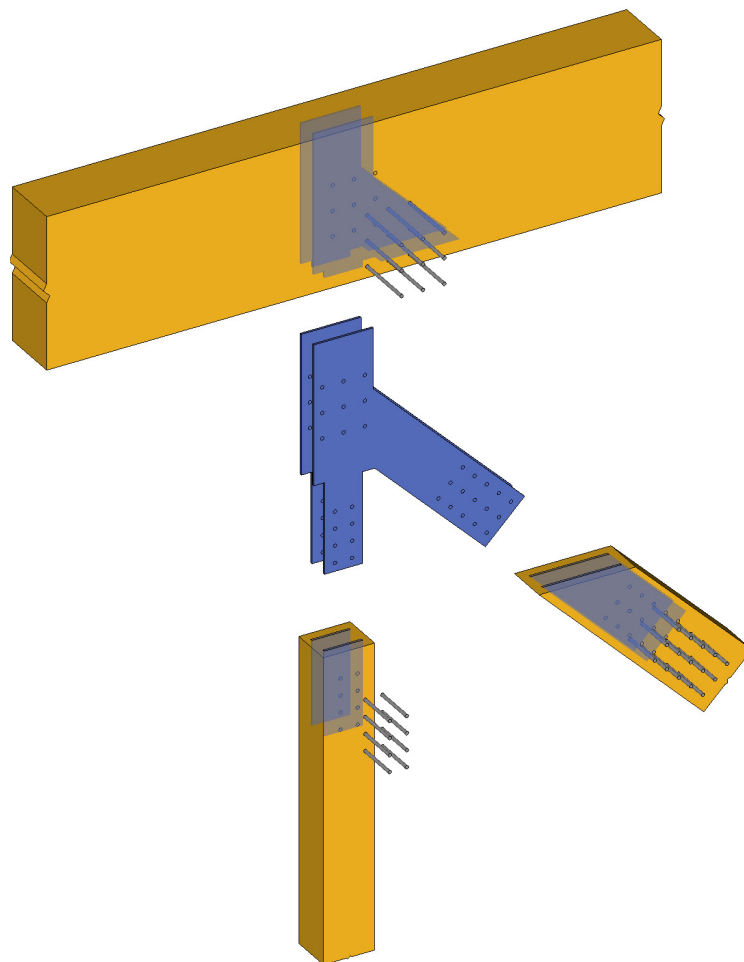


Abb. 5.7 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FA2.j

## 5.4 Fachwerk FA3.j

Die Parameterstudie FA3.j stellt die dritte Modellierung des Streben/Pfosten - Fachwerktypes dar. Nachfolgend die maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

Beschreibung	
Fachwerktyp	Streben/Pfosten
Spannweite	60,00 m

Tab. 5.9 Informationen zu Fachwerkstudie FA3.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Auf Grund der Spannweite von 60,00 m wurde hierbei für die Vorbemessung L/10 gewählt. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von aktuellen, mit dieser Spannweite ausgeführten Bauwerken.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	6000
Obergurt	320x880
Untergurt	320x920
Druckpfosten	320x600
Zugstreben	280x440

Tab. 5.10 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

Um die Nettoquerschnittsnachweise erfüllen zu können, war eine Querschnittsvergrößerung der Druckpfosten von 240x520 auf 320x600 und der Zugstreben von 240x400 auf 280x440 erforderlich.

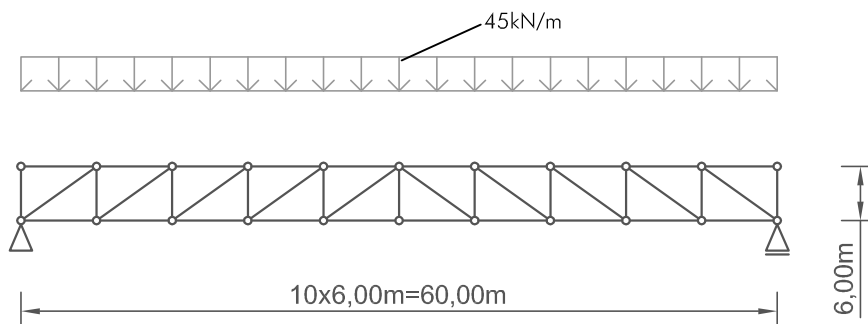


Abb. 5.8 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FA3.j



Mit den aus Parameterstudie FA3.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	6
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	4 x 12
Zugstreben	3 x 8
Obergurt	4 x 6
Untergurt	4 x 6

Tab. 5.11 Anschlüsse des Fachwerkes FA3

Die gesamte Verbindung wird sechsschnittig (drei Stahlbleche) bemessen. Diese Bleche weisen eine Stärke von 10 mm auf.

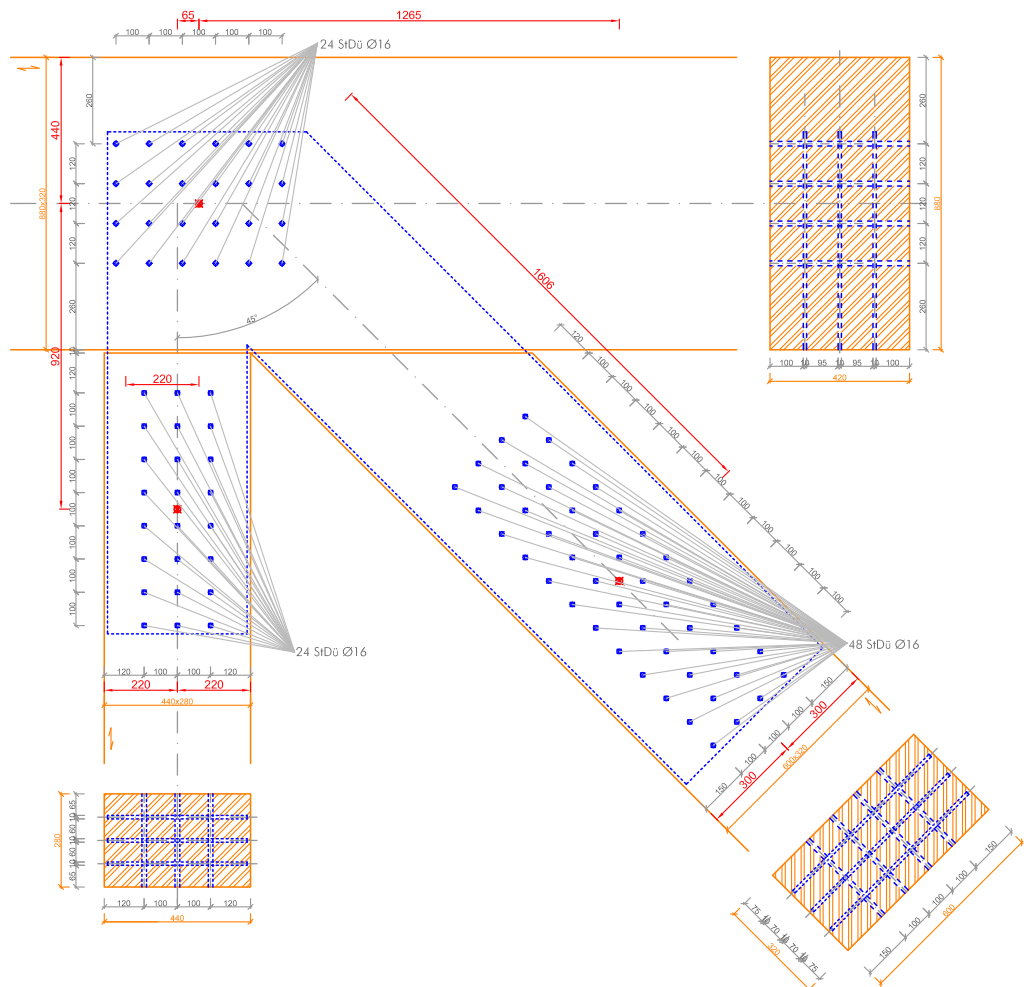


Abb. 5.9 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FA3.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.10 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.9 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	1.262.415 kN/m
	$K_{\varphi}$	27.703 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	631.208 kN/m
	$K_{\varphi}$	6.224 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	631.208 kN/m
	$K_{\varphi}$	4.962 kNm/rad

Tab. 5.12 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FA3.j

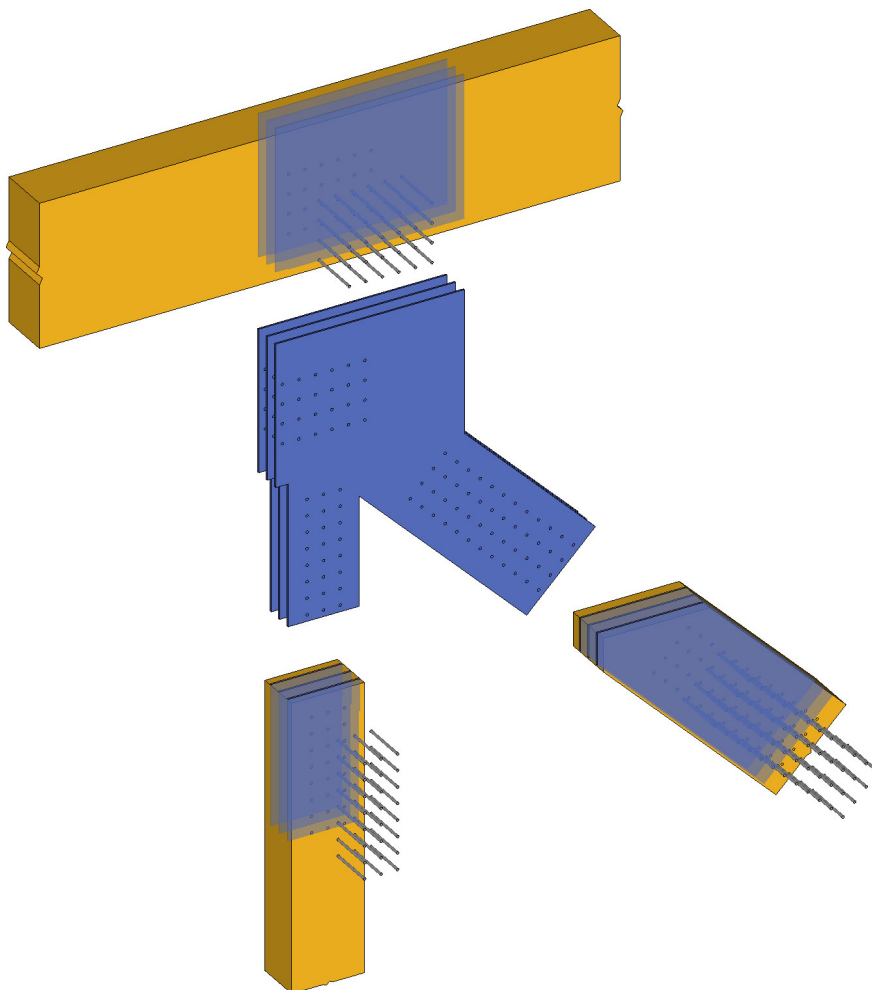


Abb. 5.10 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FA3.j

## 5.5 Fachwerk FB1.j

Die Parameterstudie FB1.j stellt die erste Modellierung des Strebenfachwerktypes dar. Nachfolgend die maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

<b>Beschreibung</b>	
Fachwerktyp	Streben
Spannweite	20,00 m

Tab. 5.13 Informationen zu Fachwerkstudie FB1.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Begründet durch die geringe Spannweite wurde die Vorbemessung mit der Formel L/12 durchgeführt.

<b>Beschreibung</b>	<b>[mm]</b>
Fachwerkhöhe	1670
Obergurt	160x400
Untergurt	160x240
Druckpfosten	160x160
Zugstreben	160x160

Tab. 5.14 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

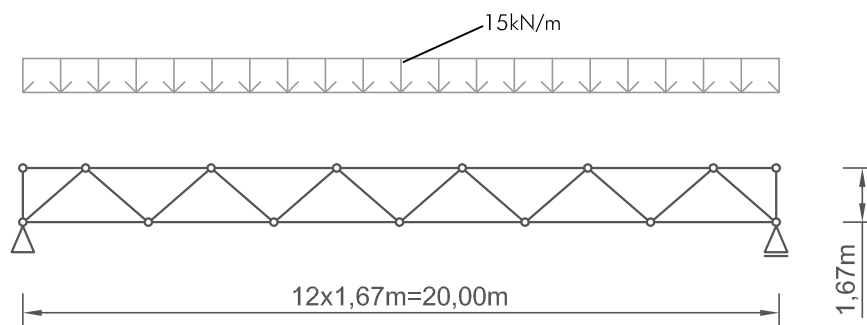


Abb. 5.11 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FB1.j

Mit den aus Parameterstudie FB1.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	2
Stabdübeldurchmesser	12
Druckpfosten	3 x 5
Zugstreben	3 x 3
Obergurt	3 x 3
Untergurt	3 x 3

Tab. 5.15 Anschlüsse des Fachwerkes FB1

Die gesamte Verbindung wird zweischnittig (ein Stahlblech) bemessen. Dieses Blech weist eine Stärke von 10 mm auf.

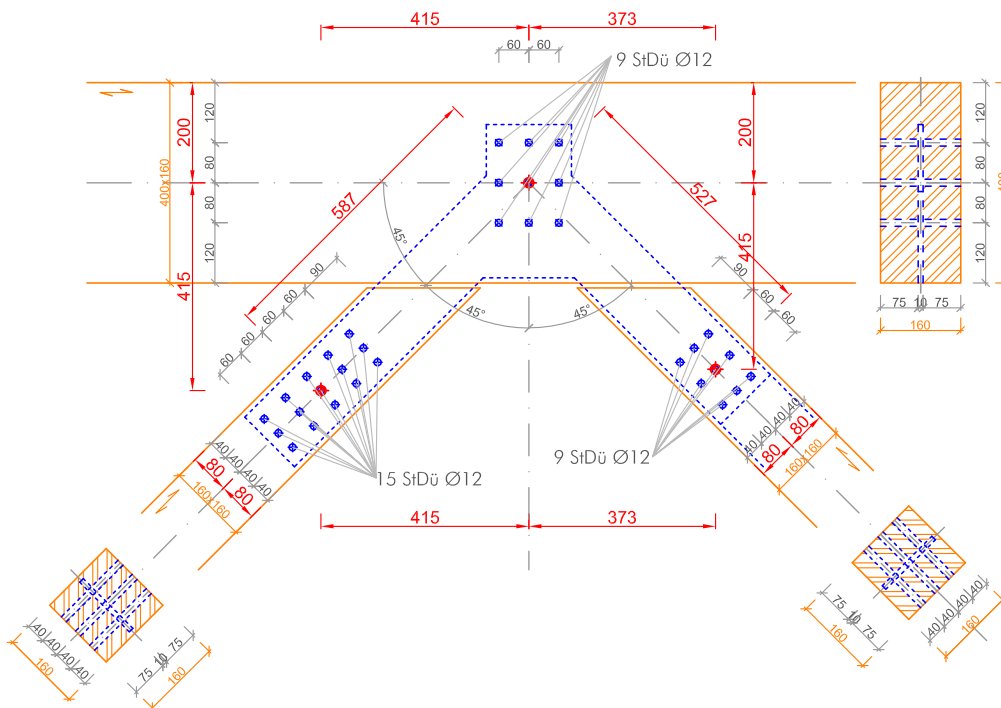


Abb. 5.12 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FB1.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.14 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.12 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
$K_{U,ges}$		98.626 kN/m
$K_{\varphi}$		408 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
$K_{U,ges}$		59.176 kN/m
$K_{\varphi}$		103 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
$K_{U,ges}$		59176k N/m
$K_{\varphi}$		197 kNm/rad

Tab. 5.16 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FB1.j

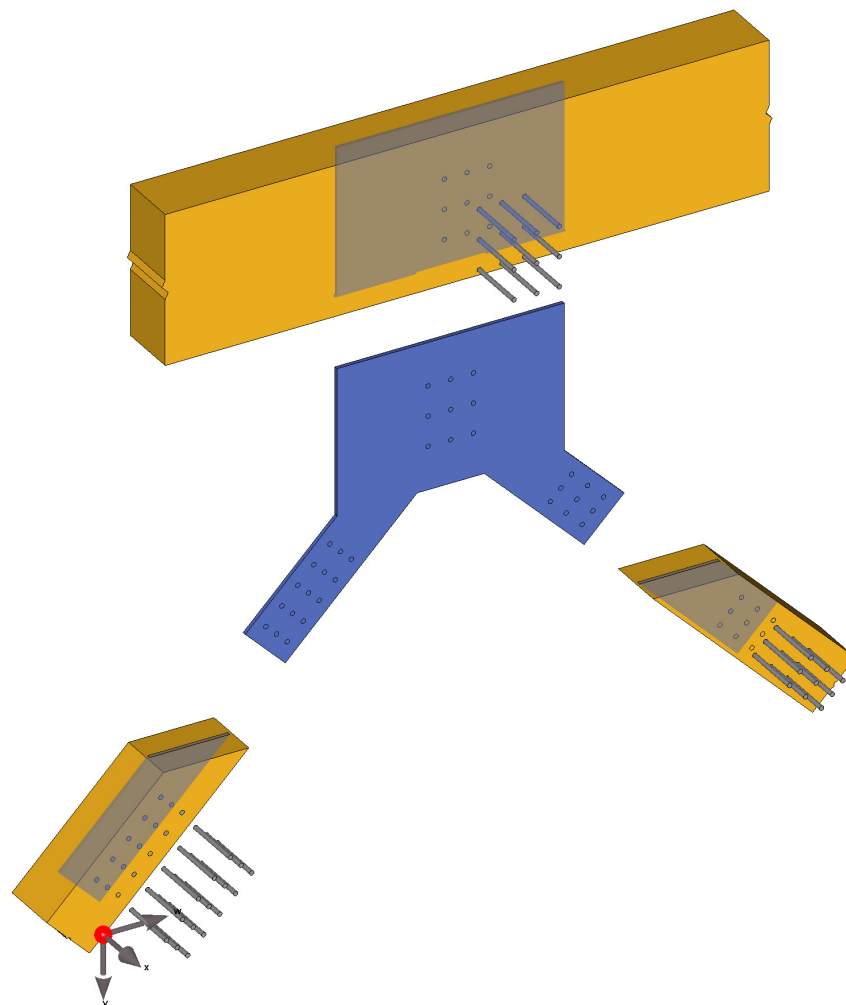


Abb. 5.13 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FB1.j

## 5.6 Fachwerk FB2.j

Die Parameterstudie FB2.j stellt die zweite Modellierung des Strebenfachwerktypes dar. Nachfolgend die maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

Beschreibung	
Fachwerktyp	Streben
Spannweite	40,00 m

Tab. 5.17 Informationen zu Fachwerkstudie FB2.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Begründet durch die geringe Spannweite wurde die Vorbemessung mit der Formel L/12 durchgeführt.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	3330
Obergurt	200x800
Untergurt	200x800
Druckpfosten	200x480
Zugstreben	200x400

Tab. 5.18 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

Um die Nettoquerschnittsnachweise erfüllen zu können, war eine Querschnittsvergrößerung der Druckpfosten von 200x320 auf 200x480 und der Zugstreben von 200x280 auf 200x400 erforderlich.

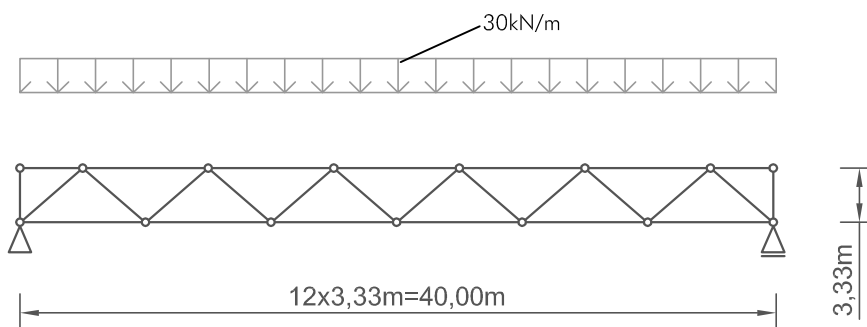


Abb. 5.14 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FB2.j

Mit den aus Parameterstudie FB2.1 erhaltenen Schnittkräften ergaben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	4
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	3 x 8
Zugstreben	3 x 6
Obergurt	3 x 4
Untergurt	3 x 4

Tab. 5.19 Anschlüsse des Fachwerkes FB2

Die gesamte Verbindung wurde vierschnittig (zwei Stahlbleche) bemessen. Diese Bleche weisen eine Stärke von 10 mm auf.

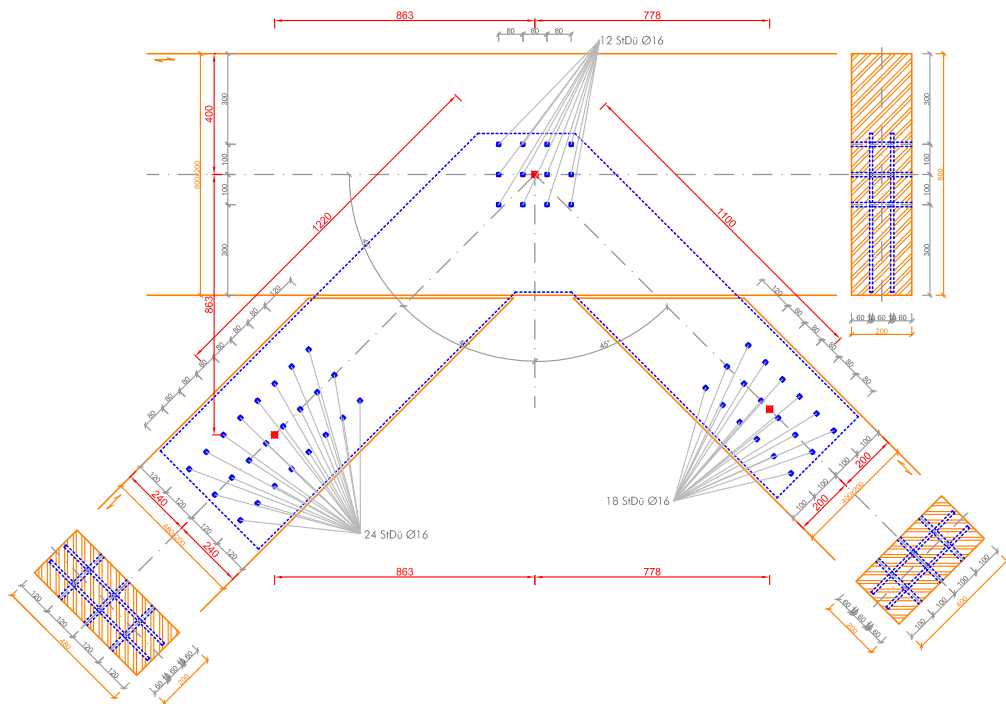


Abb. 5.15 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FB2.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.19 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.15 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	420.805 kN/m
	$K_{\varphi}$	4.545 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	315.604 kN/m
	$K_{\varphi}$	1.999 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	210.403 kN/m
	$K_{\varphi}$	771 kNm/rad

Tab. 5.20 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FB2.j

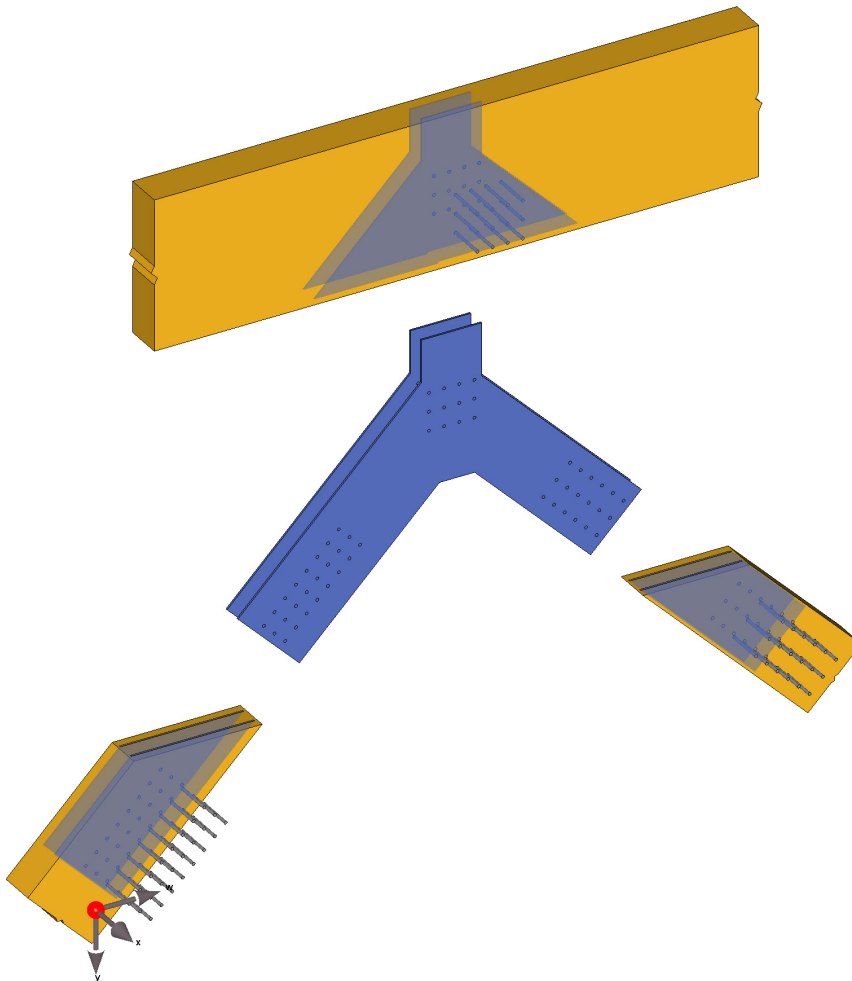


Abb. 5.16 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FB2.j



## 5.7 Fachwerk FB3.j

Die Parameterstudie FB3.j stellt die dritte Modellierung des Strebenfachwerktypes dar. Nachfolgend die maßgebenden Parameter des Fachwerkes, dessen Vorbemessung und die Darstellung der verwendeten Anschlüsse.

Beschreibung	
Fachwerktyp	Streben
Spannweite	60,00 m

Tab. 5.21 Informationen zu Fachwerkstudie FB3.j

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln aus [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs  $L/12$  bis  $L/15$  an. Auf Grund der großen Spannweite und basierend auf Erfahrungen aus der Praxis wurde als Vorbemessungsformel  $L/10$  verwendet.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	6000
Obergurt	320x1200
Untergurt	320x1000
Druckpfosten	280x800
Zugstreben	280x600

Tab. 5.22 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

Um die Nettoquerschnittsnachweise erfüllen zu können, war eine Querschnittsvergrößerung der Druckpfosten von  $200 \times 320$  auf  $200 \times 480$  und der Zugstreben von  $200 \times 280$  auf  $200 \times 400$  erforderlich.

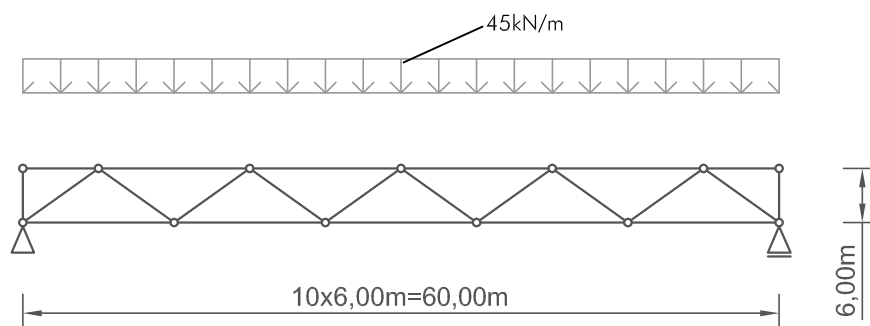


Abb. 5.17 Systemskizze des statischen Systemes für Fachwerkstudie FB3.j

Mit den aus Parameterstudie FB3.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	6
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	5 x 7
Zugstreben	4 x 6
Obergurt	4 x 6
Untergurt	4 x 6

Tab. 5.23 Anschlüsse des Fachwerkes FB3

Die gesamte Verbindung wird sechsschnittig (drei Stahlbleche) bemessen. Diese Bleche weisen eine Stärke von 10 mm auf.

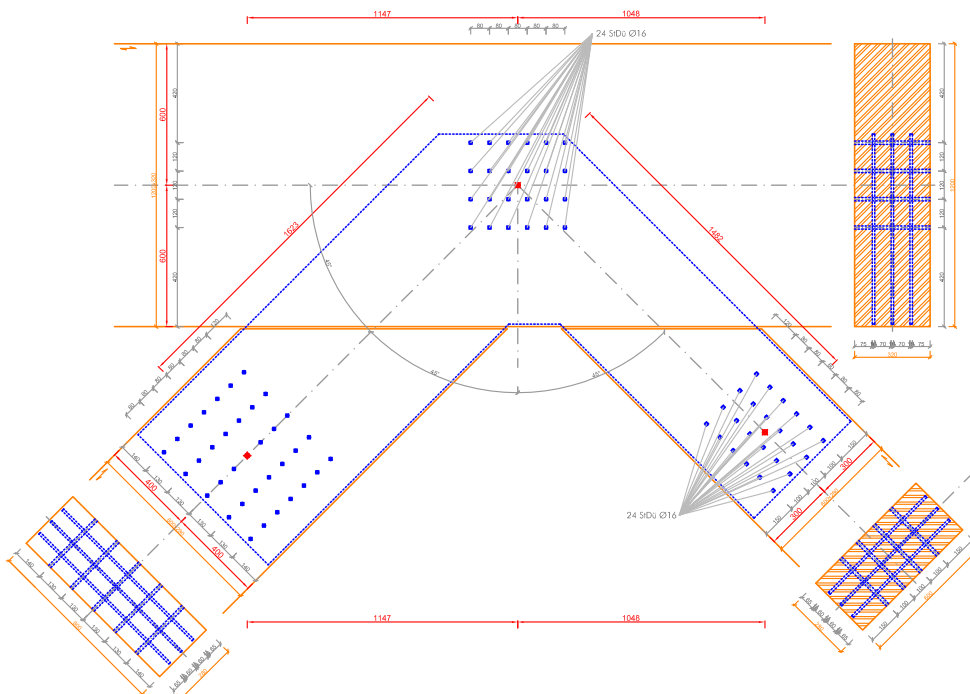


Abb. 5.18 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FB3.j - kein Maßstab

Mit den in Tab. 5.22 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 5.18 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	920.511 kN/m
	$K_{\varphi}$	9.113 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	631.208 kN/m
	$K_{\varphi}$	3.279 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	631.208 kN/m
	$K_{\varphi}$	3.857 kNm/rad

Tab. 5.24 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FB3.j

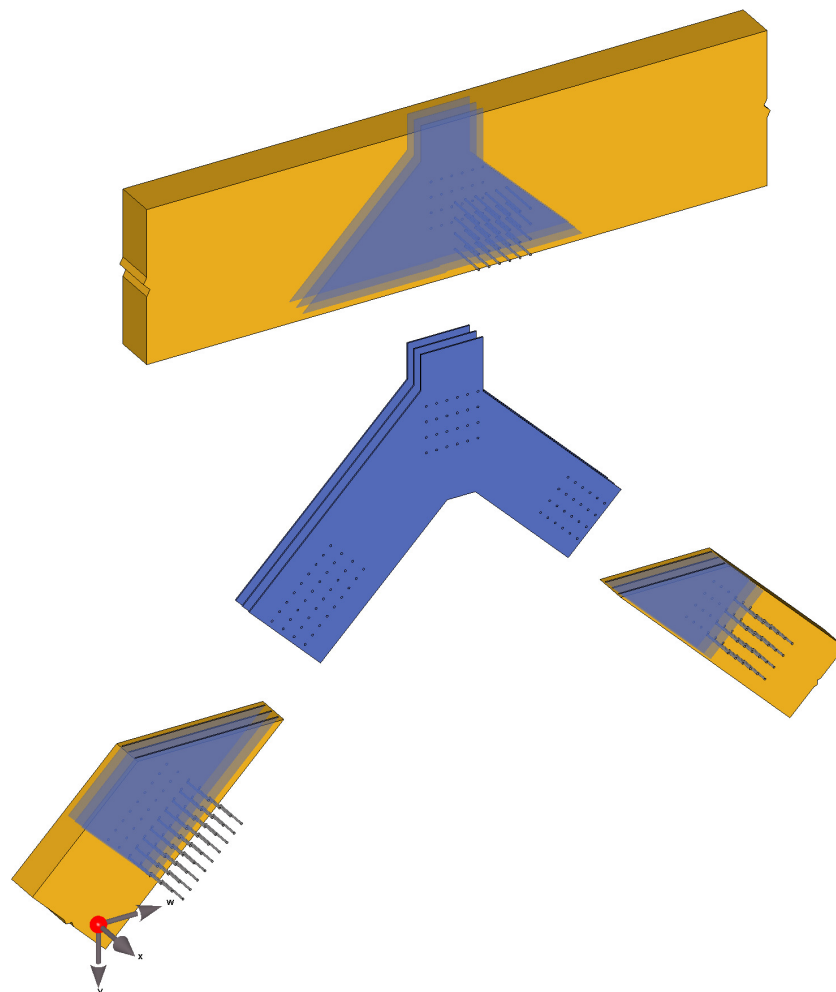


Abb. 5.19 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FB3.j

## 6 Zusätzliche Untersuchungen an Fachwerken

Um zusätzliche Fragestellungen aus den Parameterstudien in Abschnitt 5 beantworten zu können, werden nachfolgend einige Untersuchungen an unterschiedlichen Fachwerken durchgeführt. Mit diesen Fachwerken soll es ermöglicht werden, Fragen, welche im Zuge der Modellierung der anderen Parameterstudie auftraten, zu beantworten, um genauere Aussagen der Gültigkeit dieser zu erhalten.

Dabei entfallen Modellierungsschritte, welche nicht zwingend erforderlich sind, oder werden zu einem größeren Schritt zusammengefasst.

Diese haben die Bezeichnung FC. Die Art der Bezeichnung und die daraus folgende Beschreibung der Spannweiten, Belastungen und Modellierungsschritte wird nicht aus Abschnitt 5. 1 übernommen, sondern an die Anforderungen der Ergebnisse angepasst und daher für jede der nachfolgenden Parameterstudien unterschiedlich definiert.

Es werden folgende Fachwerke in der zusätzlichen Parameterstudie untersucht:

- Fachwerk FC1:  
Abmessungen und Belastungen wie Parameterstudie FB3, jedoch wird die Strebenneigung auf  $60^\circ$  anstelle von  $45^\circ$  abgeändert.
- Fachwerk FC2:  
Robustheitsuntersuchung für den Fachwerktyp FA
- Fachwerk FC3:  
Robustheitsuntersuchung für den Fachwerktyp FB

## 6.1 Fachwerk FC1

Dieses Fachwerk weist die gleichen Eigenschaften wie Parameterstudie FB3 auf. Bei der inneren Form werden jedoch die Streben unter einer Neigung von  $60^\circ$  (bei FB3  $45^\circ$ ) angeordnet. Da hierbei nur der Gesamteinfluss dieser Geometriebedingung untersucht werden soll, werden nur die Modellierungsschritte 1 (ideell), 2 (reell), 5 (reell + Federn) und 7 (Alle Einflüsse) untersucht.

Da sich bei einer Spannweite von 60,00 m und einer definierten Fachwerkhöhe von 6,00 m die Strebenneigung von  $60^\circ$  geometrisch nicht einstellen lässt, wurde stattdessen eine Neigung von  $51^\circ$  verwendet. Demnach reduziert sich die Felderanzahl von fünf (FB3) auf vier. Aus dieser geometrischen Beziehung soll sich der Einfluss auf die Knickfigur des Fachwerkes beschreiben lassen und der daraus folgende Einfluss auf die Schnittkräfte in den Anschlüssen.

Zur Abschätzung der Höhe wurden die Vorbemessungsformeln [23] verwendet. Diese geben für ein Fachwerk dieses Typs L/12 bis L/15 an. Auf Grund der großen Spannweite und aktuellen aus der Praxis wurde als Vorbemessungsformel L/10 verwendet. Des Weiteren ist dadurch die Vergleichbarkeit mit der Parameterstudie FB3.j gegeben.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	6000
Obergurt	400 x 1240
Untergurt	320 x 1000
Druckpfosten	320 x 720
Zugstreben	280 x 520

Tab. 6.1 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

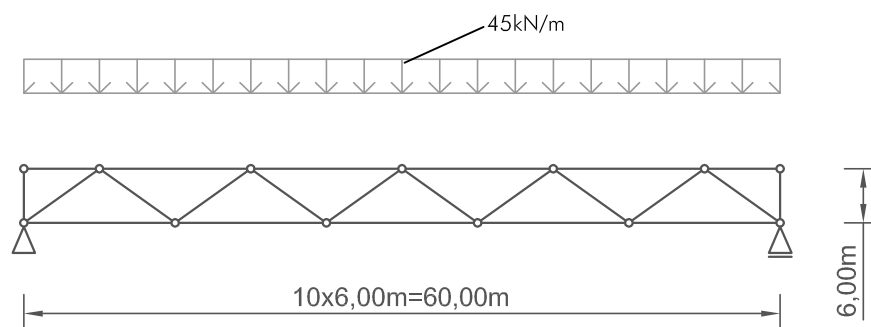


Abb. 6.1 Systemskizze des statischen Systems für Fachwerkstudie FC1

Mit den aus Parameterstudie FC1.1 erhaltenen Schnittkräften ergeben sich folgende Anschlüsse für das Fachwerk:

Beschreibung	
Schnittigkeit	6
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	5 x 7
Zugstreben	5 x 4
Obergurt	5 x 5
Untergurt	5 x 5

Tab. 6.2 Anschlüsse des Fachwerkes FC1

Die gesamte Verbindung wird sechsschnittig (drei Stahlbleche) bemessen. Diese Bleche weisen eine Stärke von 10 mm auf.

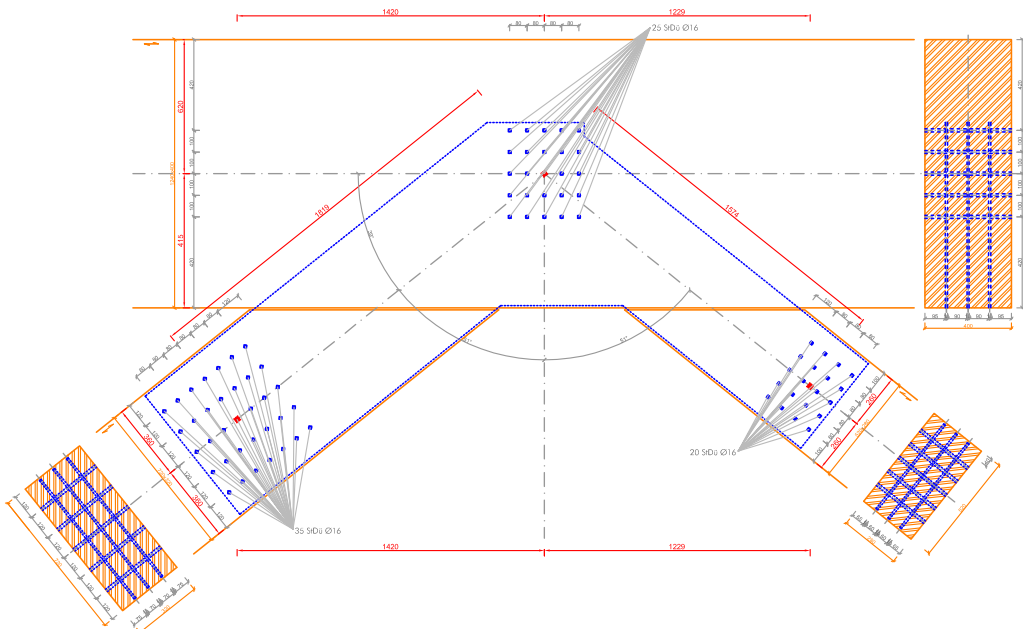


Abb. 6.2 Darstellung des Anschlusses für Parameterstudie FC1 - kein Maßstab

Mit den in Tab. 6.1 beschriebenen Eigenschaften und den Abmessungen aus Abb. 6.2 lassen sich für diese Anschlüsse folgende Steifigkeiten ermitteln:

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{U,ges}$	920.511 kN/m
	$K_{\varphi}$	8.346 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{U,ges}$	526.006 kN/m
	$K_{\varphi}$	1.823 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{U,ges}$	657.508 kN/m
	$K_{\varphi}$	1.403 kNm/rad

Tab. 6.3 Steifigkeiten der Anschlüsse für Parameterstudie FC1

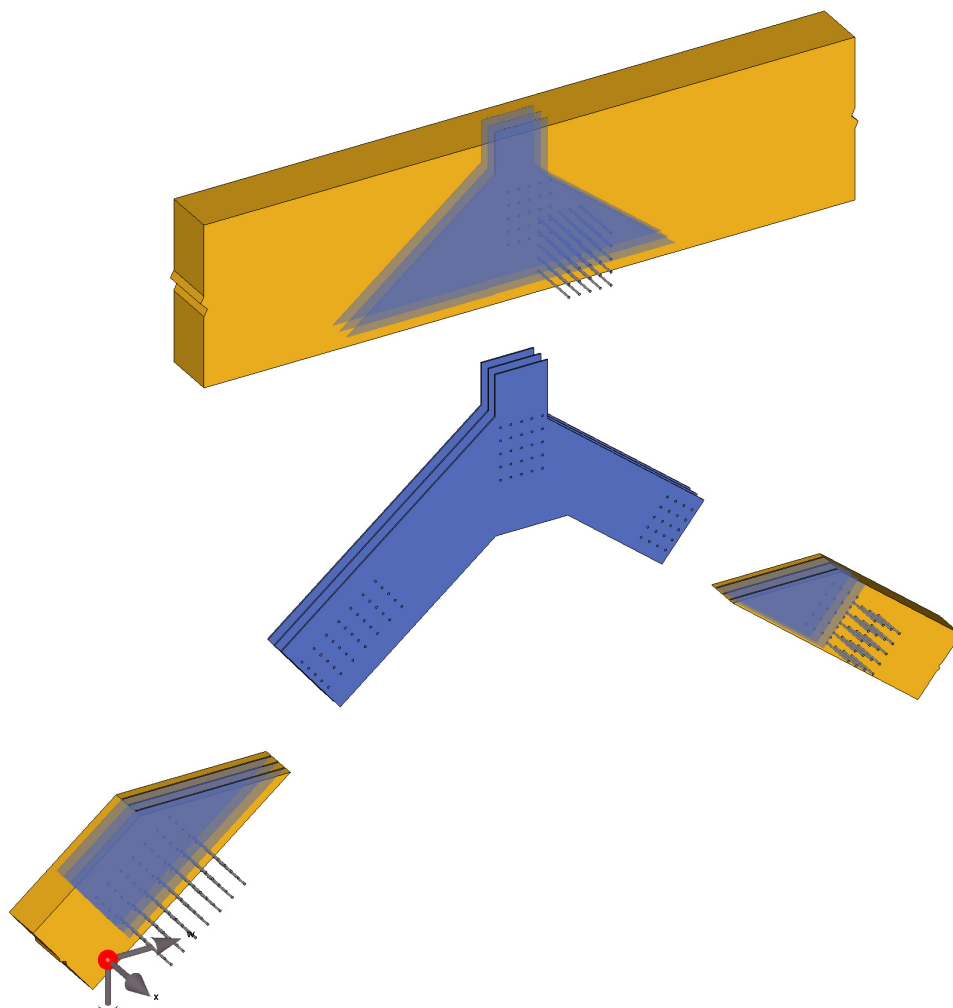


Abb. 6.3 Explosionszeichnung des Anschlusses für Fachwerk FC1

## 6.2 Fachwerk FC2 und FC3

Bei dieser Studie wird der Ausfall eines einzelnen Bauteils der Fachwerktypen FA und FB modelliert. Dadurch kann das Verhalten des Fachwerktyps auf etwaige Schäden untersucht werden. Dazu wird die höchste Modellierungsstufe (7 - Alle Einflüsse) verwendet, da in dieser sowohl die Lastabtragung durch die Anschlusssteifigkeit als auch jene der Stahlbauteile berücksichtigt werden kann.

Dabei wird der Ausfall durch einen Steifigkeitsverlust der Holzbauteile modelliert. Dazu werden folgende Bauteile in der Nähe der Auflager aus der Modellierung entfernt:

- Druckstrebe
- Zugstrebe
- Untergurt

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wird die Belastung des Fachwerkes auf Bemessungsniveau belassen. Dies wird jedoch in der später folgenden Auswertung berücksichtigt.

Die Bezeichnung der Untersuchungen erfolgt zuerst nach der Spannweite (1 bis 3) und anschließend nach dem Ausfall der Bauteile (1 bis 3):

Streben/Pfosten - Fachwerk	Strebenfachwerk
Spannweite 20 m - FC2.1	Spannweite 20 m - FC3.1
FC2.1.1 - Ausfall Druckstrebe	FC3.1.1 - Ausfall Druckstrebe
FC2.1.2 - Ausfall Zugstrebe	FC3.1.2 - Ausfall Zugstrebe
FC2.1.3 - Ausfall Untergurt	FC3.1.3 - Ausfall Untergurt
Spannweite 40 m - FC2.2	Spannweite 40 m - FC3.2
FC2.2.1 - Ausfall Druckstrebe	FC3.2.1 - Ausfall Druckstrebe
FC2.2.2 - Ausfall Zugstrebe	FC3.2.2 - Ausfall Zugstrebe
FC2.2.3 - Ausfall Untergurt	FC3.2.3 - Ausfall Untergurt
Spannweite 60 m - FC2.3	Spannweite 60 m - FC3.3
FC2.3.1 - Ausfall Druckstrebe	FC3.3.1 - Ausfall Druckstrebe
FC2.3.2 - Ausfall Zugstrebe	FC3.3.2 - Ausfall Zugstrebe
FC2.3.3 - Ausfall Untergurt	FC3.3.3 - Ausfall Untergurt

Tab. 6.4 Auflistung der Parameterstudien FC2 und FC3

Um eine Aussage über die Robustheit des Systems erhalten zu können, wurden die Ergebnisse der Bauteilbemessungen mit den Sicherheitsfaktoren für Last und Material korrigiert. Aus dieser Berechnung lässt sich eine ungefähre Aussage zum Verhalten des gesamten Tragwerks im Falle eines Bauteilausfalles treffen.



## 7 Darstellung und Vergleich der Ergebnisse

Zum Vergleich der Ergebnisse aus der Parameterstudie in Kapitel 5 werden an dieser Stelle die jeweiligen Fälle einzeln untersucht, um die Gegenüberstellung der gesamten Ergebnisse zu ermöglichen. Am Ende der Parameterstudie soll ein Vergleich der einzelnen Fachwerktypen und ihre „Anfälligkeit“ auf die beschriebenen Systemeffekte untersucht werden. Dazu werden in den einzelnen Fachwerken die Einflüsse der Modellierung auf folgende Punkte dargestellt und diskutiert:

- **Verformungsverhalten des Fachwerkes**  
Um den Einfluss der Feder auf den SLS darzustellen, werden die Verformungen des gesamten Fachwerkes betrachtet. Hierbei wird kein, wie in den Bemessungsnormen definierter Nachweisfall verwendet, sondern nur die aus der reinen Baustatik bekannte Beziehung  $L/u$ .
- **Schnittkräfte in den Stäben**  
Ebenso wie die Verformungen wird hierbei der geänderte Kraftfluss im gesamten Fachwerk untersucht. Durch die Modellierung der Anschlüsse folgt eine geänderte Steifigkeit des Systems, welche sich in einer Schnittkraftumlagerung ausdrückt.
- **Änderung der Ausnutzung in maßgebenden Stäben**  
Aus den Änderungen der Schnittkräfte ergibt sich eine Änderung der maßgebenden Nachweise für einen Stab im Fachwerk.
- **Verhalten der Anschlüsse in der Modellierung**  
Die Schnittkraftumlagerung, resultiert aus der Steifigkeit der Anschlüsse, welche in der ersten Bemessung des Anschlusses nicht vorhanden ist. Diese können eventuell das Überschreiten der Traglast des Anschlusses mit sich ziehen und notwendigerfalls zu einer erforderlichen Anpassung oder Verstärkung des Anschlusses führen.
- **Robustheit der Fachwerktypen**  
Hier wird das Verhalten der einzelnen Fachwerktypen hinsichtlich des Ausfalls bestimmter Bauteile analysiert.

Zur Vereinfachung der Darstellung werden einige Modellierungsschritte zusammengefasst. So werden lediglich die Schritte 1 (ideell), 2 (reell), 5 (reell + Federn) und 7 (Alle Einflüsse) dargestellt. Falls notwendig, werden zusätzliche Darstellungen angeführt, um gewisse Unterschiede darstellen zu können.

In diesem Kapitel soll dabei nur die Auswertung der einzelnen Parameterstudien nähergebracht werden. Eine gesamte Auswertung dieser und eine mögliche Empfehlung für die Praxis und der Bedarf einer Anpassung werden erst im nachfolgenden Kapitel 5 geführt. Um den Vergleich aller Ergebnisse zu ermöglichen, werden bei den nachfolgenden Darstellungen die gleichen Skalen verwendet.

## 7.1 Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten eines Tragwerkes ist in der Nachweisführung von maßgeblichem Einfluss. Zwar spiegeln die in ÖNORM B 1995-1-1 [5] definierten SLS-Nachweise kein Bauteil- oder Bauwerkversagen wider, jedoch haben sie einen maßgebenden Einfluss auf die Wahrnehmung des Tragwerkes und das indirekte Sicherheitsgefühl der Benutzer.

Um die Verwendung der bereits für die Schnittkraftermittlung und die Nachweise der Anschlüsse erstellten Berechnungen zu ermöglichen, werden die Verformungen mit den Lasten aus den ULS-Lastfällen berechnet. Dadurch wird zwar kein quantitativer Nachweis der Verformungen ermöglicht, jedoch kann eine qualitative Aussage zum Allgemeinen Verformungsverhalten getroffen werden.

Durch die Modellierung der Federn in den Anschlüssen wird dem Bauwerk eine zusätzliche Steifigkeit zugewiesen. Im Fall der Drehfedern führt dies zu deren „Versteifung“, da diese im Vergleich zu einem Voll- oder Halbgelenk eine bedeutend höhere Steifigkeit aufweisen. Bei den Wegfedern ist dies der umgekehrte Fall, da die Wegfedern im Vergleich zu den Voll- oder Halbgelenken nachgiebiger sind. Daraus lässt sich in erster Annahme schließen, dass eine ungünstige Zunahme der Verformungen durch die Wegfedern verursacht wird.

Auf den nachfolgenden Seiten wird die Auswertung der einzelnen Parameterstudien (FA bis FC) durch Vergleich ihrer jeweiligen Verformungsverhalten geführt. Dabei wird das Verhalten des Fachwerkes durch folgende Aussagen beschrieben:

- Verformungsveränderung normiert

Hierbei wird als Ausgangswert der Gegenüberstellung die Verformung in der Modellierungsphase „ideeles Fachwerk“ verwendet. Dadurch ist es möglich, den direkten Einfluss auf die einzelnen Fachwerktypen durch die Modellierungsschritte zu sehen.

- Verformungsveränderung L/U

Es werden die Ergebnisse der einzelnen Modellierungsschritte im Verhältnis von Spannweite zu Verformung gegenübergestellt. Durch diese Gegenüberstellung wird der Einfluss der Spannweite mit in den Vergleich genommen, wodurch ein möglicher Einfluss dieser erkennbar sein soll.

Da bei dieser Auswertung nur ein Wert jeder Parameterstudie vorliegt, werden hier bereits alle Studien der einzelnen Fachwerktypen zusammengefasst.

## 7. 1. 1 Fachwerktyp FA - Pfosten/Streben - Fachwerk

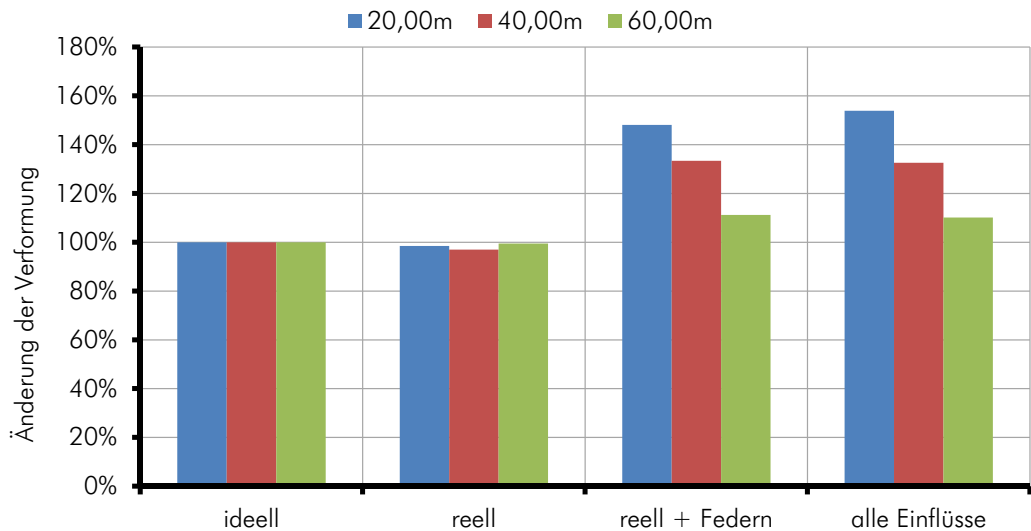
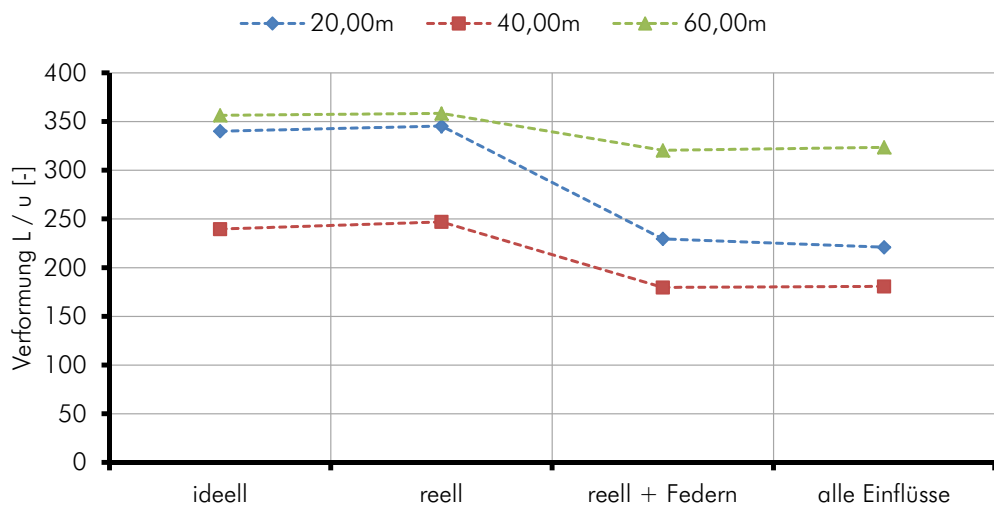


Abb. 7.1 normiertes Verformungsverhalten Fachwerktyp FA

Abb. 7.2 Verformungsverhalten  $L/u$  Fachwerktyp FA

In beiden Darstellungen ist ersichtlich, dass der Einfluss der Modellbildung mit der Spannweite bei Pfosten/Streben - Fachwerken abnimmt. So ist bei der geringsten Spannweite von 20,00 m der Einfluss auf die Verformung weit über 50 % (siehe Abb. 7.1), wohingegen bei einer Spannweite von 60,00 m nur mehr eine Differenz von rund 10 % auftritt. Durch das Ergebnis für eine zwischen dem oberen (60,00 m) und dem unteren (20,00 m) Grenzwert liegende Spannweite von 40,00 m lässt sich hier ein linearer Einfluss der Spannweite auf das Verformungsverhalten erkennen.

## 7.1.2 Fachwerktyp FB - Strebenfachwerk

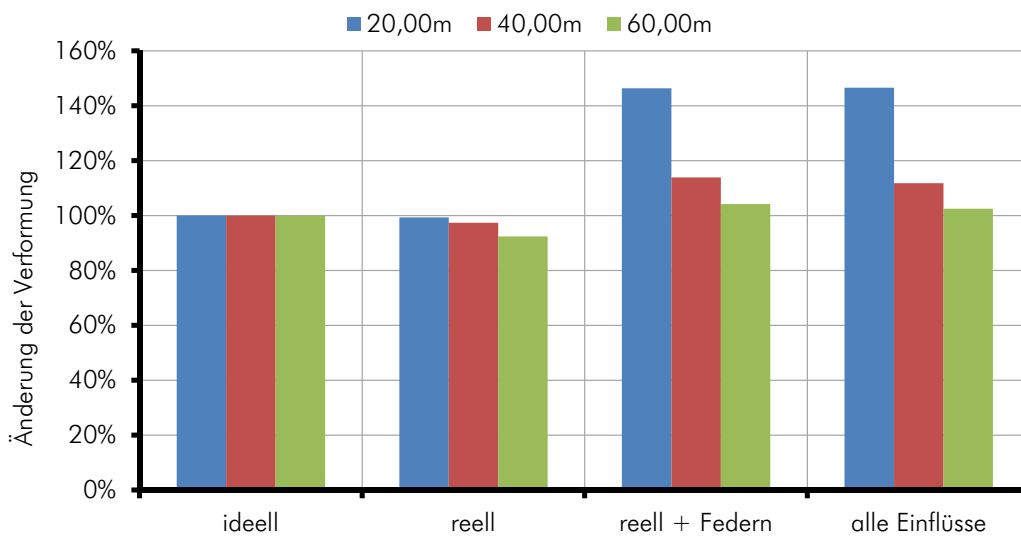
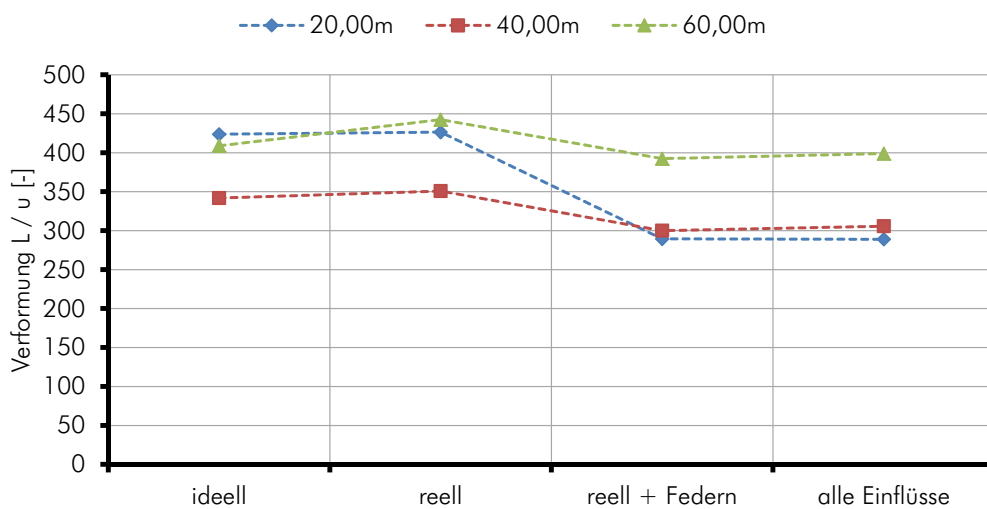


Abb. 7.3 normiertes Verformungsverhalten Fachwerktyp FB


 Abb. 7.4 Verformungsverhalten  $L/u$  Fachwerktyp FB

Bei Strebenfachwerken lässt sich ebenso wie bei Streben/Pfosten - Fachwerken ein Zusammenhang zwischen der Modellbildung und der Spannweite erkennen. Jedoch wird ersichtlich, dass dieser nicht direkt linear abgebildet werden kann, da die Ergebnisse einem größeren Streubereich unterliegen und keine lineare Regression von der Spannweite auf das Verformungsverhalten möglich ist.

## 7.2 Schnittkräfte in den Stäben

Eine Änderung der Schnittkräfte innerhalb eines Bauteils kann folgende Auswirkungen haben:

- Überlastung des Bauteils

Bei einer zu hohen Änderung der Belastung auf ein Bauteil kann die Tragfähigkeit diesen überschritten werden, was zu einer Beschädigung und schlimmstenfalls zum Versagen des Bauteils führt. Um dies zu verhindern, sind einerseits die Sicherheiten des Bemessungskonzeptes auf der Last- und Materialseite vorhanden, andererseits werden gewisse Schwankungen in der ingenieurmäßigen Auslegung des Tragwerkes mitberücksichtigt.

- Änderung der maßgebenden Beanspruchung

Gerade bei Fachwerken (und Stabwerken allgemein) kann die Änderung der Belastungsrichtung, oder eine Lastumverteilung durch geänderte Steifigkeitsverhältnisse zu einer Abänderung der Beanspruchung eines Bauteils führen. Dieser Fall kann bei Fachwerken und deren Zug- und Druckelementen oft eintreten und daraus resultierend für eine unplanmäßige Beanspruchung, welche ein Bauteil wieder überlasten könnte, hervorrufen.

- Änderung der Versagensmechanismen

Ändern sich die Schnittkräfte in einem System, so kann es daraus resultierend zu einer Änderung der Versagensmechanismen, welche nachgewiesen werden müssen, kommen. Gerade bei druckbeanspruchten Bauteilen kann dies bei Auftreten eines Momentes zu einem sehr raschen Anstieg der Spannungen führen, welche wiederum zu einer Beschädigung oder dem Versagen des Bauteils führen können.

Nachfolgend werden die Schnittkraftverläufe der einzelnen Fachwerktypen und Spannweiten dargestellt, um den Einfluss der Modellierung auf die Schnittkräfte in den einzelnen Bauteilen darzustellen. Dabei wurde immer die maximal auftretende Schnittkraft im gesamten System dargestellt.

## 7.2.1 Fachwerktyp FA - Pfosten/Streben - Fachwerk

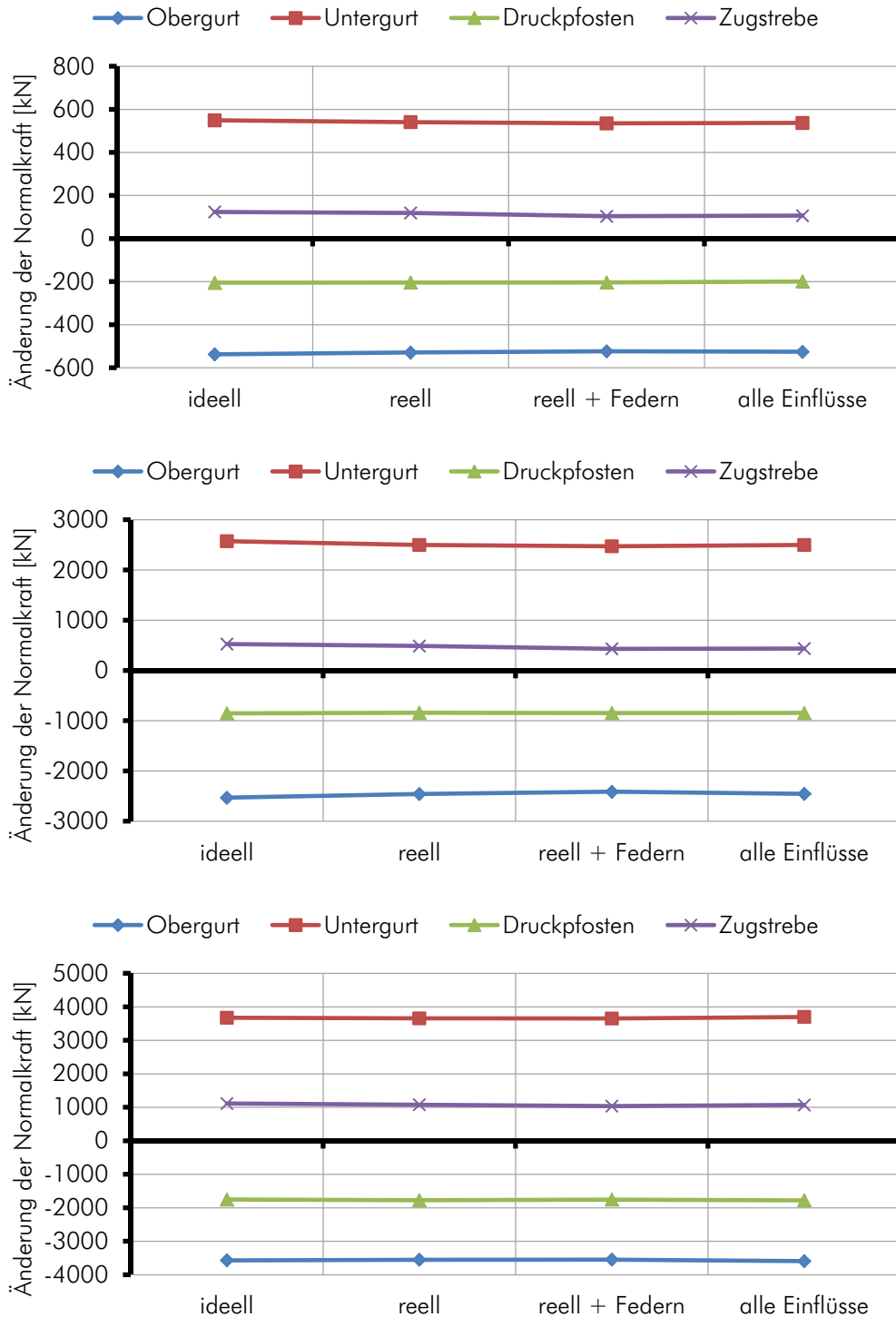


Abb. 7.5 Normalkraftverläufe des Fachwerktyps FA; L = 20 m (oben); L = 40 m (Mitte); L = 60 m (unten)

Die Normalkraftverläufe in den Stäben weisen durchgehend ein konstantes Verhalten auf.

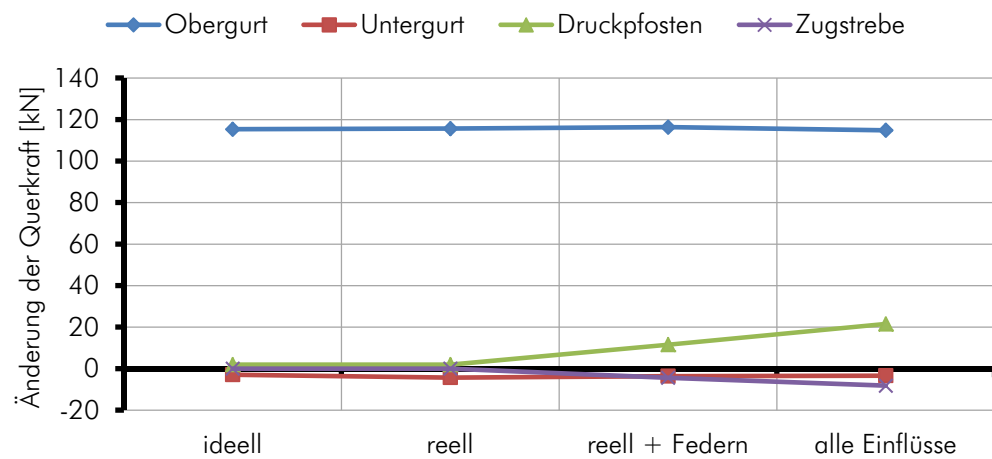
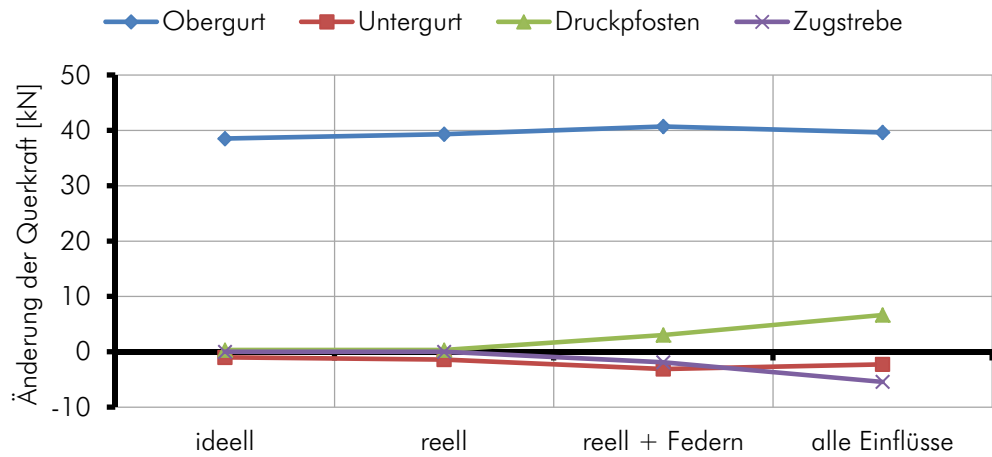
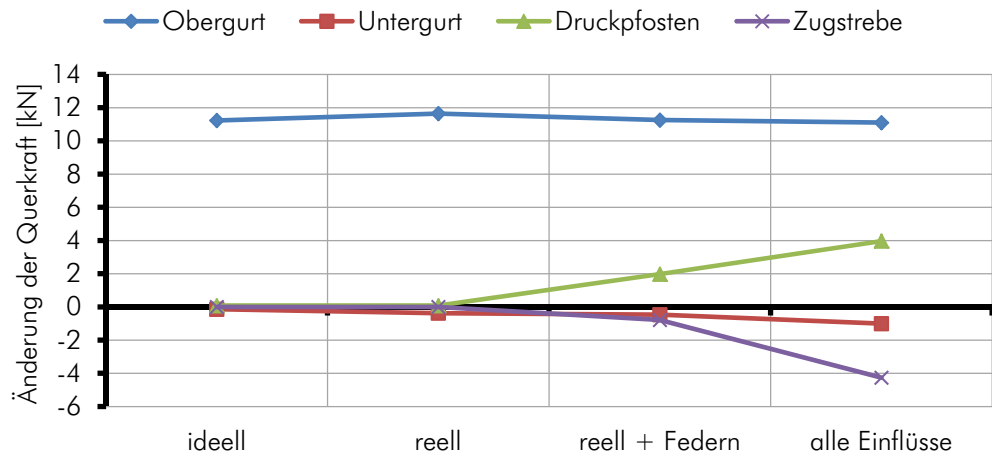


Abb. 7.6 Querkraftverläufe des Fachwerktyps FA; L = 20 m (oben); L = 40 m (Mitte); L = 60 m (unten)

Im Gegensatz zu den Normalkraftverläufen steigen die Querkräfte vor allem in den Druckpfosten und Zugstreben mit zunehmender Modellierung an. Dies lässt sich auf die Rotationskapazität der Anschlüsse zurückführen, welche Momente aufnehmen können, aus welchen zwingend auch Querkräfte resultieren.

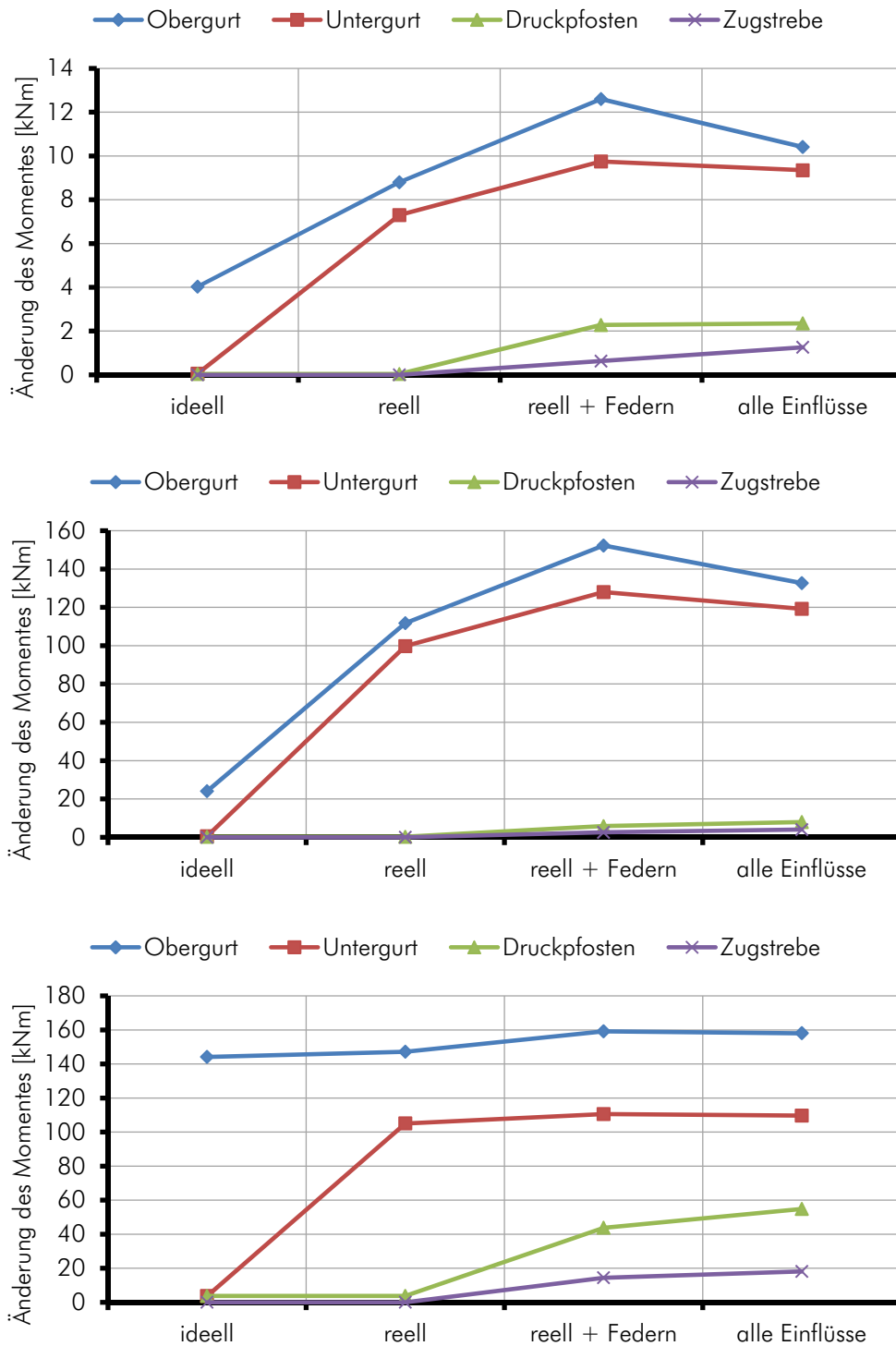


Abb. 7.7 Momentenverläufe des Fachwerktyps FA; L = 20m (oben); L = 40m (Mitte); L = 60m (unten)

Die Änderung der Momente in den Ober- und Untergurten ist durch den Sprung von einem Feldmoment (ideell) auf ein Stützmoment (reell) gekennzeichnet. Bei den Druck- und Zugelementen ist der Anstieg in den Momenten durch das Auftreten von Drehfedern in den Anschlüssen gekennzeichnet.



7. 2. 2 Fachwerktyp FB - Strebenfachwerk

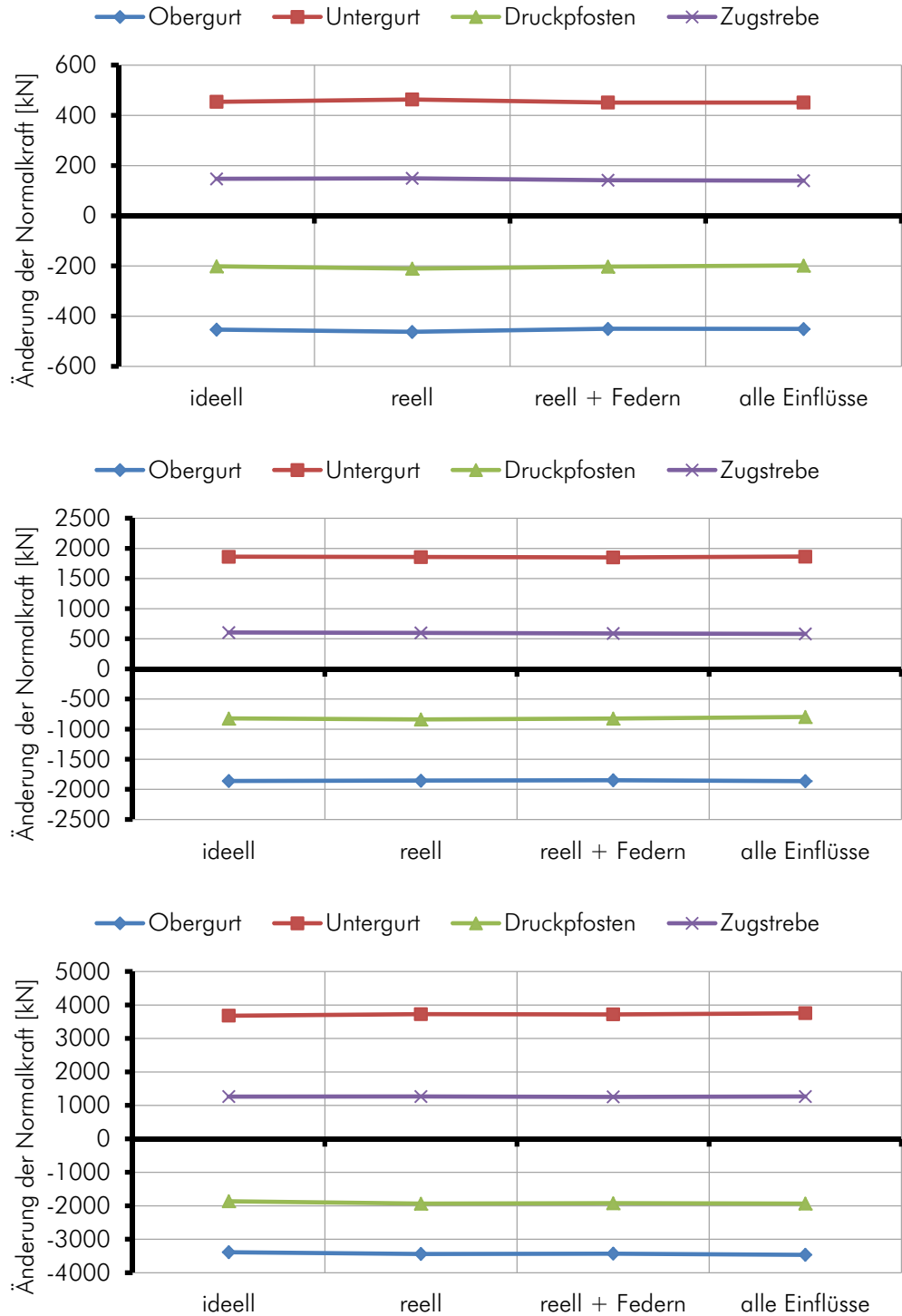


Abb. 7.8 Normalkraftverläufe des Fachwerktyps FB; L = 20m (oben); L = 40m (Mitte); L = 60m (unten)

Ebenso wie bei Streben/Pfosten - Fachwerken sind die Normalkraftverläufe von Strebenfachwerken über alle Modellierungsschritte annähernd konstant.

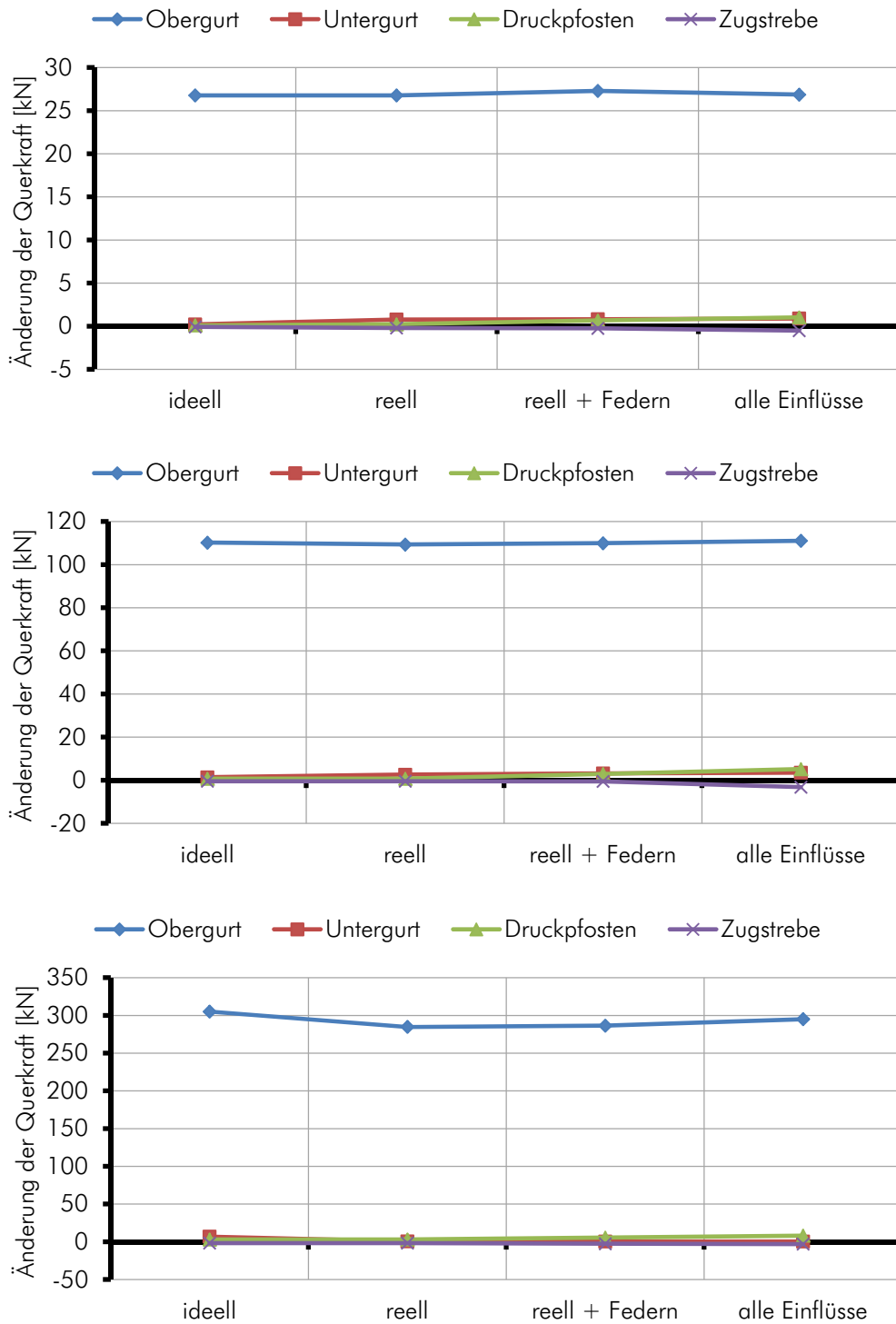


Abb. 7.9 Querkraftverläufe des Fachwerktyps FB; L = 20m (oben); L = 40m (Mitte); L = 60m (unten)

Durch die drei obigen Diagramme wird ersichtlich, dass bei Strebenfachwerken eine bedeutend geringere Zunahme der Querkräfte in den Stäben vorliegt, als dies bei Streben/Pfosten - Fachwerken der Fall ist.

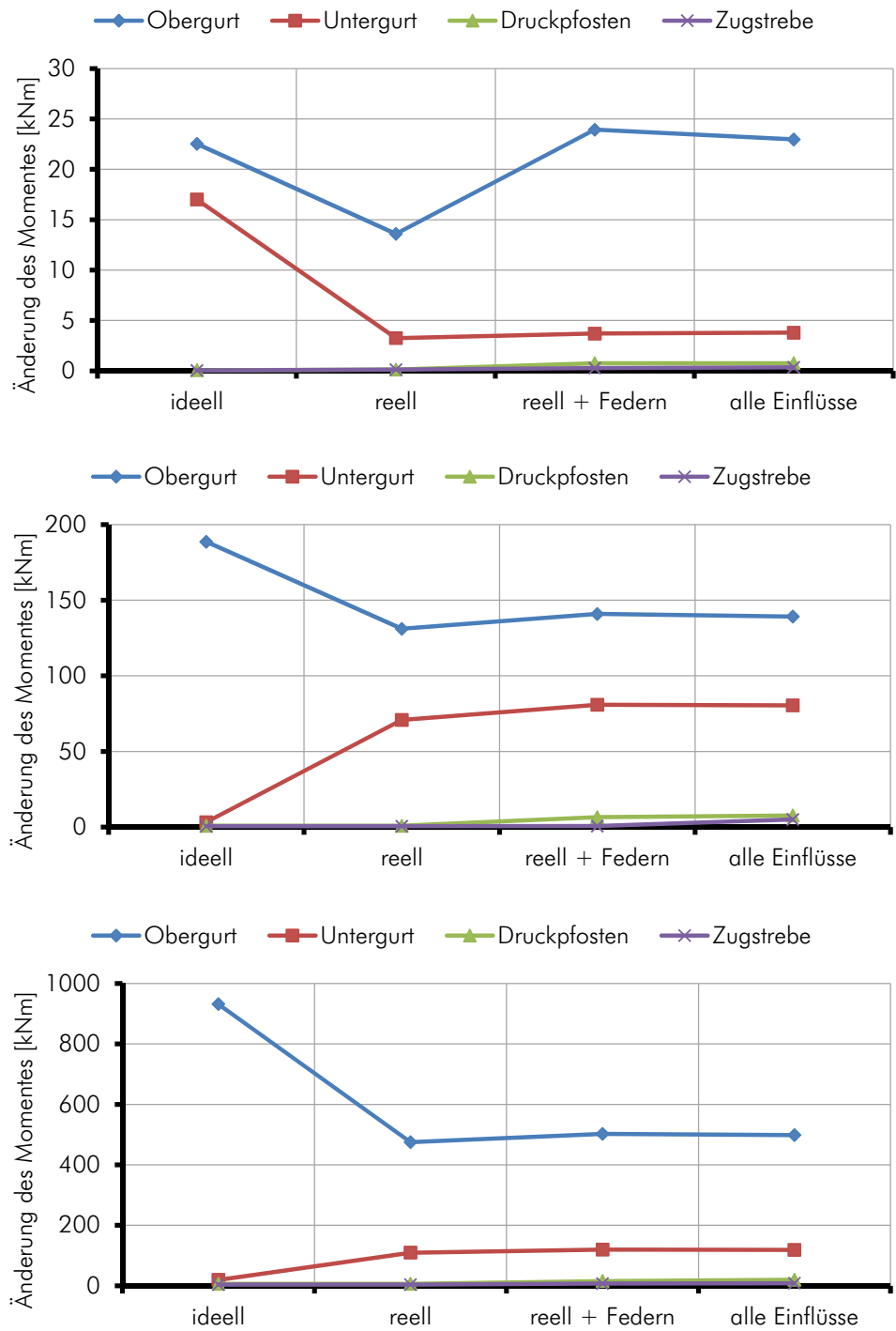


Abb. 7.10 Momentenverläufe des Fachwerktyps FB; L = 20m (oben); L = 40m (Mitte); L = 60m (unten)

### 7.3 Änderung der Ausnutzung

Aus den Änderungen in den Schnittkräften lässt sich auch eine Änderung der Ausnutzung der Bruttoquerschnitte in der Bemessung ablesen.

Durch einen Zuwachs der Normalkräfte kann es zu einem Versagen des Querschnittes auf Zug und Druck oder zu einem Bauteilversagen durch Knicken kommen. Hier lässt sich kein direkter Unterschied aus der Änderung der Normalkraft ablesen, da sich nicht nur die im Querschnitt wirkende Normalkraft ändert, sondern auch dessen Lagerungsbedingungen. So sind die Knicklängen bei der Bemessung als ideales Fachwerk größtenteils gleich der Stablänge. Hier ist nur eine geringe Anpassung an die Gesamtknickfigur des Fachwerkes zu berücksichtigen. Ab dem Zeitpunkt, ab welchem sich Feder (sowohl Weg-, als auch Drehfedern) in der Berechnung befinden, kommt es zu einer starken Variation der Knicklängen. Bei der Modellierung einer reinen Wegfeder erhöhen sich hierbei die Knicklängen ( $\beta > 1$ ), da die Steifigkeit des Gesamtsystems verändert wird. Durch eine Drehfeder wird das Fachwerk steifer, als bei einer Modellierung eines ideellen Fachwerkes, wodurch der Knickbeiwert  $\beta$  unter 1 sinken kann.

Mit dem Zuwachs der Momente (und daraus resultierend auch der Querkräfte) kann es zu einer Änderung des für die Bemessung maßgebenden Versagensmechanismus, auf welchen der Stab bemessen werden muss, kommen. Bei Druckstäben ist hierbei jedoch ein größerer Zuwachs als bei Zugstäben möglich, da es bei diesen zu einer quadratischen Interaktion zwischen Normalkraft und Moment kommt, welche bei Zugstäben nicht durchgeführt werden darf.

Die nachfolgend dargestellten Ausnutzungen stellen nur die Bemessung der Querschnitte und Bauteile dar, welche mit den Abmessungen und Eigenschaften der Bruttoquerschnitte geführt wurden. Die Änderungen in den Nettoquerschnitten im Bereich der Anschlüsse wird in Abschnitt 7.4 näher betrachtet.

Bei der Vorbemessung der Fachwerke (ideelles Fachwerk) wurde eine maximale Ausnutzung von rund 85% gewählt, um mögliche Überschreitungen bei nachfolgenden Modellierungsschritten zu verhindern.

Um die Darstellung zu vereinfachen, werden nachfolgend die normierten und auf den ersten Modellierungsschritt (ideelles Fachwerk) bezogenen Ausnutzungen dargestellt. Dadurch soll eine Änderung (sowohl Zuwachs als auch Abnahme) der Ausnutzung auf den einfachsten Bemessungsschritt gezeigt werden.

7. 3. 1 Fachwerktyp FA - Streben/Pfosten - Fachwerk

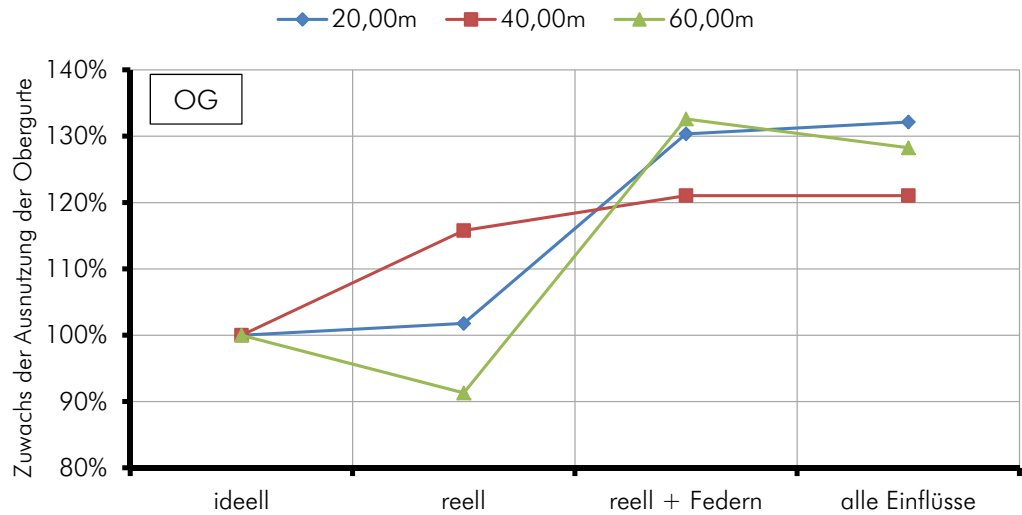


Abb. 7.11 Änderung der Ausnutzung der Obergurte des Fachwerktyps FA

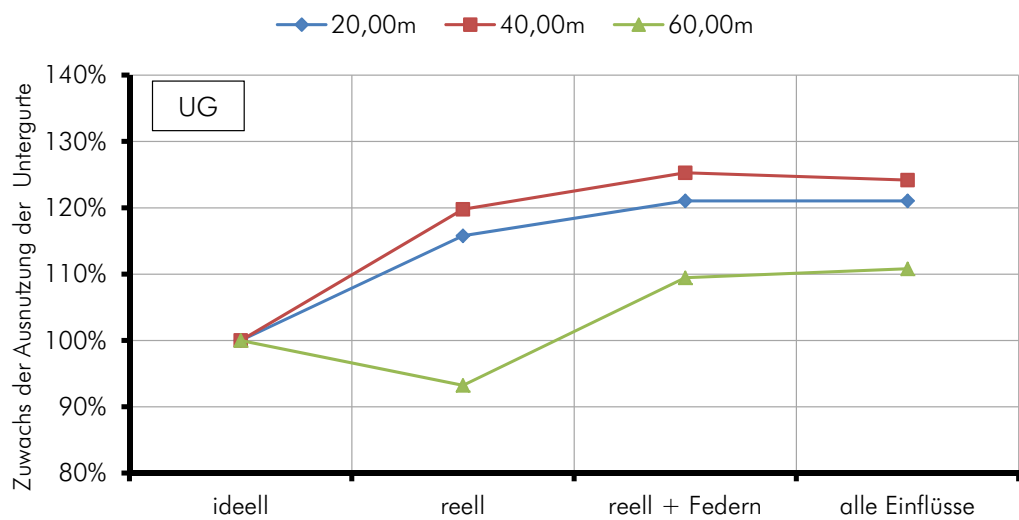


Abb. 7.12 Änderung der Ausnutzung der Untergurte des Fachwerktyps FA

Bei den beiden, hauptsächlich auf Biegung beanspruchten Bauteilen Ober- und Untergurt ist eine deutliche Zunahme der Ausnutzungen zu erkennen. Die anfänglichen Abnahmen der Ausnutzung (reell) lassen sich durch Änderungen in der Knickfigur dieser Bauteile erklären. Dabei ändert sich die Knickfigur von einem gelenkigen Einzelstab (Eulerfall 2) auf einen Durchlaufträger mit Stützungen. Da dieses System im Bemessungsschritt „reell + Federn“ durch eine definierte Bettung in Form der Federn nachgiebiger gestaltet wird, erhöhen sich hier erneut die Ausnutzungsgrade der Stäbe, da sich die Knickfiguren verschlechtern.

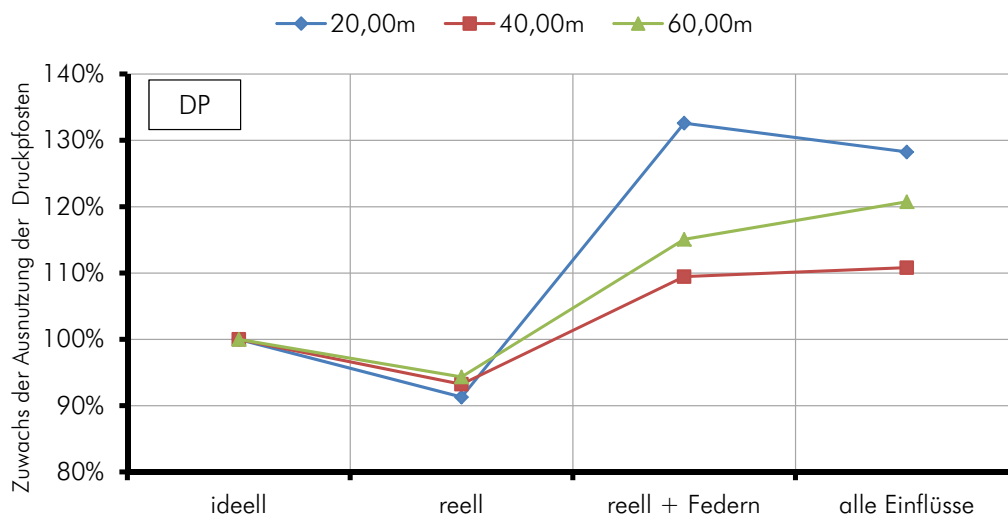


Abb. 7.13 Änderung der Ausnutzung der Druckpfosten Fachwerktyp FA

Hauptgrund für die Änderungen in den Druckpfosten ist, dass durch die Berücksichtigung der Federn in der Modellbildung eine signifikante Änderung im Knickverhalten dieser auftritt. Die Abnahme zwischen der ideellen und der reellen Modellbildung ist in der Tatsache der Biegetragfähigkeit der Ober- und Untergurte zu finden.

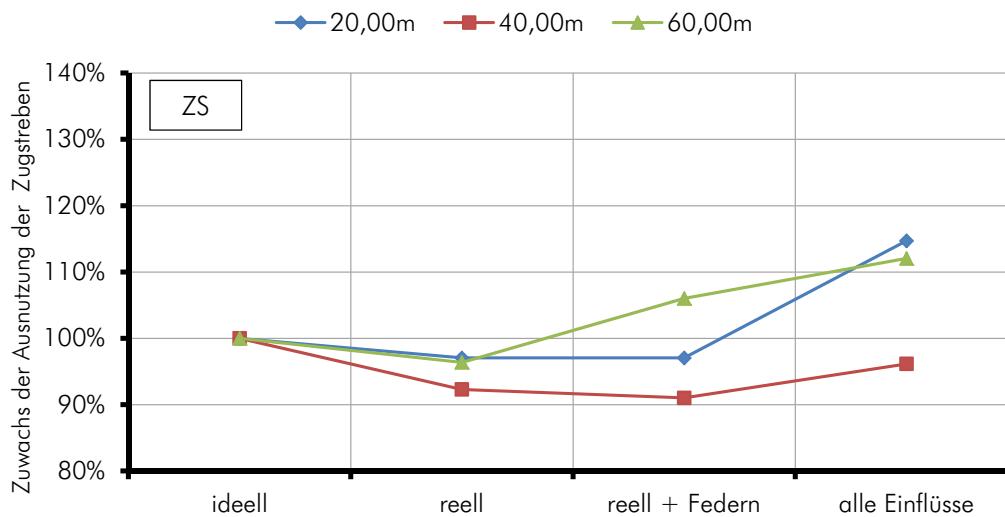


Abb. 7.14 Änderung der Ausnutzung der Zugstreben Fachwerktyp FA

Da bei Zugstreben kein Knickversagen auftreten kann, resultiert die hier ersichtliche Änderung in der Erhöhung der Schnittkräfte und hier im Besonderen dem Auftreten von Biegemomenten, welche durch die Kapazität der Anschlüsse in diesem Bauteil zusätzlich auftreten.

Den Bauteilen, sowohl den Druckpfosten als auch den Zugstreben, ist gemein, dass die Ausnutzungen bei kleinen Spannweiten den größeren Änderungen unterworfen sind.

7.3.2 Fachwerktyp FB - Strebenfachwerk

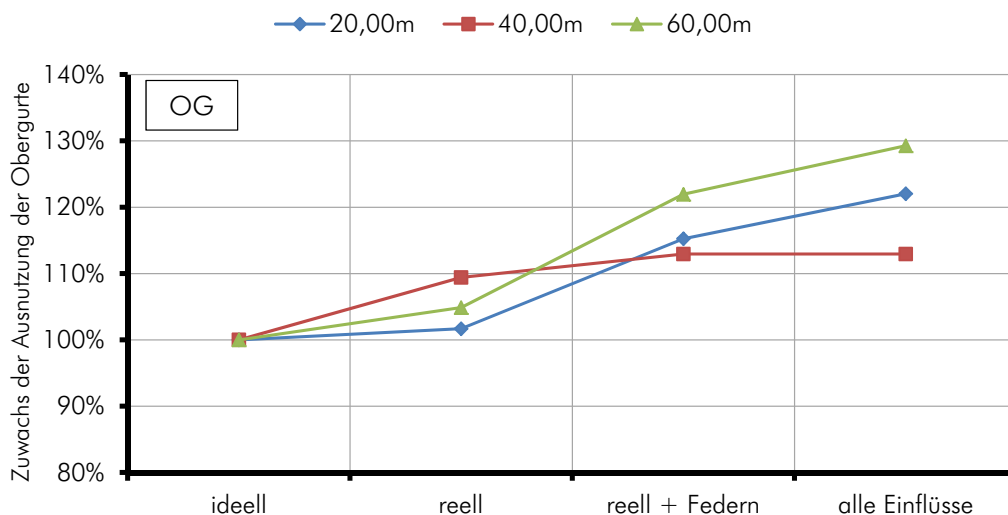


Abb. 7.15 Änderung der Ausnutzung der Obergurte des Fachwerktyps FB

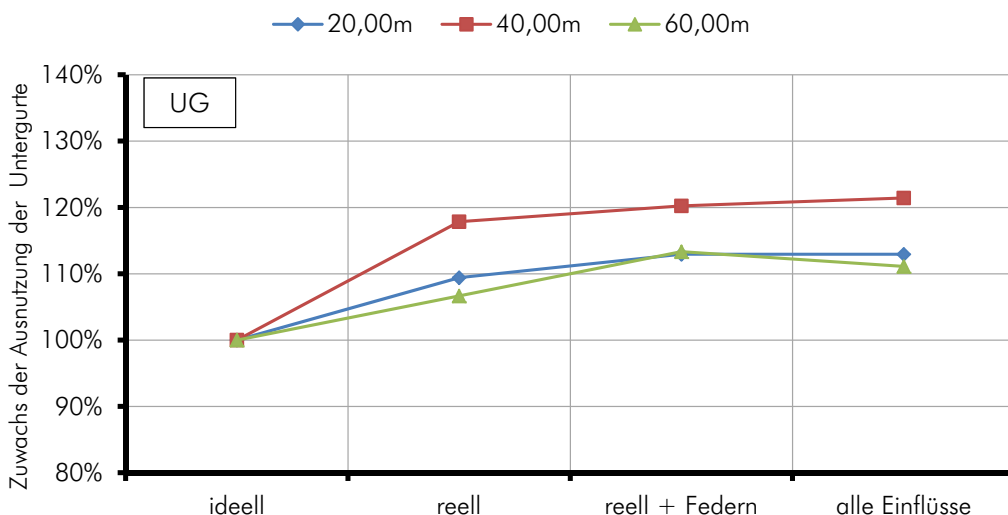


Abb. 7.16 Änderung der Ausnutzung der Untergurte des Fachwerktyps FB

Ebenso wie bei einem Streben/Pfosten - Fachwerk sind die hier dargestellten Änderungen in den Bauteilen Ober- und Untergurt in der Anpassung der Knickfigur des Fachwerkes zu finden. Hierbei ist jedoch interessant, dass die Stablängen (nicht die Knicklängen) der Bauteile auf Grund der Ausfachung der Fachwerke länger sind als in einem Streben/Pfosten - Fachwerk bei denen, die Erhöhungen der Ausnutzungen etwas geringer sind. Der Grund hierfür scheint die effektivere Lagerung der Ober- und Untergurte und die daraus resultierende kleiner Knicklänge dieser zu sein.

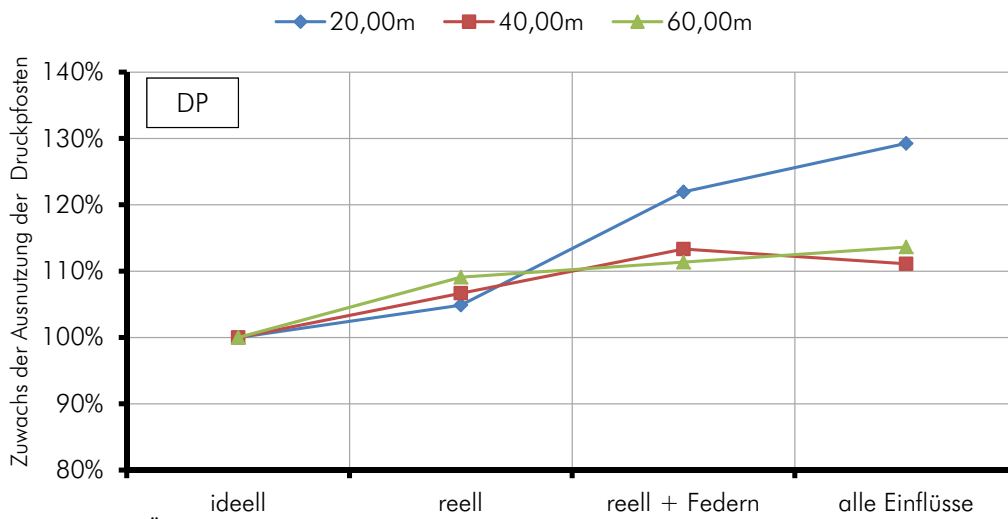


Abb. 7.17 Änderung der Ausnutzung der Druckpfosten des Fachwerktyps FB

Auch bei den Druckpfosten eines Strebenfachwerkes ist ein ähnliches Verhalten wie bei einem Streben/Pfosten - Fachwerk zu erkennen. Die Erhöhung der Ausnutzung ist rein auf die Änderung der Knickfigur des Stabes und ein daraus resultierendes Bauteilversagen zurückzuführen.

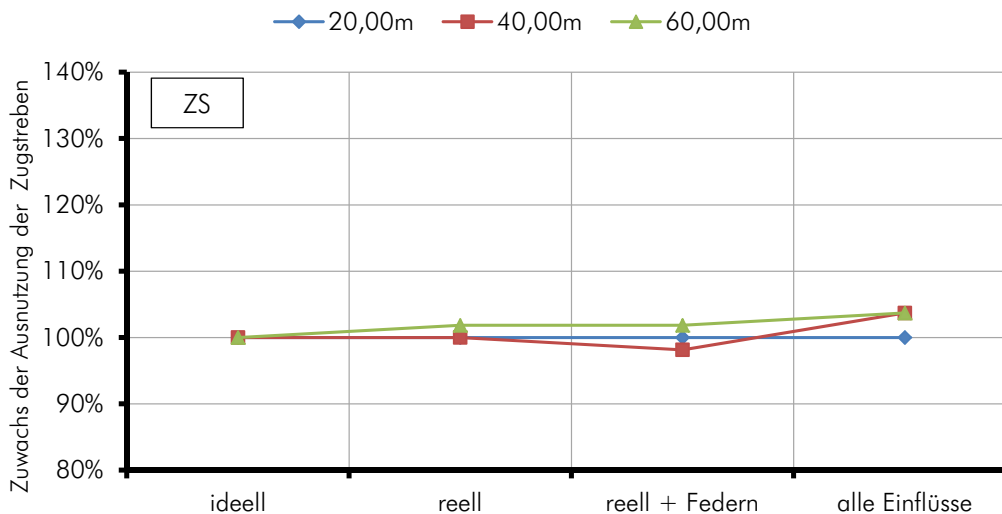


Abb. 7.18 Änderung der Ausnutzung der Zugstreben des Fachwerktyps FB

Im Gegensatz zu allen anderen Bauteilen eines Strebenfachwerkes zeigen die Zugstreben eine sehr geringe Änderung des Ausnutzungsverhaltens. Der Grund hierfür liegt in den bereits im Bemessungszustand (ideelles Fachwerk) geringen Schnittkräften in den Stäben, welche in der weiteren Modellierung zu kleinen Anschlusssteifigkeiten führen und daraus zu einer marginalen Zunahme der Schnittkräfte durch die Abbildung der Anschlüsse.



## 7. 4 Verhalten der Anschlüsse

Um das Verhalten der Anschlüsse in einem Fachwerk zu beschreiben ist es notwendig, die Art der Modellierung zu berücksichtigen. Wird der erste Modellierungsschritt (ideelles Fachwerk) verwendet, so weisen die Druckpfosten und Zugstreben größtenteils nur Normalkräfte auf. Geringe Momente und Querkkräfte in den Anschlussbereichen entstehen lediglich aus der Berücksichtigung des Eigengewichtes des Stabes. Ebenso erhalten im zweiten Modellierungsschritt zwar die Ober- und Untergurte zusätzliche Stützmomente in den Anschlussbereichen mit den Druckpfosten und Zugstreben. Diese Schnittkräfte werden jedoch nur durch die Balkentragwerke abgetragen und nicht in die Druckpfosten und Zugstreben weitergeleitet.

Durch die Berücksichtigung der Steifigkeiten der Anschlüsse ist es jedoch dem Tragwerk möglich, einen gewissen Teil der Schnittkräfte aus den Ober- und Untergurten in die Druckstreben und Zugpfosten weiterzugeben. Dadurch beteiligen sich zwar diese beiden Bauteile mehr an der Lastabtragung, daraus folgend werden die Anschlüsse, und damit auch die Bauteile und Querschnitte durch zusätzliche Schnittkräfte beansprucht. In der Vordimensionierung der Anschlüsse können jedoch diese Kräfte nicht berücksichtigt werden, da deren Größe erst nach der Modellierung des Fachwerkes mit der Steifigkeit der Anschlüsse bekannt ist.

Mit der Berücksichtigung der Anchlusssteifigkeiten ist es auch notwendig, die eingebauten Stahlbauteile (ausgenommen Holz-Holz- Verbindungen) in der Modellierung mitzuberechnen. Aus diesen entsteht eine Verschiebung der Lasteinleitungspunkte, welche wiederum (durch einen Hebelsarm) zu einer Erhöhung der Momente und Querkkräfte in den Anschlüssen führt.

Da im Zuge der Bemessung die Steifigkeiten der Anschlüsse bekannt sind, werden alle Ergebnisse auf diese bezogen. Da keine eindeutige Zuordnung zwischen dem Einfluss der Weg- und der Drehfeder möglich ist, werden hier beide Anschlüsse gemeinsam betrachtet. Jeder Anschluss weist eine Verschiebungs- und eine Rotationskapazität auf, wodurch diese Annahme zulässig ist.

Nachfolgend werden die Ergebnisse wie folgt dargestellt:

- Erhöhung der Normalkraft durch die Wegfeder
- Entstehung eines Anschlussmomentes durch die Drehfeder und
- Entstehung einer Anschlussquerkraft durch die Drehfeder

Allen Bauteilen gemein ist die bereits anfangs vorhandene Normalkraft (Druck und Zug), auf welche die nachfolgenden zusätzlichen Schnittkräfte bezogen werden.

## 7. 4. 1 Fachwerktyp FA - Streben/Pfosten - Fachwerk

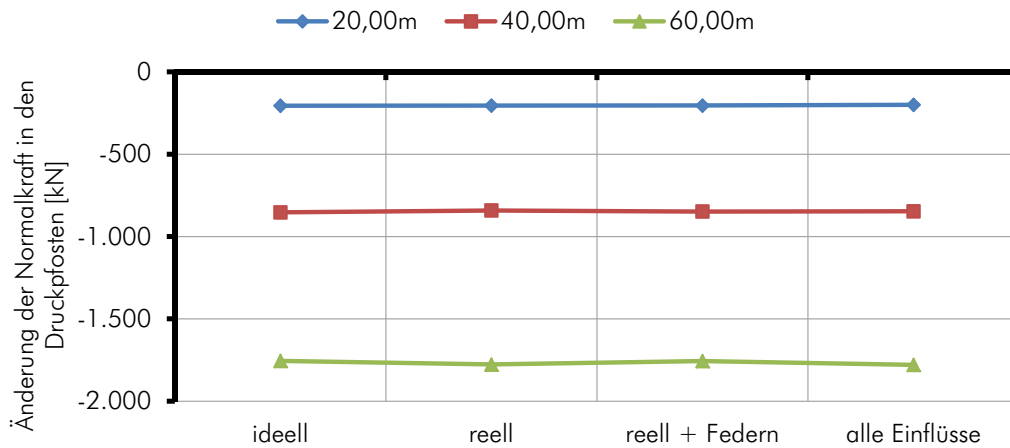


Abb. 7.19 Änderung des Normalkraftverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FA

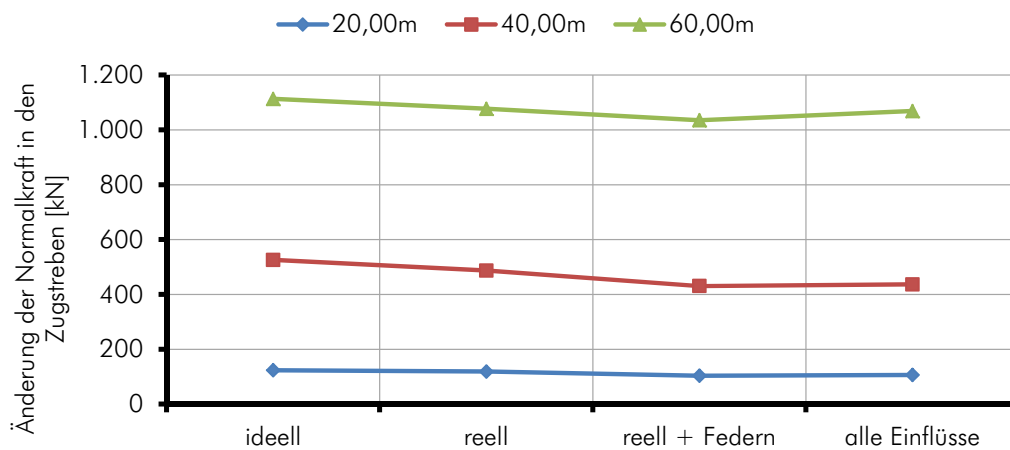


Abb. 7.20 Änderung des Normalkraftverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FA

Wie bereits bei der Darstellung der Allgemeinen Schnittkräfte ersichtlich wurde, sind alle Bauteile sehr geringen Schwankungen in den Normalkräften unterworfen. Die hier dargestellten Ergebnisse sollen nur erneut den Einfluss der Modellbildung auf die Normalkräfte in den Anschlüssen darstellen.

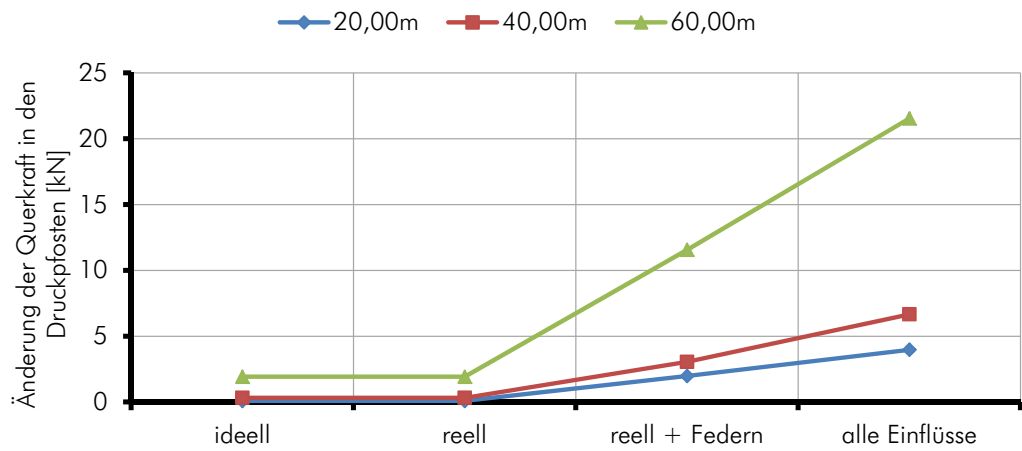


Abb. 7.21 Änderung des Querkraftverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FA

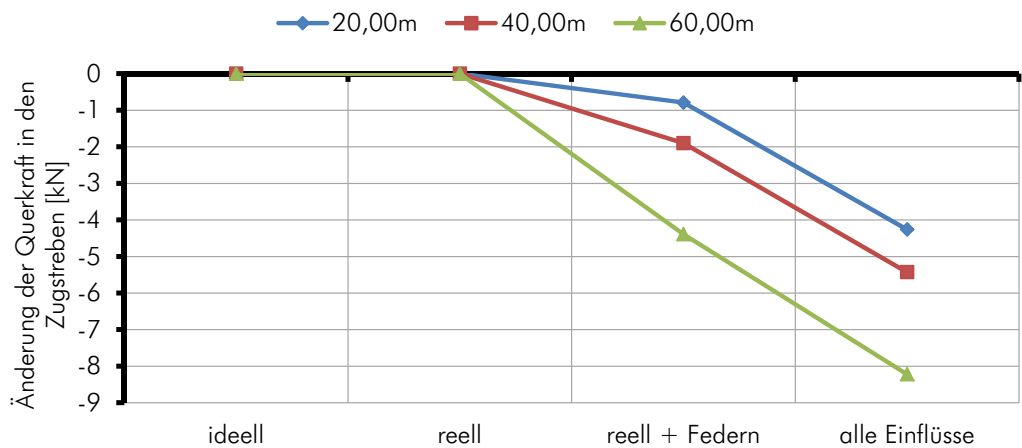


Abb. 7.22 Änderung des Querkraftverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FA

Im Gegensatz zu den Normalkräften, deren Änderung sich annähern konstant über alle Modellierungsschritte verhält, ist bei den Querkraften ein Anstieg nach Berücksichtigung der Federn zu erkennen. Der Anstieg zwischen der Modellierung der reinen Federn und der zusätzlichen Abbildung aller Einflüsse wird durch die Steifigkeit der Stahlbauteile in den Anschlüssen verursacht. Die zusätzlich im statischen System eingebaute „Rahmenwirkung“ führt zu einer Erhöhung der Querkräfte in den Anschlusspunkten des Stabes.

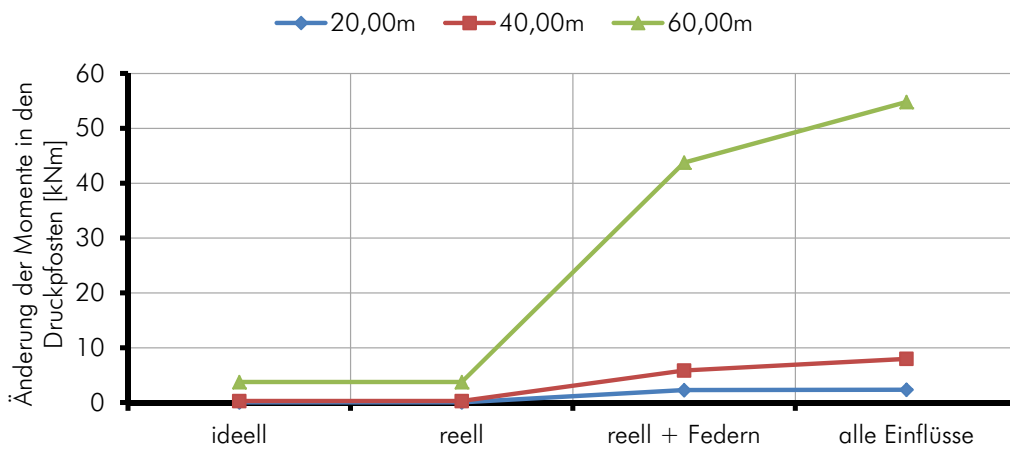


Abb. 7.23 Änderung des Momentenverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FA

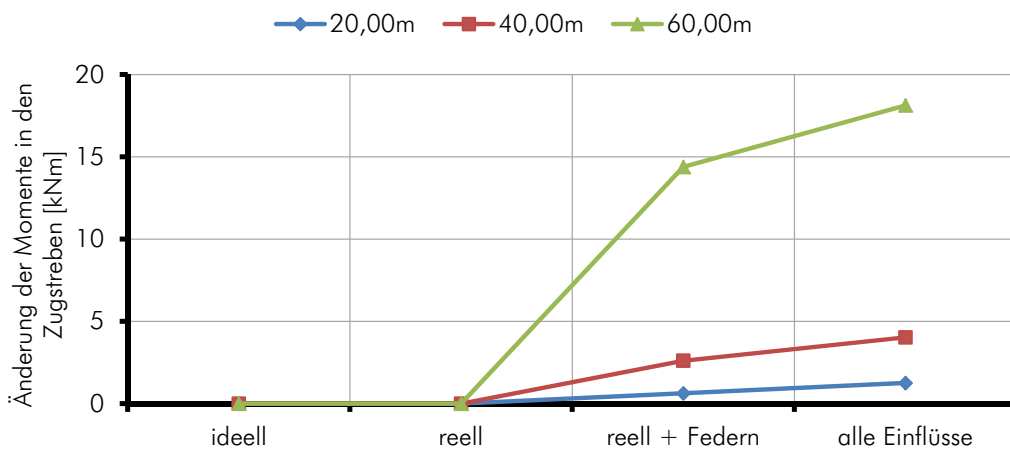


Abb. 7.24 Änderung des Momentenverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FA

Gleich den Querkräften steigen auch die zusätzlichen Momente in den Anschlusspunkten mit Erhöhung der Modellbildung an.

Sowohl für die Querkräfte als auch für die Momente lässt sich sagen, dass eine klare Spannweitenabhängigkeit vorliegt. Diese ist durch die höhere Steifigkeit der Anschlüsse bei größeren Spannweiten (und daraus resultierenden höheren Schnittkräften) erklärbar.

## 7. 4. 2 Fachwerktyp FB - Strebenfachwerk

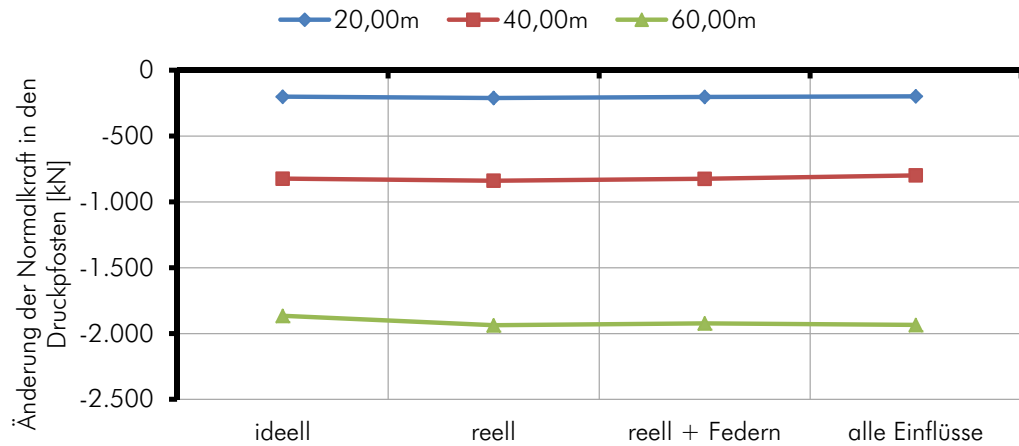


Abb. 7.25 Änderung des Normalkraftverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FB

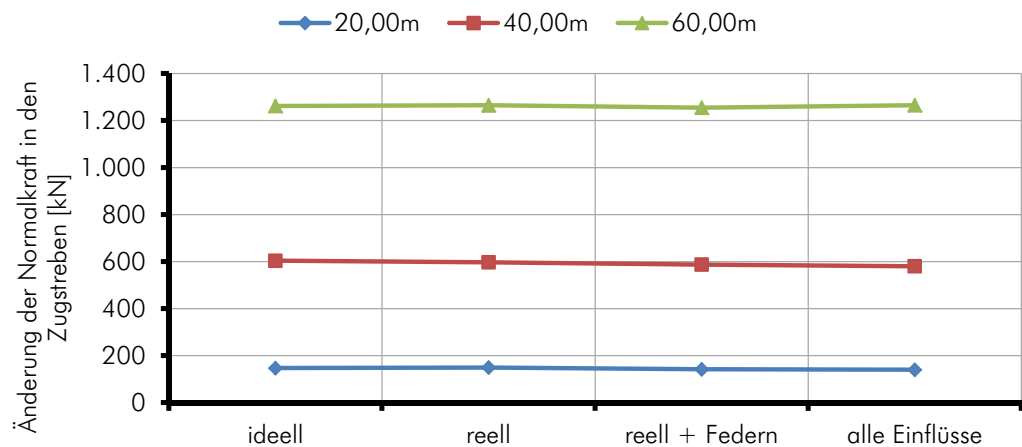


Abb. 7.26 Änderung des Normalkraftverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FB

Wie bereits bei Streben/Pfosten - Fachwerken beschrieben, liegen keine sehr großen Änderungen in den Normalkräften der Stäbe vor.

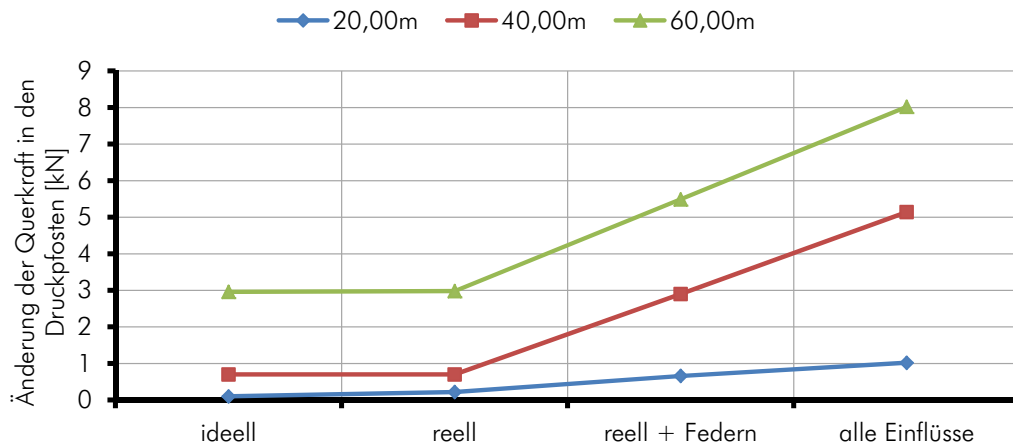


Abb. 7.27 Änderung des Querkraftverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FB

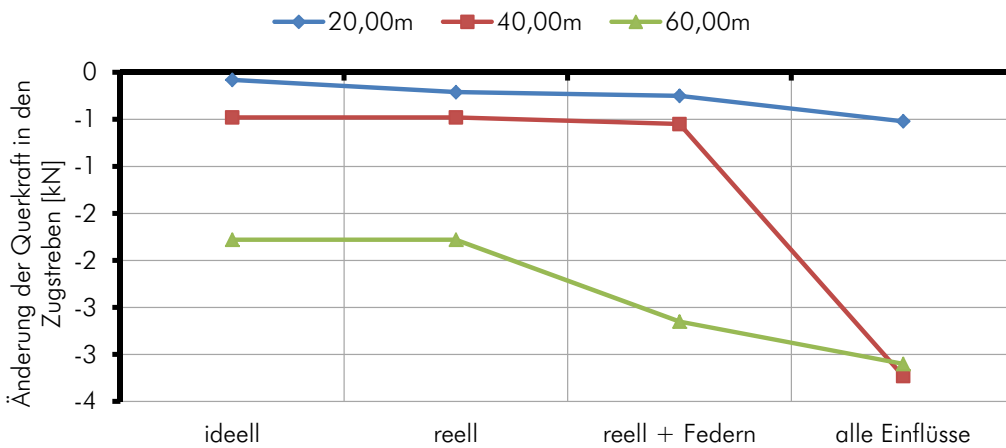


Abb. 7.28 Änderung des Querkraftverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FB

Die lineare Änderung der Querkräfte in den Druckpfosten lässt sich sehr leicht durch den zusätzlichen Einbau von Steifigkeit durch die Modellierung der Anschlüsse beschreiben. Das „spannweitenunabhängige“ Verhalten in den Zugstreben kann durch die Betrachtung der Steifigkeiten der Anschlüsse und der Stahlbauteile erklärt werden. Da die Stahlbauteile bei einer Spannweiten von 40,00 m (auf Grund der Bemessung) eine höher Steifigkeit als jene bei 60,00 m aufweisen, tritt hier ein steilerer Anstieg in der Zunahme der Querkräfte auf.

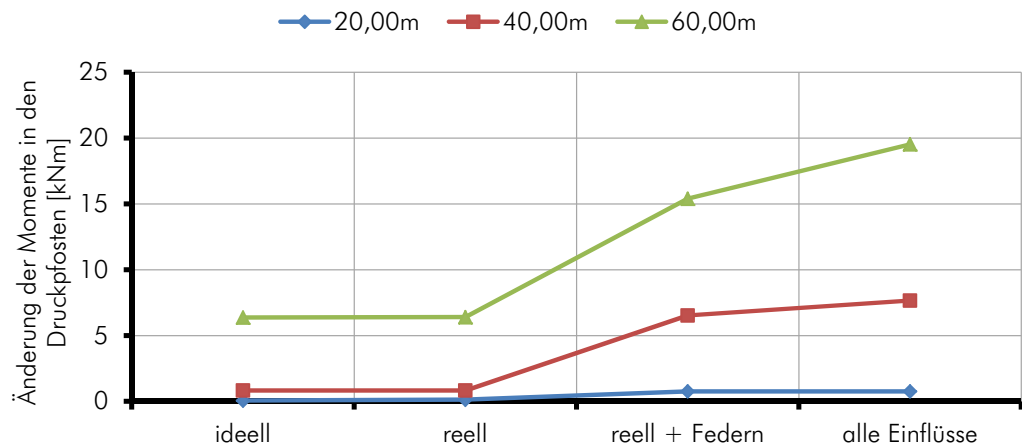


Abb. 7.29 Änderung des Momentenverlaufes im Druckpfosten des Fachwerktyps FB

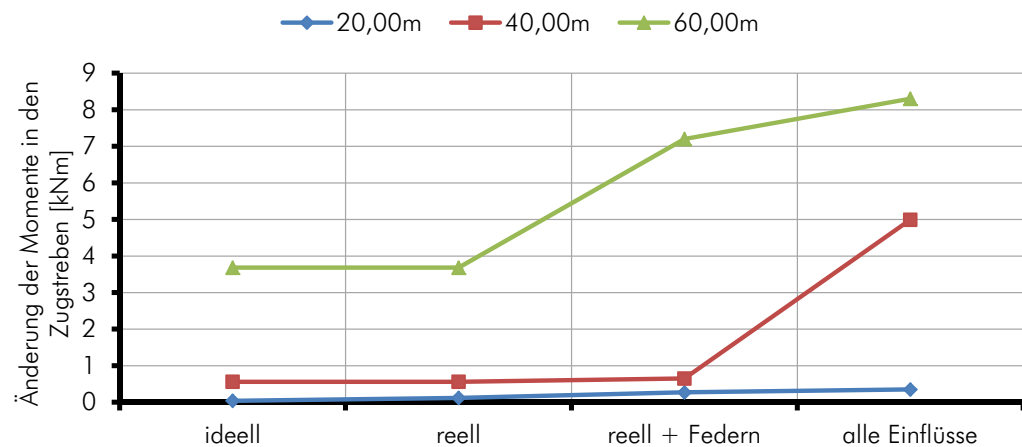


Abb. 7.30 Änderung des Momentenverlaufes in der Zugstrebe des Fachwerktyps FB

Die zusätzlichen Momente stellen ebenso wie bei einem Streben/Pfosten - Fachwerk ein Abbild der Querkräfte dar.

Im Gegensatz zu den allgemeinen Ausnutzungen in den Stäben ist bei den Anschlüssen eine stärkere Änderung mit Abhängigkeit von der Spannweite zu erkennen.

## 7.5 Robustheit der Fachwerke

Bei einem Ausfall von Bauteilen lässt sich eine eindeutige Umlagerung der Schnittkräfte erkennen, welche nachfolgend kurz durch die Abbildung der Ausnutzung dargestellt werden soll.

Da die Berechnungen mit den gleichen Werten wie in den Fachwerkstudien FA und FB geführt werden, und bei einer Aussage der Robustheit nur das Kurzzeitverhalten des Bauteiles berücksichtigt werden soll, müssen die Ergebnisse auf einen charakteristischen Wert minimiert werden. Dazu wird das Bemessungsergebnis durch die Sicherheit auf der Lastseite ( $\gamma_Q \sim 1,40$ ) und auf der Materialseite ( $k_{\text{mod}} * \gamma_M = 0,80 * 1,25$ ) dividiert. Diese Annahmen sind in etwa zutreffend, da immer das gleiche Material verwendet wird, und das Verhältnis zwischen Nutzlasten und Eigengewicht ungefähr im Bereich von 1,40 liegt.

In dieser Untersuchung werden folgende Punkte nicht betrachtet:

- Verformungsverhalten beim Ausfall eines Bauteils  
Da sich die Robustheit eines Bauteils auf einen außergewöhnlichen Lastfall bezieht, sind keine Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit zu stellen. Solange sich aus dem System keine kinematische Kette oder ein Durchschlagproblem bildet, haben die Fachwerke keine Begrenzung der Verformung.
- Gruppenwirkung benachbarter Fachwerke im Gesamtsystem

Da Fachwerke meist für die Errichtung von Hallenbauten verwendet werden und bei diesen mehr als ein Fachwerk als Haupttragwerk vorhanden ist, wäre durch die Tragfähigkeit der Dachebene eine Lastumlagerung aus dem „beschädigten“ Fachwerk in ein benachbartes, noch tragfähiges Fachwerk möglich. Da es bei dieser Untersuchung jedoch nur um Fachwerke und an sich nicht um die darauf befindlichen Dachaufbauten geht, wird dies nicht weiter betrachtet. In der allgemeinen Planung eines Hallentragwerkes muss dies durch den Ingenieur berücksichtigt werden.

Eine Modellierung des Ausfalles mehrerer Bauteile wurde nicht simuliert, da diese zu einer „kinematischen Kette“ führen würde, welche sich mit den baustatischen Methoden nicht berechnen lässt.



7. 5. 1 Fachwerktyp FA - Streben/Pfosten - Fachwerk

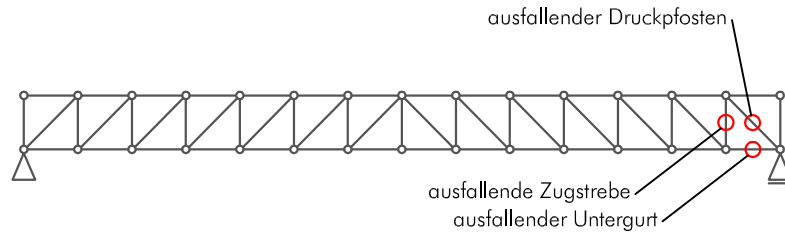


Abb. 7.31 Systemskizze mit ausfallenden Bauteilen

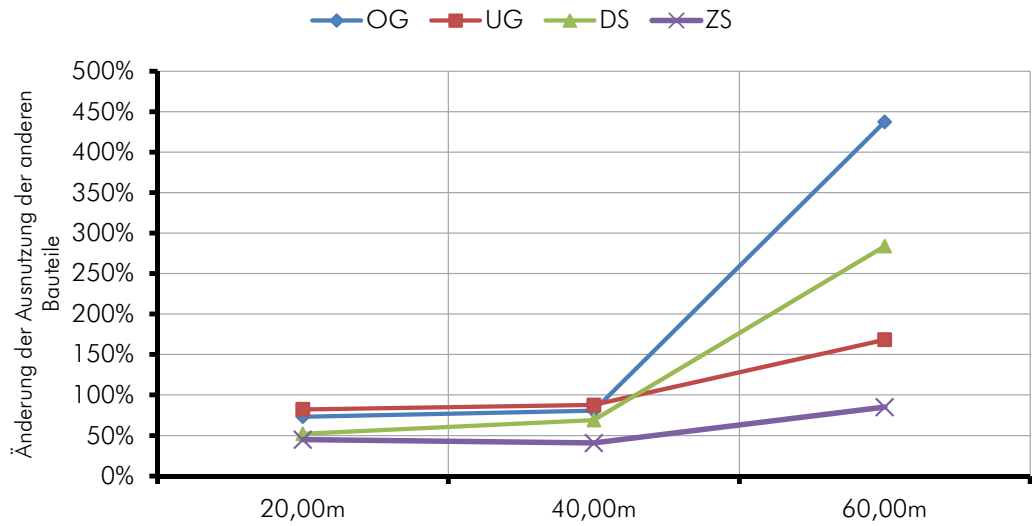


Abb. 7.32 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall des Druckpfostens des Fachwerktyps FA

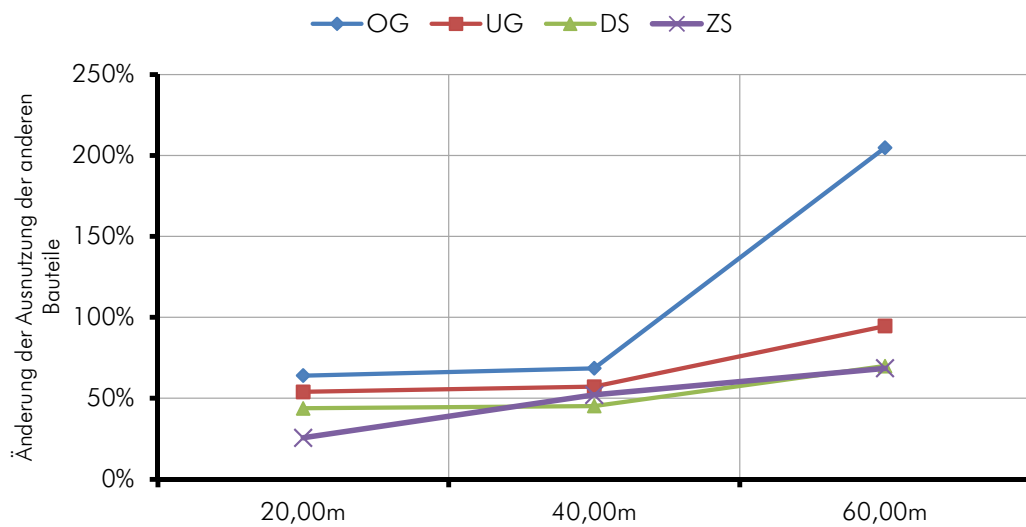


Abb. 7.33 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall der Zugstrebe des Fachwerktyps FA

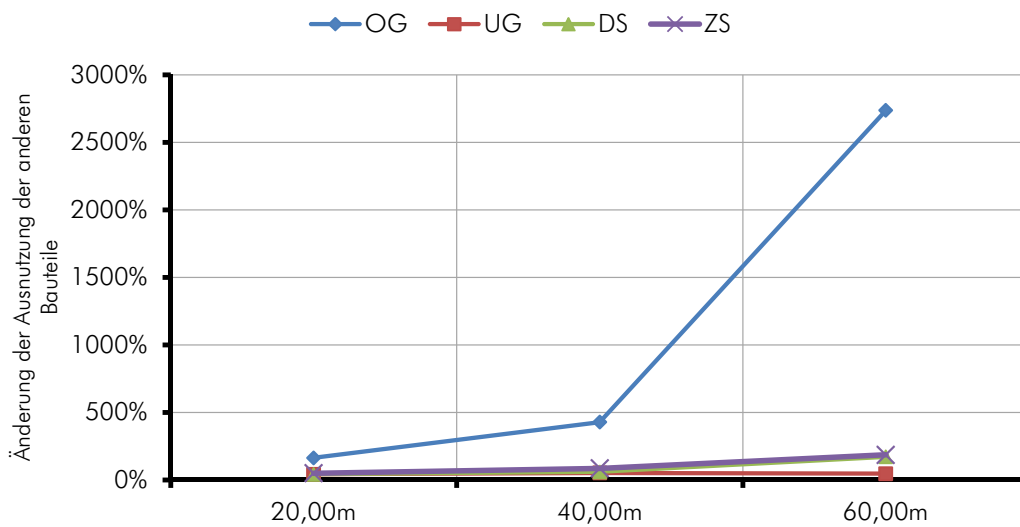


Abb. 7.34 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall des Untergurtes Fachwerktyp FA

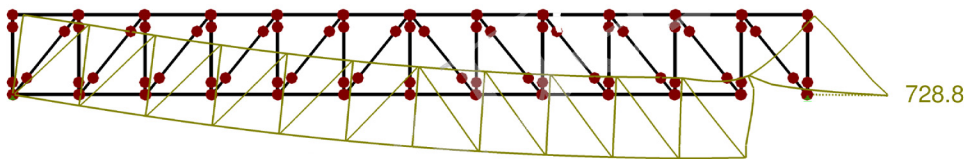


Abb. 7.35 Verschiebungsfigur bei Ausfall des Untergurtes Fachwerktyp FA, Spannweite  $L = 60\text{m}$

In den Abb. 7.32 bis Abb. 7.34 sind die maximalen Ausnutzungen in den Bauteilen bei Ausfall jeweils eines Bauteiles zu erkennen. Hieraus wird ersichtlich, dass ungeachtet welcher Bauteil der Ausfallende ist, die Obergurte einen Großteil der Lastabtragung übernehmen müssen, dies spiegelt die Biegetragfähigkeit dieser wieder.

Wie in Abb. 7.34 zu erkennen ist, würde ein Ausfall des Untergurtes zu einem plötzlichen Versagen des Obergurtes, und daraus resultierend zu einem Versagen des gesamten Fachwerkes führen. Dies ist auch aus der Verformungsfigur in Abb. 7.35 ersichtlich.

7. 5. 2 Fachwerktyp FB - Strebenfachwerk

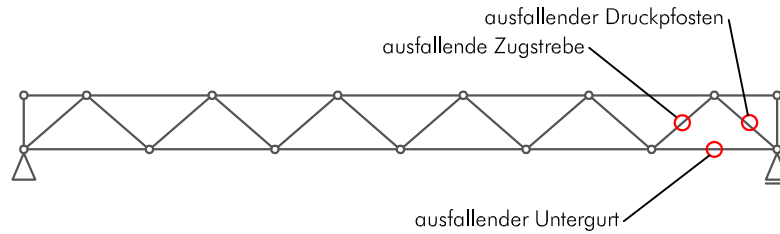


Abb. 7.36 Systemskizze mit ausfallenden Bauteilen

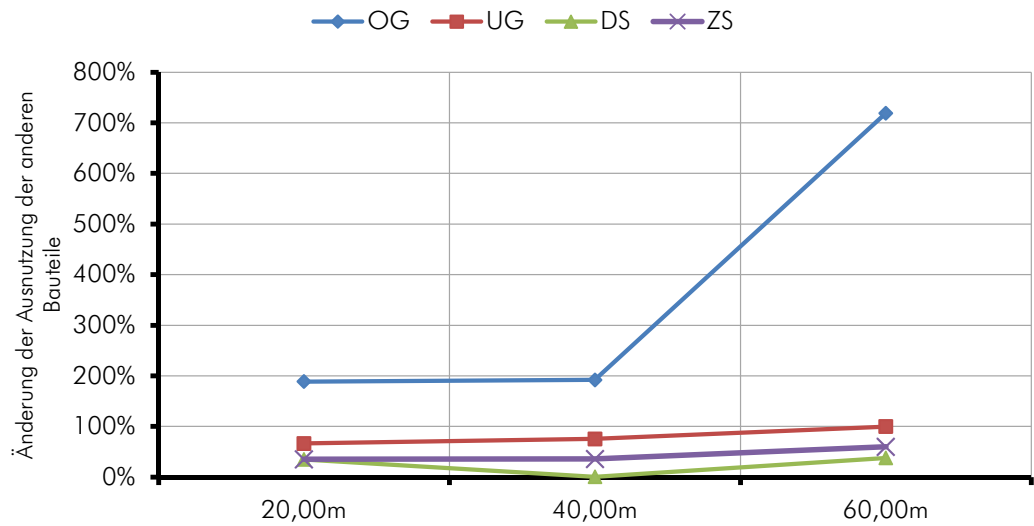


Abb. 7.37 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall des Druckpfostens des Fachwerktyps FB

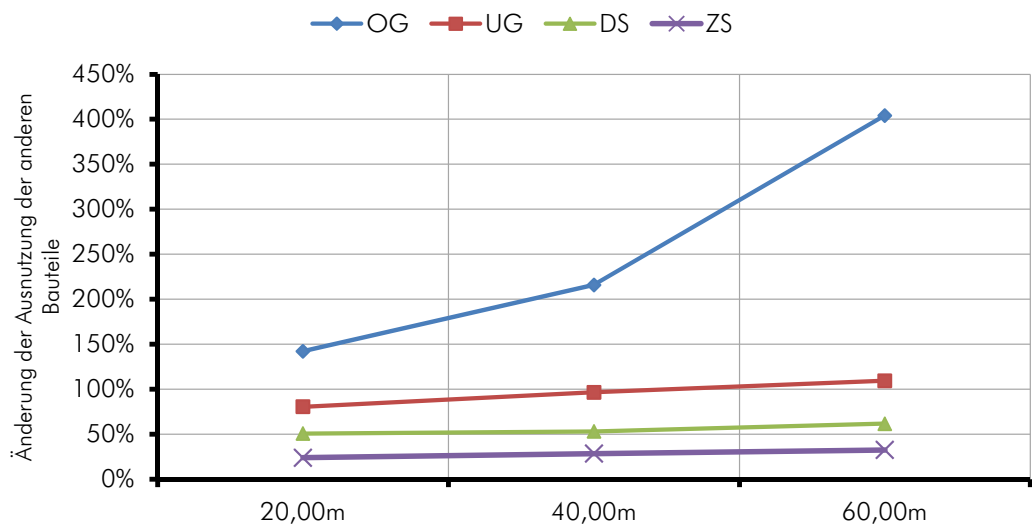


Abb. 7.38 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall der Zugstrebe des Fachwerktyps FB

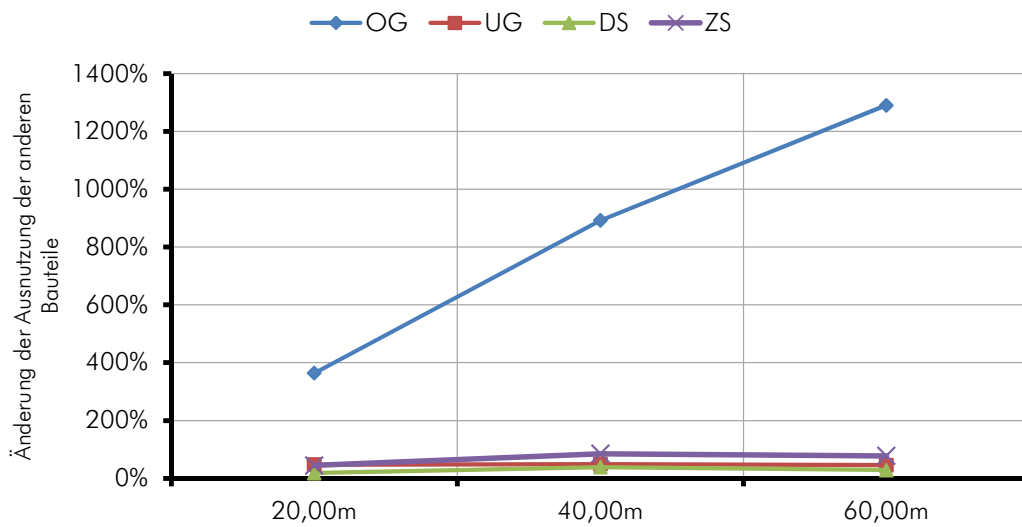


Abb. 7.39 Änderung der Ausnutzung bei Ausfall des Untergurtes des Fachwerktyps FB

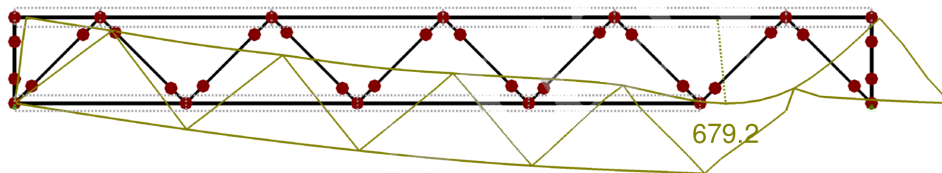


Abb. 7.40 Verschiebungsfigur bei Ausfall des Untergurtes Fachwerktyp FB, Spannweite  $L = 60\text{m}$

Bei der Modellierung von Strebenfachwerken wird ersichtlich, dass diese die gleiche Anfälligkeit auf den Ausfall von Bauteilen aufweisen wie Streben/Pfosten - Fachwerke.

## Ergebnisse der Parameterstudie & Empfehlungen

Um die Ergebnisse der Parameterstudien aufzubereiten und für die praktische Verwendung zugänglich zu machen, werden nachfolgend die bereits in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse nochmals, jedoch auf eine veränderte Art dargestellt, um diese für eine direkte Nutzung anpassen zu können.

Dazu wird dieser Teil der Arbeit in zwei Punkte gegliedert:

- Ergebnisse der Parameterstudie

Hier werden nochmals die Ergebnisse der Parameterstudie aufbereitet und durch zusätzliche Darstellungen „praktikabel“ abgebildet. Es werden alle Einflüsse aus den Parameterstudien, welche sich auf spezielle Eigenschaften beziehen entfernt, um die allgemeine Gültigkeit dieser Darstellungen zu gewährleisten. Dabei soll die Darstellung auf die Steifigkeit und die Spannweite bezogen werden, um die Abhängigkeit der Modellbildung von diesen beiden Parametern aufzuzeigen.

- Empfehlungen für die praktische Modellierung von Fachwerken

Mit den Ergebnissen der Parameterstudie sollen nun Aussagen zur Modellierung von Fachwerken getroffen werden, um die Notwendigkeit der Abbildung bestimmter Effekte zu definieren und dadurch die Anwendung in der Praxis zu vereinfachen.

Abschließend wird noch der aktuelle Stand der Forschung und Technik im Bereich der Anlusstechnik von Holzbauteilen dargestellt und diese auf ihre Verwendbarkeit und die Einflüsse auf die Modellierung abgebildet und bewertet.

# 1 Ergebnisse der Parameterstudie

Um die Darstellung zu verallgemeinern, werden nun jene Parameter aus den Ergebnissen genommen, welche in der Berechnung von Fachwerken anfangs nicht bekannt sind. Dazu zählen die Schnittkraftumlagerung in den Stäben und die Steifigkeit der Anschlüsse. Da diese Werte für jedes Fachwerk unterschiedliche Größen annehmen soll dadurch gewährleistet werden, dass die Anwendung der Ergebnisse für jeden Fall von Fachwerken möglich ist.

Dazu wird die Darstellung wie folgt gegliedert:

- allgemeine Ergebnisse aus der Parameterstudie
- Verformungsverhalten von Fachwerken
- Schnittkraftumlagerung und Ausnutzungsverhalten
- Anschlussverhalten

## 1. 1 Allgemeine Ergebnisse aus der Parameterstudie

Aus den Parameterstudien lassen sich folgende Ergebnisse bereits vor der Verallgemeinerung und der Gegenüberstellung ziehen:

- eine Modellierung als ideales Fachwerk ist meist nicht zulässig, da hierbei der wesentliche Einfluss durch die Federn der Anschlüsse nicht mitberücksichtigt wird
- das Verformungsverhalten von Fachwerken ist sehr stark von der Modellierung der Federn und den Anschlussbauteilen abhängig und
- eine zu hohe Ausnutzung in der Vorbemessung der Bauteile kann nach Berücksichtigung aller Elemente und Effekte sehr leicht zu einer Überbeanspruchung dieser führen.

### 1. 1. 1 Modellierung als ideales Fachwerk

Als erstes Ergebnis lässt sich sagen, dass die Modellierung mit Hilfe eines ideellen Fachwerkes nicht zielführend ist. Dies lässt sich durch folgende Ergebnisse und Aussagen begründen:

- Meist werden Fachwerke im Holzbau mit durchlaufenden Ober- und Untergurten ausgeführt. Die Modellierung aus einzelnen Stäben bildet dabei die ausgeführte Konstruktion nicht wahrheitsgemäß ab.
- Die Vernachlässigung der Biegetragfähigkeit der Ober- und Untergurte und der aus dieser resultierenden Rahmenwirkung führt in den Untergurten zu einer Erhöhung der Ausnutzung. Diese Erhöhung ist darauf zurückzuführen, dass bei einer Modellierung als Fachwerkstab nur ein Moment aus Eigengewicht in den Untergurten vorhanden ist. Die Obergurte erhalten bereits durch die linienförmige Lastenleitung ein Moment. Mit der Durchlaufwirkung der Obergurte lagert sich dieses Moment jedoch nur von den Feld in die Stützbereiche um. Bei den Untergurten kommt es zum Auftreten eines Stützmomentes, welches jedoch nicht aus den Feldbereichen umgelagert wurde, sondern rein aus der Lastweiterleitung der Druck- und Zugelemente stammt.

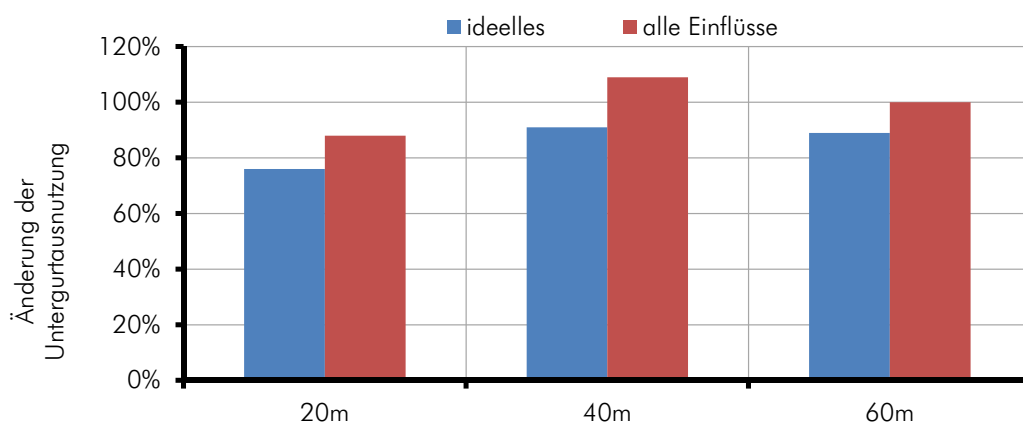


Abb. 1.1 Änderung der Ausnutzung in den Untergurten eines Streben/Pfosten - Fachwerkes

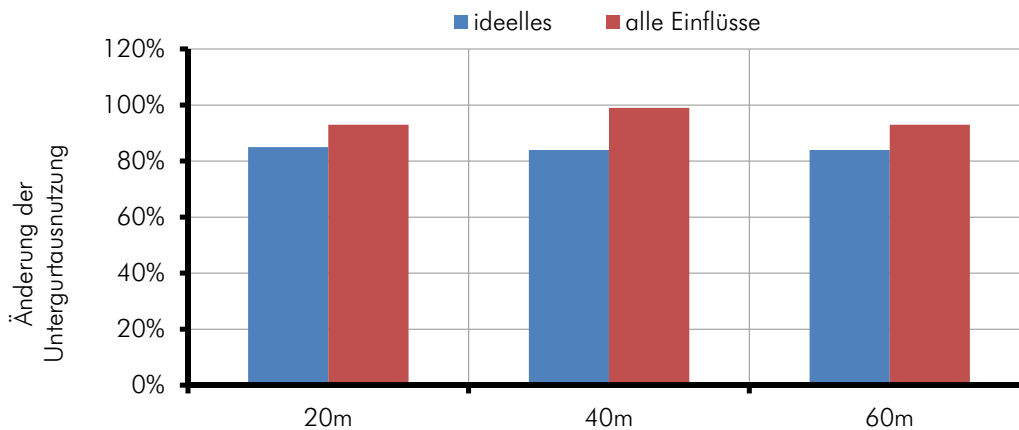


Abb. 1.2 Änderung der Ausnutzung in den Untergurten eines Strebenfachwerkes

Wie jedoch aus Abb. 1.2 zu erkennen ist, ändert sich die Ausnutzung des Untergurtes bei Strebenfachwerken geringer als bei Streben/Pfosten - Fachwerken. Dies ist auf den Unterschied des Kraftflusses in den beiden Typen zurückzuführen. Der Unterschied liegt jedoch bei beiden über 10%, und ist daher nach ingenieurmäßigen Grundsätzen nicht vernachlässigbar.

- Bei den restlichen Bauteilen ist die Schwankung in der Ausnutzung im Vergleich zu jener der Untergurte verhältnismäßig klein. Durch die Biegetragfähigkeit kommt es zu einer Abnahme der Ausnutzung in den Druck- und Zugelementen. Diese ist jedoch betragsmäßig so gering, dass fast kein Einfluss auf die Bemessung entsteht.

### 1. 1. 2 Verformungsverhalten stark von der Modellierung abhängig

Allgemein ist erkennbar, dass die Verformung des Fachwerkes stark von der Modellierung und den damit verbundenen Steifigkeiten abhängig ist. Der Unterschied zwischen einem ideellen und einem reellen Fachwerk ist jedoch sehr gering.

Die Verformung wird allerdings kleiner, wenn das Fachwerk reell modelliert wird (Schritt 2), da durch die Anbringung von Balkentragwerken zusätzliche Steifigkeit in das Gesamtsystem eingebracht wird.

Mit weiterer Zunahme der Modellierungsgenauigkeit erhöht sich die Verformung um einen sehr hohen Betrag, was zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Einfluss führt. Dies wird noch im Abschnitt 2. 3 genauer behandelt.

### 1. 1. 3 Zu hohe Ausnutzung in der Vorbemessung

Der klassische, aus der Literatur bekannte, Grundsatz, dass in der Vorbemessung die Ausnutzung auf ca. 80-85% beschränkt werden sollte, scheint oftmals zu gering. Dies ist in den Abb. 7.11 bis Abb. 7.18 des Kapitels 4 zu erkennen und wird daher hier nicht näher dargestellt.



## 1.2 Verformungsverhalten von Fachwerken

Wie bereits in Abschnitt 1. 1. 2 beschrieben wurde, ist das Verformungsverhalten stark von der Modellierung abhängig.

### 1. 2. 1 Änderung von ideell auf reell (von Schritt 1 auf 2)

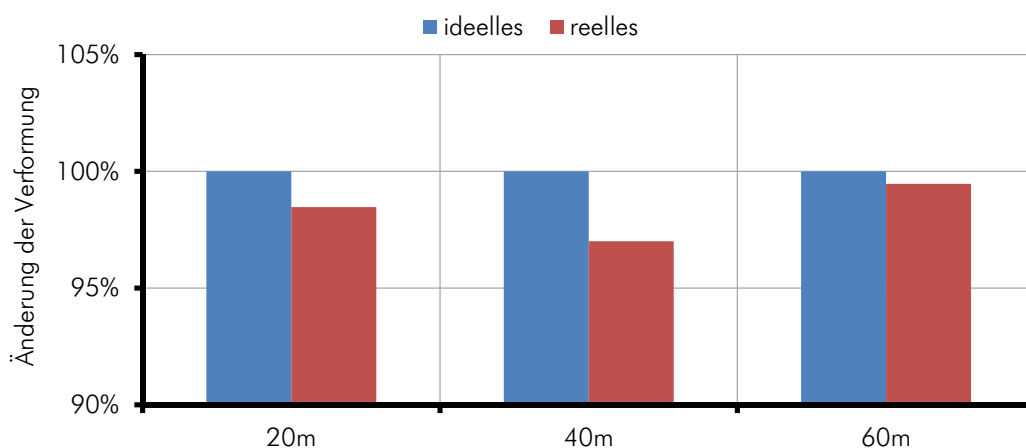


Abb. 1.3 Änderung der Verformung zwischen ideell und reell eines Streben/Pfosten - Fachwerkes

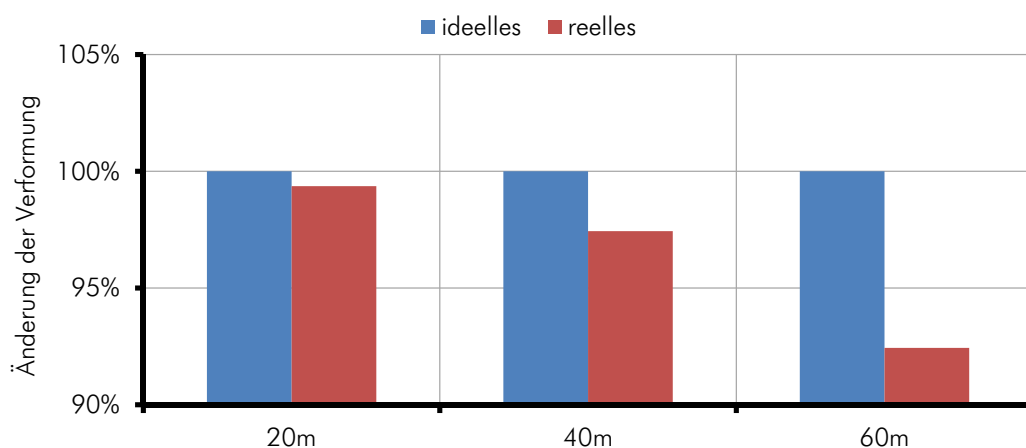


Abb. 1.4 Änderung der Verformung zwischen ideell und reell eines Strebenfachwerkes

In Abb. 1.3 ist zu erkennen, dass für ein Streben/Pfosten - Fachwerk die Änderung in der Verformung bei maximal 3 % liegt. Das nichtlineare Verhalten zwischen 40 m und 60 m lässt sich nicht erklären, ist jedoch wahrscheinlich auf den sehr massiven Querschnitt bei einer Spannweite von 60 m zurückzuführen. Der teilweise lineare Verlauf in Abb. 1.4 lässt sich durch die unterschiedlichen Querschnitte von Ober- und Untergurt bei einem Streben/Pfosten - Fachwerk erklären. Die Untergurte erhalten weniger Lasten, können daher kleinere Querschnitte aufweisen und tragen daher weniger zur Lastableitung bei.

### 1. 2. 2 Änderung durch die Berücksichtigung von Wegfedern

Durch die Modellierung von Wegfedern wird die Steifigkeit des gesamten Tragwerkes verringert. Die Vollgelenke in einem ideellen und die Halbgelenke in einem reellen Fachwerk weisen eine unendliche Steifigkeit auf. Die Wegfedern haben jedoch einen endlichen Wert und ändern so die Steifigkeitsverteilung in der Modellierung.

Um die beiden untersuchten Fachwerkarten vergleichen zu können, ist es notwendig, ein einheitliches Bewertungsschema zu Grunde zu legen. Dazu werden die Verformungen auf die Spannweite bezogen und dadurch die Verformung  $L / u$  [-] definiert. Zusätzlich werden die Wegfedern durch die spannenweitenabhängige Belastung  $q_d / [(L/20) * 15]$  [-] und die Spannweite bereinigt. Durch dieses einheitliche Bewertungsschema ist es möglich, die beiden Fachwerkarten direkt gegenüberzustellen und eine Aussage über das Verformungsverhalten zu treffen.

- Streben/Pfosten - Fachwerk

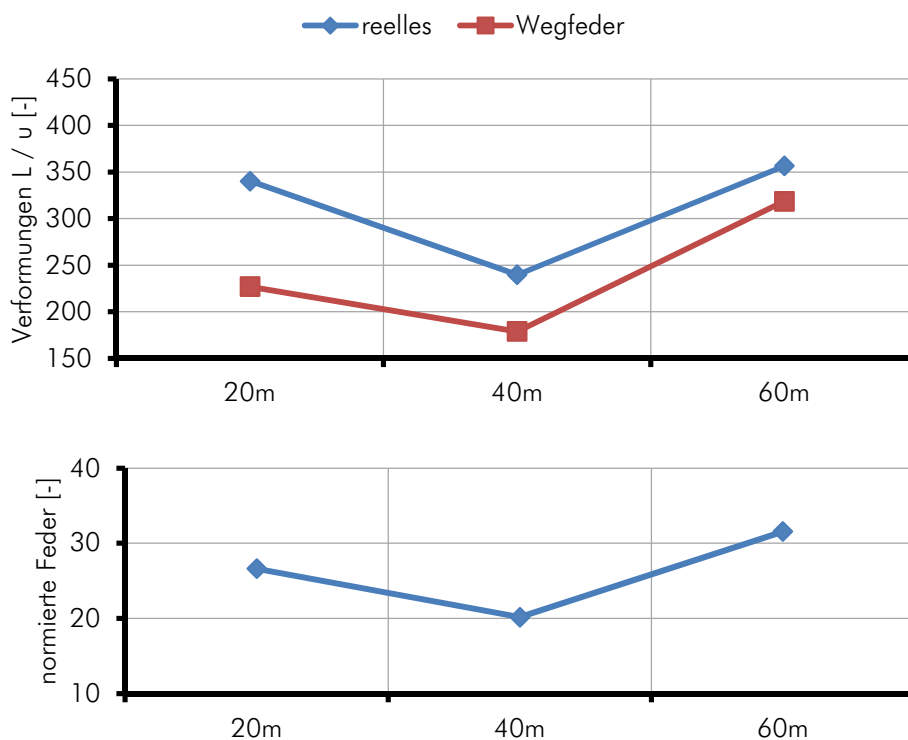


Abb. 1.5 Verformung und normierte Wegfeder für das Streben/Pfosten - Fachwerk

Aus Abb. 1.5 ist ersichtlich, dass das Verformungsverhalten für Streben/Pfosten - Fachwerke in einem direkten Zusammenhang mit der Größe der Wegfeder steht.

- Strebenfachwerk

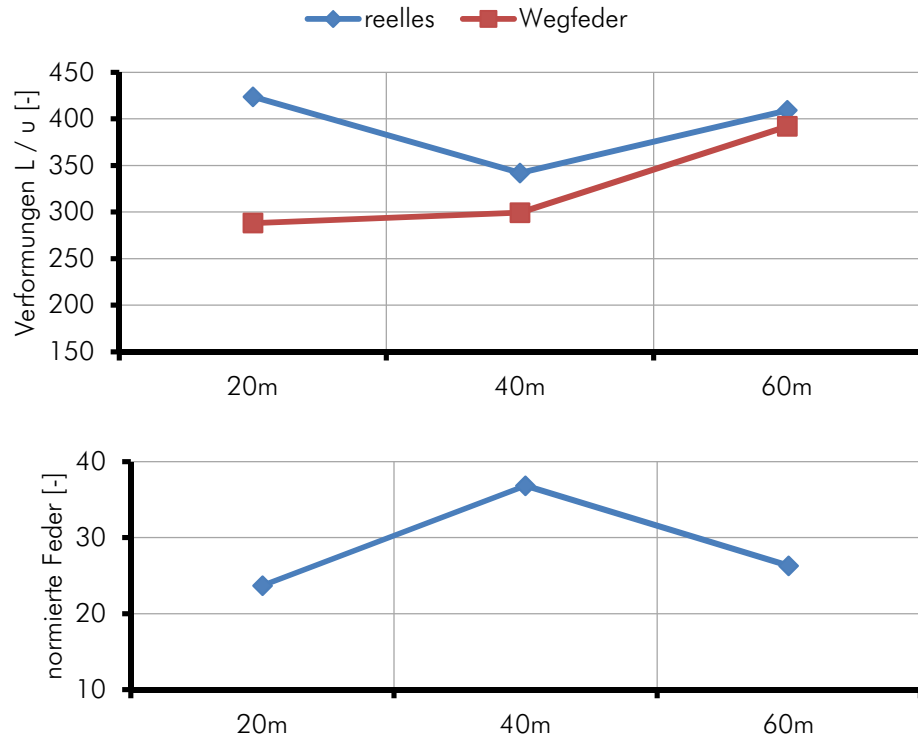


Abb. 1.6 Verformung und normierte Wegfeder für das Strebenfachwerk

Abb. 1.6 zeigt bei den Verformungen das gleiche Verhalten wie Abb. 1.5, jedoch bei der normierten Feder liegt ein gegenläufiges Verhalten vor.

- Allgemeines Verformungsverhalten

Um nun eine allgemein gültige Beschreibung des Verformungsverhaltens zu erhalten, wird die Verformung  $L / u$  abschließend mit den normierten Federn in ein Verhältnis gestellt. Daraus folgend lässt sich ein gleichmäßiger Verlauf und ein daraus resultierender Zusammenhang zwischen den Wegfedern und der Verformung darstellen.

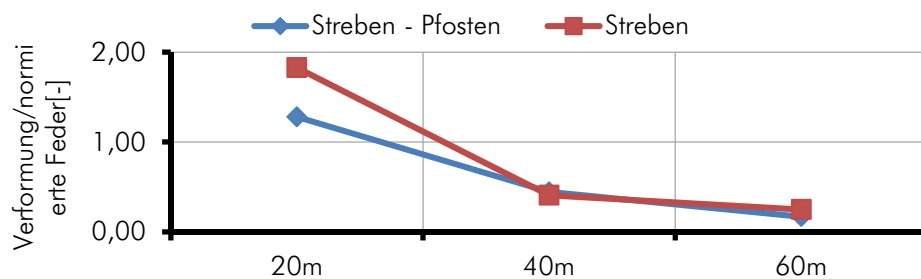


Abb. 1.7 Allgemeines Verformungsverhalten von Fachwerken

Das Verhältnis der Steifigkeiten zwischen den Druck- und den Zugelementen lässt sich wie folgt abbilden:

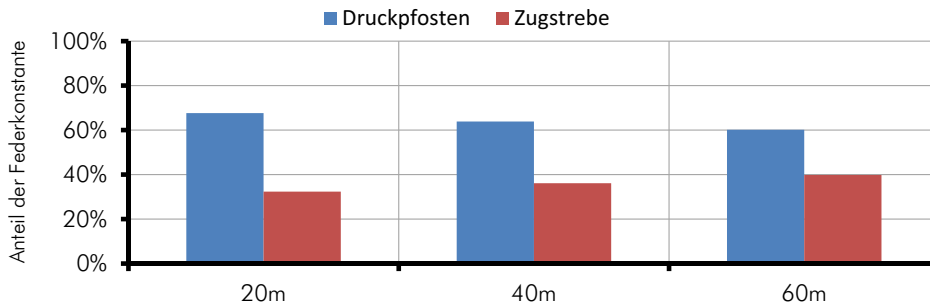


Abb. 1.8 Steifigkeitsverhältnis für Streben/Pfosten - Fachwerke

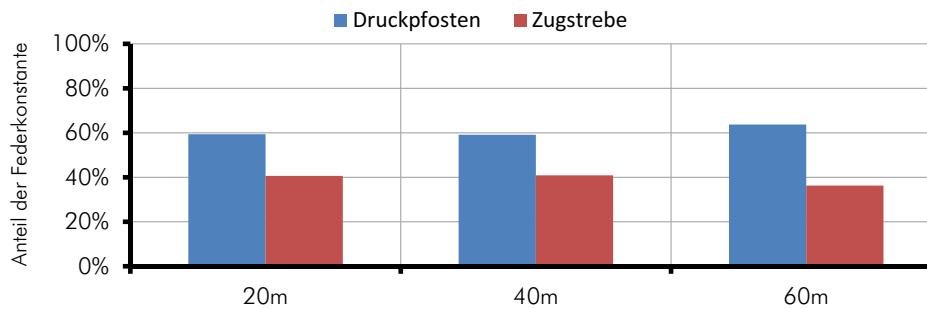


Abb. 1.9 Steifigkeitsverhältnis für Strebenfachwerke

Aus den beiden obigen Grafiken lässt sich ableiten, dass bei Streben/Pfosten - Fachwerken das Verhältnis zwischen Druck- und Zugbauteilen im Bereich zwischen 60:40 und 70:30 liegt. Für Strebenfachwerke lässt sich dieser Bereich relativ genau auf 60/40 eingrenzen.

### 1. 2. 3 Änderung durch die Berücksichtigung von Drehfedern

Anders als bei Wegfedern wird durch die Modellierung von Drehfedern das Tragsystem steifer. Sowohl bei ideellen als auch bei reellen Fachwerken weisen die Gelenke (Voll- und Halbgelenke) keine Rotationskapazität auf.

Diese Erhöhung der Steifigkeit ist jedoch so gering, dass dies nur einen Einfluss im Bereich von ein bis zwei Prozent hat. Daher kann dieser Anteil bei der Berechnung der Verformungen von Fachwerken vernachlässigt werden.

#### 1. 2. 4 Prognose des Verformungsverhaltens unter Berücksichtigung der Anschlusssteifigkeiten

Wie bereits in den obigen Darstellungen ersichtlich, gestaltet sich die Prognose der Verformungen unter Berücksichtigung der Anschlüsse als sehr schwierig. Zwar ist es möglich, die Drehfedern zu vernachlässigen, jedoch zeigen die Wegfedern keinen direkten Zusammenhang mit der Erhöhung der Verformung. Lediglich bei Streben/Pfosten - Fachwerken wäre es möglich, diesen Zusammenhang durch einen linearen Bezug herzustellen, wie dies ansatzweise in Abb. 1.7 zu erkennen ist. Für Strebenfachwerke ist die Abweichung von der Geraden jedoch zu groß, um diesen Bezug als allgemein gültig zu erklären.

Die beiden nachfolgenden Diagramme sollen jedoch eine Abschätzung des Verformungszuwachses ermöglichen.

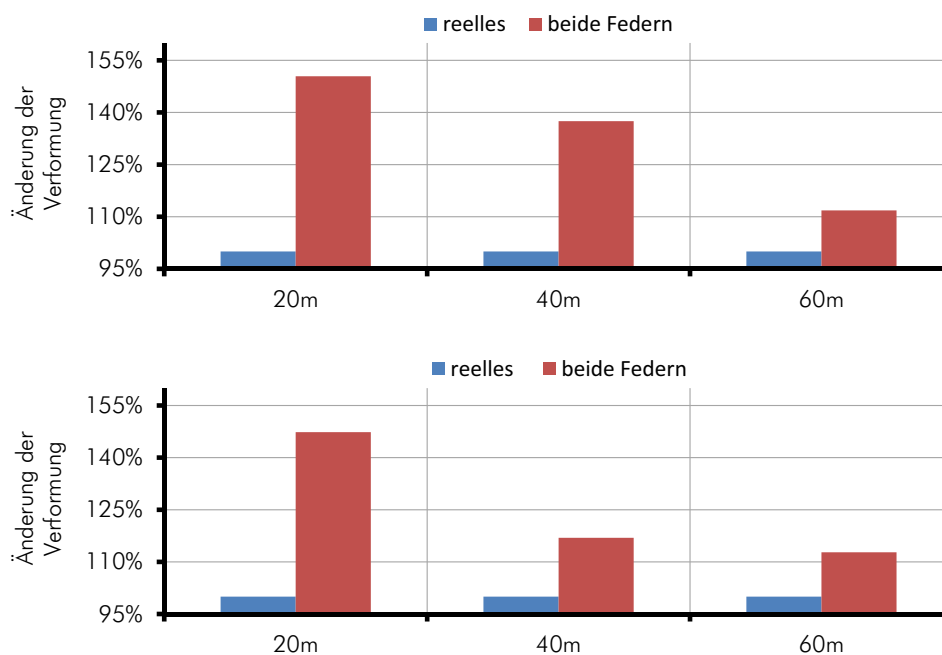


Abb. 1.10 Diagramm zur Abschätzung des Verformungszuwachses für Streben/Pfosten - Fachwerke (oben) und Strebenfachwerke (unten)

Bei der Prognose der Verformungen sind allerdings zusätzlich noch die Exzentrizitäten der Anschlüsse und die Steifigkeitsänderungen durch die verbauten Stahlbleche zu berücksichtigen.

Bei der Untersuchung der Anschlusssteifigkeiten wurden in den Parameterstudien die in ÖNORM EN 1995-1-1 [4] definierten Berechnungsgrundlagen verwendet. Bei diesen ist bekannt, dass sie nicht sehr zutreffende Ergebnisse liefern, jedoch gibt es derzeit keine besseren und auch allgemein anerkannten Möglichkeiten diese rechnerisch zu ermitteln.

## 1. 3 Schnittkraftumlagerung in den Stäben

Wie bereits aus der teilweisen Auswertung in Kapitel 4 zu erkennen war, tritt bei den Normalkräften in den Stäben nur eine sehr geringe Veränderung auf. Daher werden diese hier nicht mehr näher behandelt. Da sich jedoch die Knicklängen der Stäbe über die Modellierungsschritte variieren, wird die Normalkraftbeanspruchung in Abschnitt 1. 4 nochmals behandelt.

Im Gegensatz zu den Normalkräften, sind die Momente und Querkräfte einer Schwankung durch die Modellierungsschritte unterworfen. Diese bezieht sich vor allem auf die Modellierung der Balkenstäbe bei einem reellen Fachwerk.

### 1. 3. 1 Änderung der Querkräfte

In Abb. 7.6 und Abb. 7.9 des Kapitels 4 ist der Verlauf der Querkräfte über die Modellierungsschritte zu erkennen. Daraus ist ersichtlich, dass die Obergurte keine sehr großen Schwankungen aufweisen. Dies liegt an der Lasteinleitung durch eine Streckenlast, wodurch im Bezug auf die Lasteinleitung kein Unterschied zwischen einem ideellen und einem reellen Fachwerk besteht.

Die anderen Bauteile erhalten durch die Modellierung der Federn und Exzentrizitäten zusätzliche Querkräfte, welche daraus resultieren, dass Kräfte von steiferen Bereichen angezogen werden. Diese zusätzlichen Schnittkräfte sind (bedingt durch den Querkraftverlauf) in den Anschlussbereichen konzentriert und werden daher in Abschnitt 1. 4 näher behandelt.

### 1. 3. 2 Änderung der Momente

Die Änderung der Querkräfte führt zu einer unweigerlichen Änderung in den Momenten. Bei den Obergurten hat diese Änderung wiederum keinen Einfluss, da das Feldmoment, welches bereits in der ersten Modellierung vorliegt, lediglich in den Stützbereich verschoben wird. Alle anderen Bauteile weisen jedoch nicht von Anfang an eine Momentenbeanspruchung auf. Bei den Untergurten und den Druckpfosten führt dies zu einer signifikanten Erhöhung der Ausnutzung, welche in Abschnitt 1. 4 näher behandelt wird.

Die Änderung der Momente lässt sich nicht so leicht darstellen, da es auf Grund der Modellierung eines ideellen Fachwerkes keinen Bezugspunkt gibt, welcher als Ausgangswert genutzt werden könnte. Um eine einheitliche Darstellung zu ermöglichen, werden nachfolgend nur die Differenzen der Momente zwischen den Modellierungsschritten dargestellt. Dadurch wird eine vom Ausgangspunkt unabhängige Darstellung ermöglicht, welche jeweils nur den Zuwachs oder die Abnahme der Momente abbildet.

- Verhalten der Untergurte

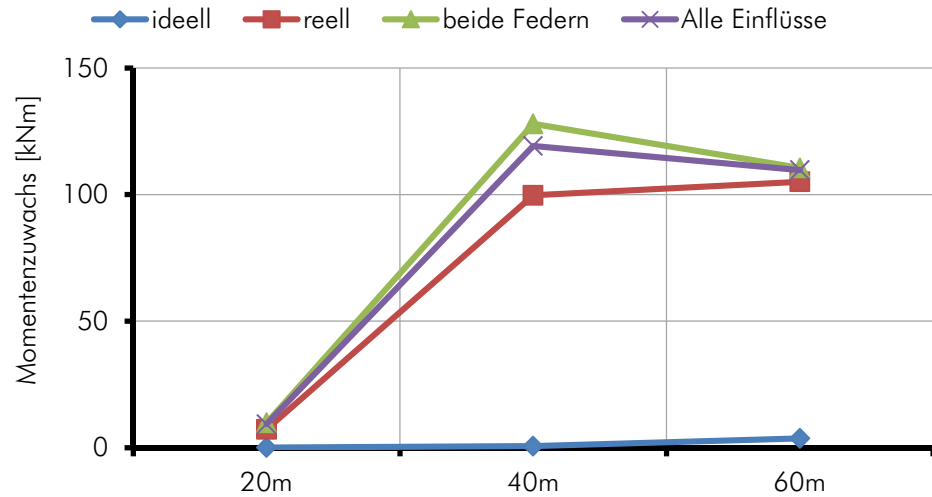


Abb. 1.11 Änderung des Momentenverlaufes der Untergurte für Streben/Pfosten - Fachwerk

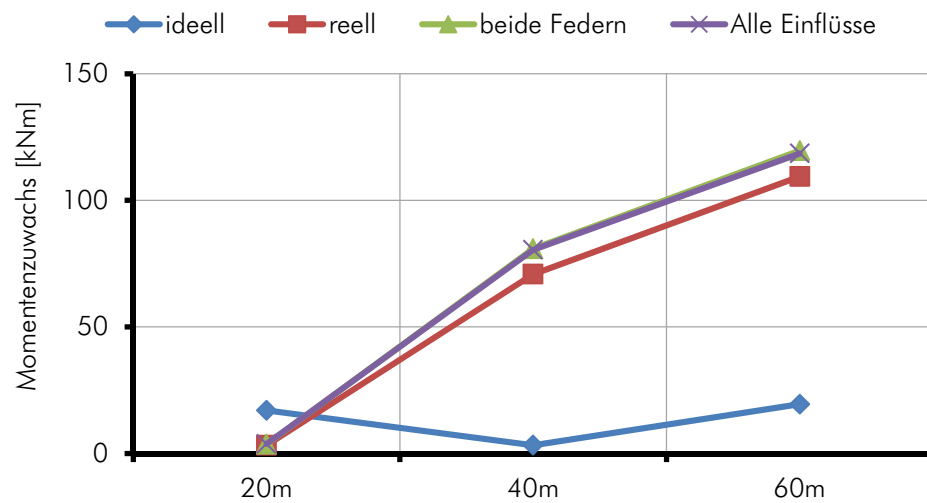


Abb. 1.12 Änderung des Momentenverlaufes der Untergurte für Streben Fachwerk

Wie aus den beiden obigen Abbildungen zu erkennen ist, gibt es einen spannenweitenbedingten Anstieg des Momentes. Zusätzlich ist zu erkennen, dass nach der Modellierung als reelles Fachwerk kein signifikanter Zuwachs der Momente mehr vorliegt.

• Verhalten der Druckposten

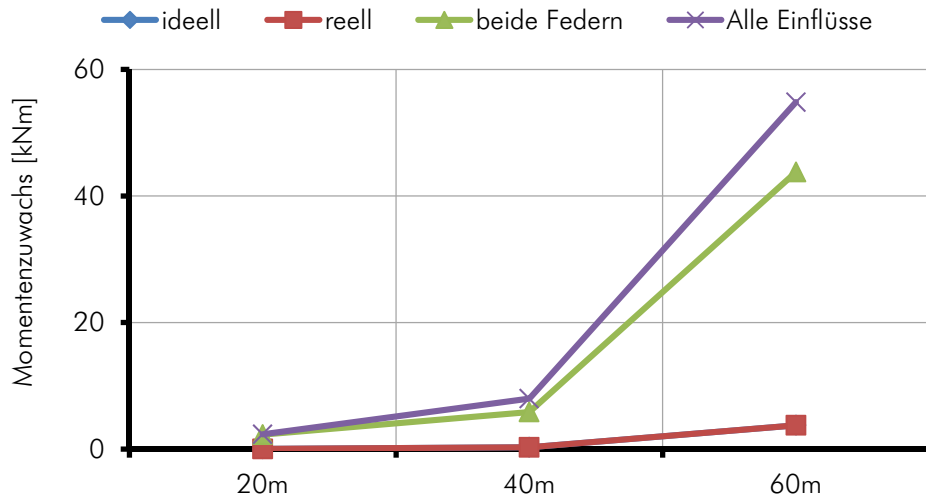


Abb. 1.13 Änderung des Momentenverlaufes der Druckposten für Streben/Pfosten - Fachwerk

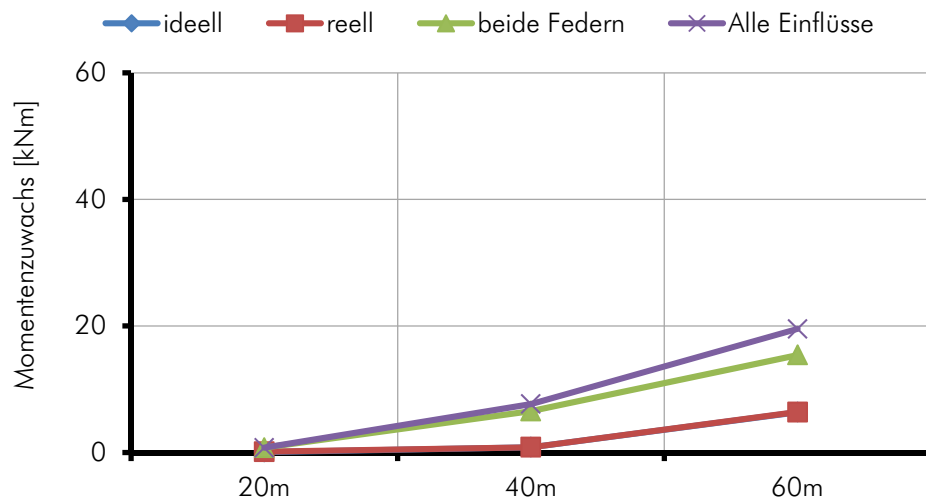


Abb. 1.14 Änderung des Momentenverlaufes der Druckposten für Strebenfachwerk

Die beiden oben dargestellten Momentenverläufe zeigen ebenso wie jene des Untergurtes eine Spannweitenabhängigkeit. Da der größte Anteil an den Momenten in den Anschlussbereichen liegt, wird dies in Abschnitt 1. 5 näher bearbeitet.



- Verhalten der Zugstreben

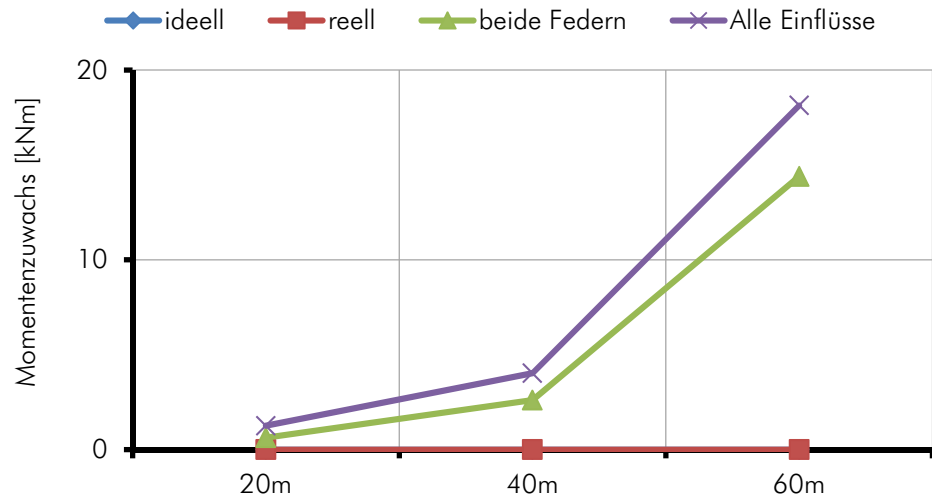


Abb. 1.15 Änderung des Momentenverlaufes der Zugstreben für Streben/Pfosten - Fachwerk

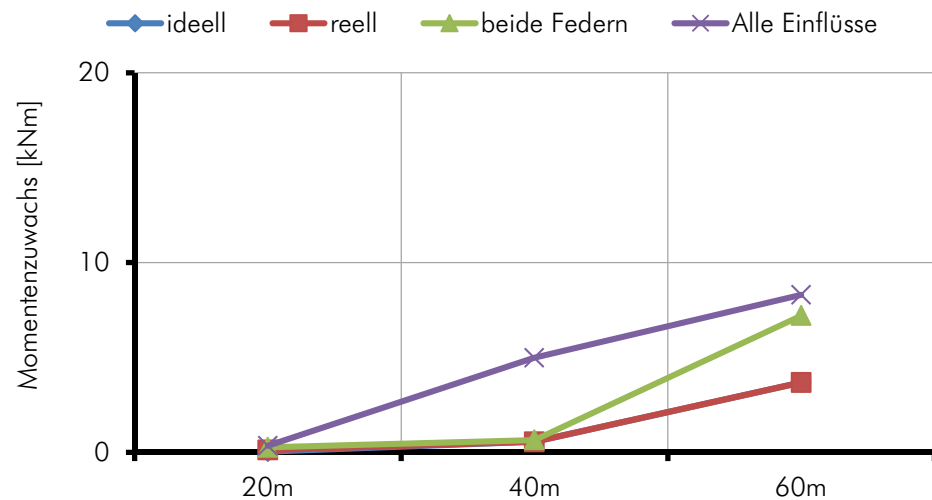


Abb. 1.16 Änderung des Momentenverlaufes der Zugstreben für Strebenfachwerk

Das Fehlen eines Momentenverlaufes in den Modellierungsschritten „ideell“ und „reell“ bei den Pfosten - Streben Fachwerken lässt sich durch ihre Vertikalität begründen, da durch den Lastfall Eigengewicht kein Moment entsteht, sondern dieses durch eine stabparallele Normalkraft abgeleitet wird.

Ebenso wie bei den Druckpfosten befindet sich das größte Moment in den Anschlussbereichen des Stabes, daher wird auf diesen Punkt ebenso in Abschnitt 1.5 näher eingegangen.

## 1.4 Änderung der Querschnittsausnutzung

Im nachfolgenden Kapitel wird nur der Ausnutzungsgrad der Bauteil- und Bruttoquerschnittsnachweise dargestellt. Die Nettoquerschnittsnachweise werden in Abschnitt 1. 5 näher bearbeitet.

- Verhalten der Obergurte

Wie bereits beschrieben wurde, ändern sich zwar die Momente in den Obergurten, jedoch kommt es hier nur zu einer Umlagerung von den Feld- in die Stützbe- reich der Träger. Diese Umlagerung tritt zwischen den Modellierungsschritten ideell und reell auf, hat jedoch auf die Ausnutzung der Querschnitte einen sehr geringen Einfluss. Durch die Berücksichtigung der Federn in der Modellierung, müssen zusätzliche Schnittkräfte aufgenommen werden, welche die Ausnutzung der Obergurte erhöhen.

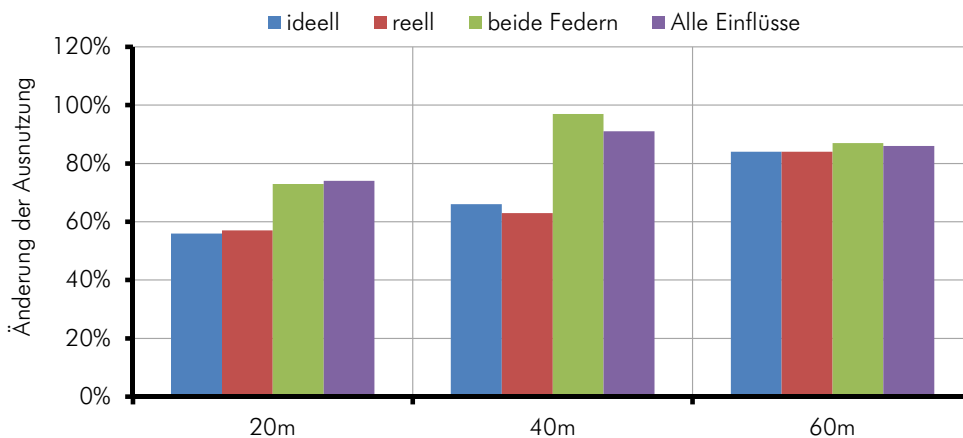


Abb. 1.17 Änderung der Ausnutzung der Obergurte für Streben/Pfosten - Fachwerke

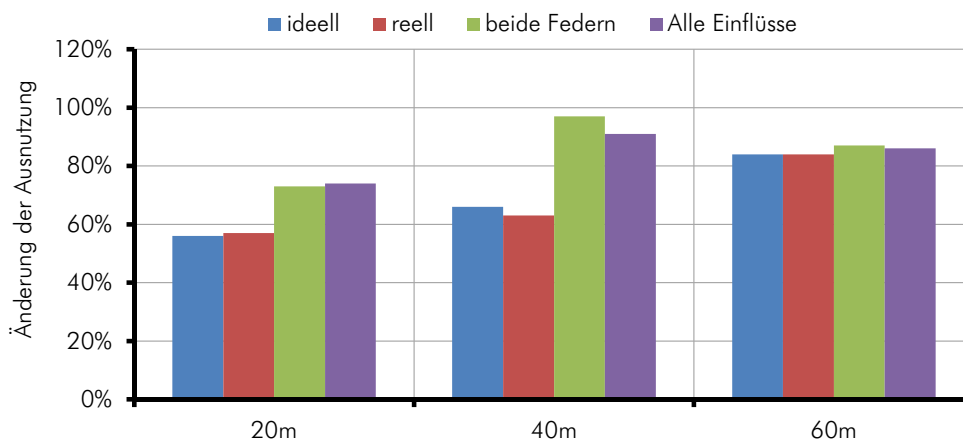


Abb. 1.18 Änderung der Ausnutzung für Obergurte für Strebenfachwerke

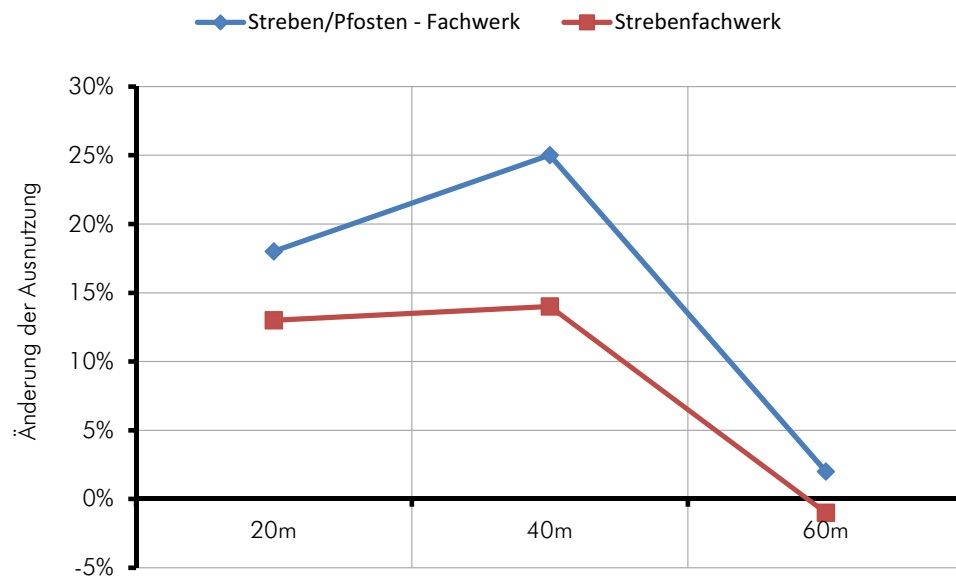


Abb. 1.19 Differenz der Ausnutzung in den Obergurten zwischen Streben/Pfosten - Fachwerken und Strebenfachwerken mit Modellierung der Anschlüsse

Die Veränderung der Ausnutzung lässt sich in Abb. 1.19 erkennen. Die Abszisse stellt dabei die Differenz der Ausnutzung zwischen dem „ideellen“ Fachwerkmodell und dem „reellen“ Fachwerkmodell mit Modellierung aller Einflüsse dar.

Dabei lassen sich folgende Punkte erkennen:

- Der ingenieurmäßige Ansatz, bei der Vorbemessung die Ausnutzung auf 80% zu begrenzen, kann in gewissen Bereichen zu einer Überschreitung dieser führen.
- Bis zu einer gewissen Spannweite (hier 40 m) ist die Anschlusssteifigkeit im Verhältnis zur Bauteilsteifigkeit so gering, dass die Modellierung der Anschlüsse einen großen Einfluss auf die Ausnutzung hat.
- Bei großen Spannweiten führt die geringe Differenz in den Steifigkeitsverhältnissen der Obergurte und den Anschlüssen zu kaum einer Schnittkraftumlagerung in diese und daher auch nur zu einer geringen Änderung in der Ausnutzung. Dieses Ergebnis ist auch in Abb. 1.17 und Abb. 1.18 zu erkennen.

Allgemein lässt sich für die Obergurte zusammenfassen, dass die Änderung der Ausnutzung mit der Spannweite kleiner wird. Zwar ist in Abb. 1.19 ein Anstieg bei 40,00m zu erkennen, jedoch rührt dieser aus der erforderlichen Nettoquerschnittsanpassung im Zuge der Anschlussbemessung für diese Konfiguration her.

- Verhalten der Untergurte

Bei der Ausnutzung der Untergurte ist zu beachten, dass in Fachwerken Untergurte planmäßig durch Zug beansprucht sind. Bei einem zusätzlichen Auftreten eines Momentes kommt es zu einer Überlagerung von Normal- und Biegebeanspruchungen, jedoch ist bei Zugbeanspruchung keine quadratische Überlagerung dieser erlaubt, was schnell zu einer Erhöhung der Ausnutzung führt.

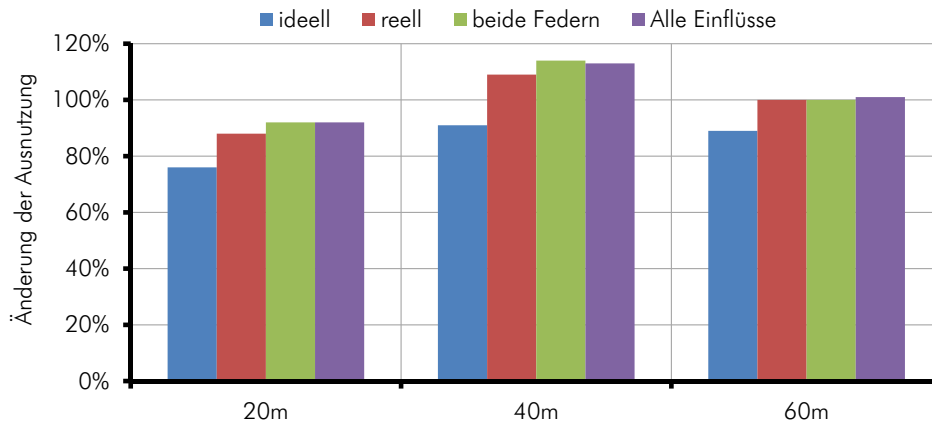


Abb. 1.20 Änderung der Ausnutzung der Untergurte für Streben/Pfosten - Fachwerke

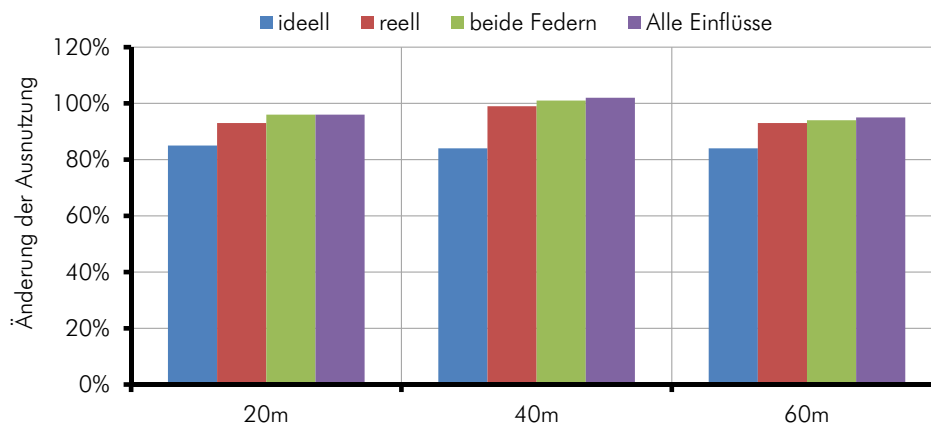


Abb. 1.21 Änderung der Ausnutzung für Untergurte für Strebenfachwerke

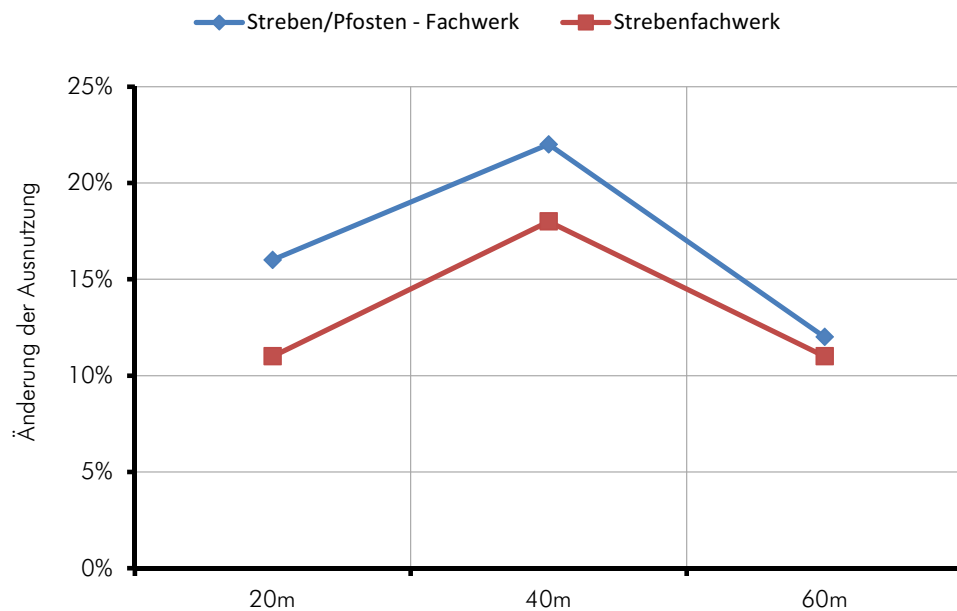


Abb. 1.22 Differenz der Ausnutzung in den Untergurten zwischen Streben/Pfosten - Fachwerken und Strebenfachwerken mit Modellierung der Anschlüsse

Die Veränderung der Ausnutzung lässt sich in Abb. 1.22 erkennen. Die Abszisse stellt dabei die Differenz der Ausnutzung zwischen dem „ideellen“ und dem „reellen“ Fachwerkmodell mit Modellierung aller Einflüsse dar.

Dabei lassen sich folgende Punkte erkennen:

- Ebenso wie bei den Obergurten ist der ingenieurmäßige Ansatz, die Grenze der Vorbemessung auf 80% zu setzen, zu hoch.
- Es ist keine Spannweitenabhängigkeit der Änderung der Ausnutzung zu erkennen.
- Der Knick bei einer Spannweite von 40,00 m in Abb. 1.22 ist (gleich wie bei den Obergurten) auf die erforderliche Querschnittsanpassung in der Anschlussbemessung zurückzuführen.

Für die Untergurte gilt im Gegensatz zu den Obergurten, dass hier die Spannweite nicht von sehr hohem Einfluss ist. Daraus resultierend kann in der Vorbemessung von einem Konstantbleiben des Querschnittes ausgegangen werden, da die Zunahme der Ausnutzung in einem abschätzbaren Bereich zu liegen kommt.

- Verhalten der Druckpfosten

Druckpfosten weisen eine große Knickgefahr auf, da sie planmäßig kaum Biegemomente aufnehmen müssen, und daher sehr schlank ausfallen können. Diese Schlankheit führt jedoch sehr schnell zu einem Ausweichen unter der Last und damit zu einem Bauteilversagen.

Dieses Bauteilversagen ist, wie bereits beschrieben, von der Knickfigur des Bauteils abhängig. Bei der Berücksichtigung der Anschlüsse in der Modellierung ändert sich daher auch dessen Knickfigur.

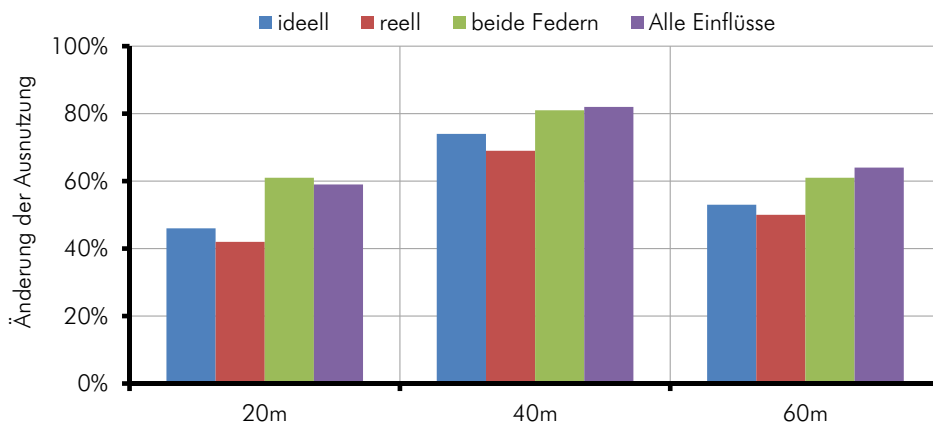


Abb. 1.23 Änderung der Ausnutzung der Druckpfosten für Streben/Pfosten - Fachwerke

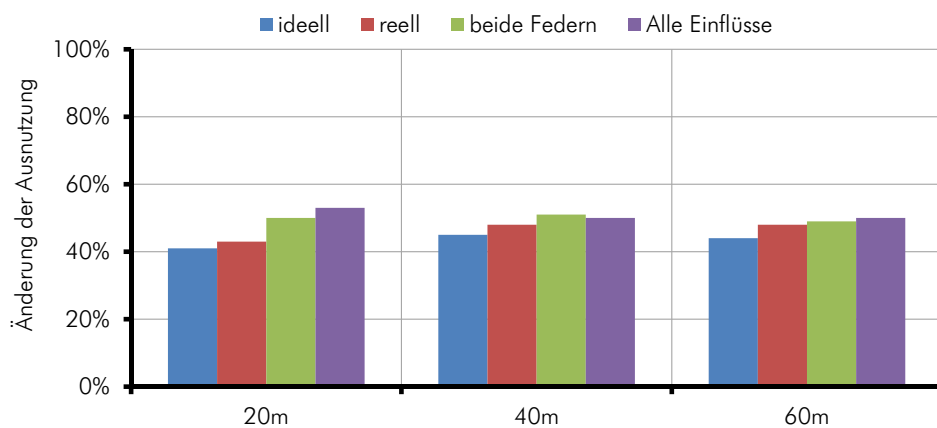


Abb. 1.24 Änderung der Ausnutzung für Druckpfosten für Strebenfachwerke

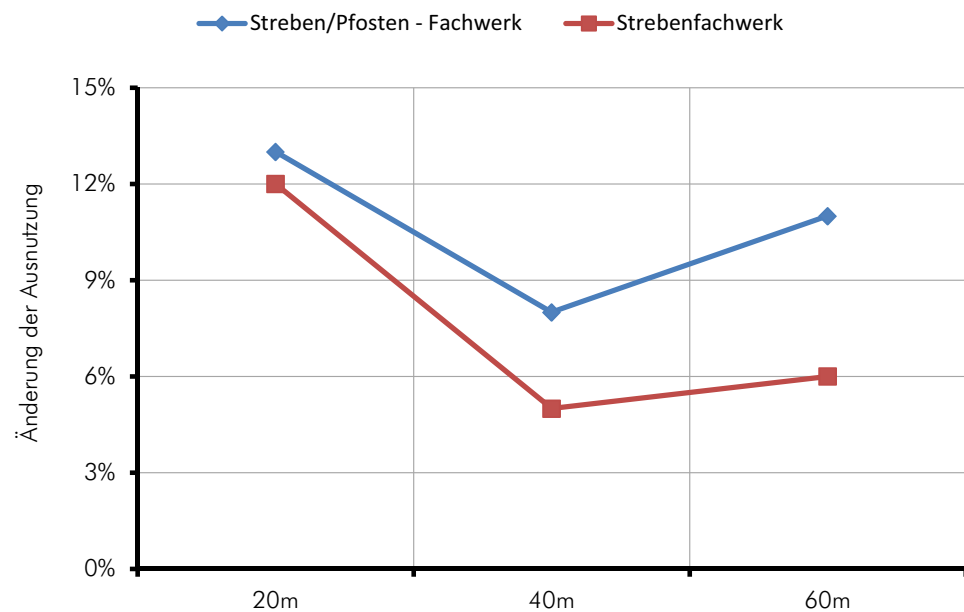


Abb. 1.25 Differenz der Ausnutzung in den Druckpfosten zwischen Streben/Pfosten - Fachwerken und Strebenfachwerken mit Modellierung der Anschlüsse

Die Veränderung der Ausnutzung lässt sich in Abb. 1.25 erkennen. Die Abszisse stellt dabei die Differenz der Ausnutzung zwischen dem „ideellen“ und dem „reellen“ Fachwerkmodell mit Modellierung aller Einflüsse dar.

Dabei lassen sich folgende Punkte erkennen:

- Die Änderung der Ausnutzung schwankt weniger als bei den beiden auf Biegetragfähigkeit beanspruchten Bauteile Obergurt und Untergurt.
- Der Einfluss der Anschlüsse auf die Knickfigur des gesamten Fachwerkes ist geringer als dies den Anschein macht. Zwar wird durch die Modellierung der Drehfeder die Steifigkeit erhöht, jedoch wird diese gleichzeitig durch Modellierung der Wegfeder verkleinert. Allgemein lässt sich sagen, dass die Knickfigur nur geringen Schwankungen unterliegt.

Zusätzlich weisen die Druckpfosten in der durchgeführten Parameterstudie teils große Querschnittsveränderungen auf. Um die gesamten erforderlichen Verbindungsmittel aufnehmen zu können, wurde jedoch diese Anpassung bereits in der ersten Modellierung durchgeführt. Daher änderten sich zwar die Steifigkeiten im System, das Verhältnis der Steifigkeiten bleibt über den gesamten Modellierungsablauf hindurch konstant.

- Verhalten der Zugstreben

Zugstreben weisen ebenso wie Druckpfosten eine Normalkraftbeanspruchung auf, jedoch liegt hier kein Bauteilversagen in Form einer Knickbeanspruchung vor.

Bei den Querschnittsnachweisen für Zugbauteile darf keine quadratische Überlagerung von Normalkraft und Moment geführt werden.

Im Vergleich mit den Druckpfosten erhalten die Zugstreben weniger Last, wodurch sich die Belastung der Anschlüsse verringert, welches wiederum zu einer kleineren Anschlusssteifigkeit führt und daher geringere Momente durch die Anschlüsse angezogen werden.

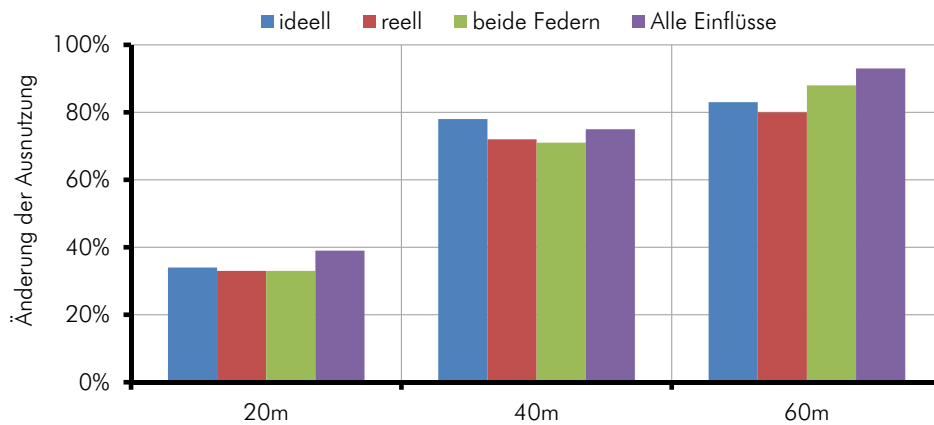


Abb. 1.26 Änderung der Ausnutzung der Zugstreben für Streben/Pfosten - Fachwerke

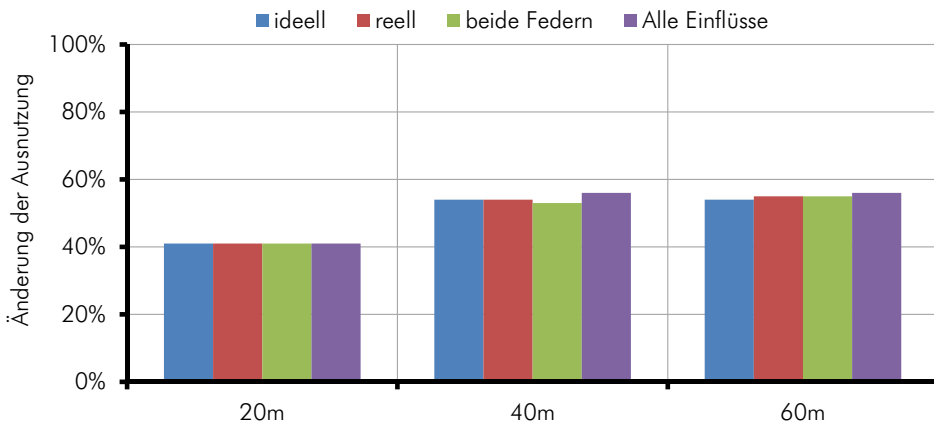


Abb. 1.27 Änderung der Ausnutzung für Zugstreben für Strebenfachwerke



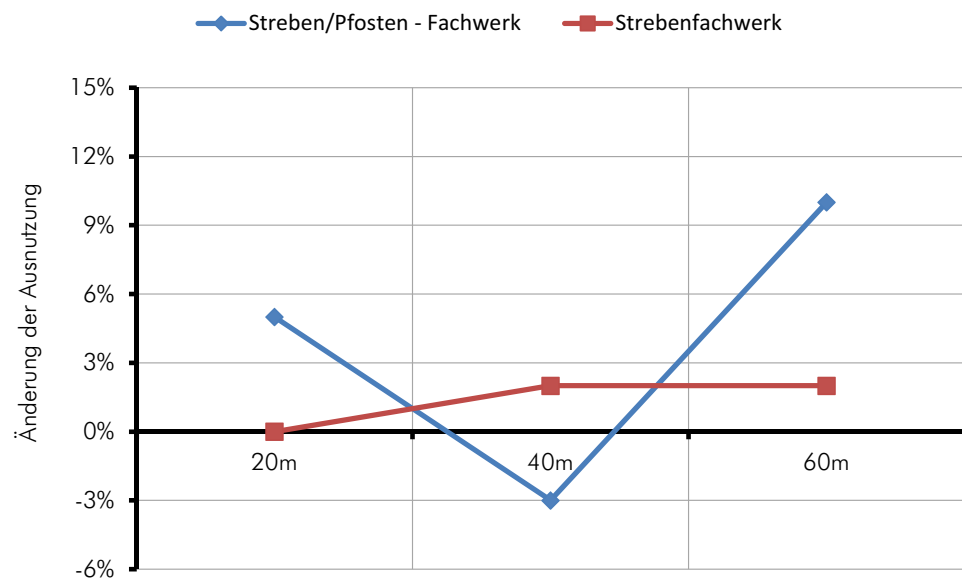


Abb. 1.28 Differenz der Ausnutzung in den Zugstreben zwischen Streben/Pfosten - Fachwerken und Strebenfachwerken mit Modellierung der Anschlüsse

Die Veränderung der Ausnutzung lässt sich in Abb. 1.28 erkennen. Die Abszisse stellt dabei die Differenz der Ausnutzung zwischen dem „ideellen“ und dem „reellen“ Fachwerkmodell mit Modellierung dar.

Dabei lässt sich der folgende Punkt erkennen:

- Bei den Zugstreben sind die Schwankungen in der Ausnutzung so gering, dass diese keine besondere Betrachtung zu Beginn der Modellierung erfordern.

## 1.5 Verhalten der Anschlusspunkte

Aus den vorherigen Kapiteln geht hervor, dass sich durch die Berücksichtigung der Anschlüsse in der Modellierung sowohl das Verformungs- als auch das Tragverhalten ändert.

Nachfolgend sollen die Effekte auf die Anschlüsse und die Anschlussbereiche untersucht werden. Dabei werden alle Punkte, die bei der Bemessung und Nachweisführung für Anschlüsse und deren umliegende Querschnittsbereiche erforderlich sind, betrachtet.

Dabei lassen sich die Änderungen nach den folgenden Punkten gliedern:

- in die Bruttoquerschnitte der Anschlussbereiche
- in die Nettoquerschnitte der Anschlussbereiche
- in die Beanspruchung der Verbindungsmittel
- in die Beanspruchung der Stahlbauteile und
- sonstige Effekte

Alle diese Änderungen in den Anschlusspunkten lassen sich am besten durch die Änderung der Steifigkeit und der daraus resultierenden Umlagerung der Schnittkräfte abbilden.

Als Bezugspunkt für die Änderungen werden daher jene Schnittkräfte verwendet, die bereits in der ersten Modellierung als ideelles Fachwerk vorliegen. Aus dieser Forderung resultierend wird dieser Bezugspunkt meist durch die Normalkraft definiert, da diese relativ konstant ist und in allen Bauteilen bereits in der ideellen Modellbildung vorhanden ist.

Bei dieser Auswertung werden jedoch nur die Anschlusspunkte der Druckpfosten und Zugstreben analysiert, da die Querschnitte der Ober- und Untergurte derart massiv sind, sodass die geringen, eingeleiteten Schnittkräfte durch die Anschlüsse kaum eine Auswirkung auf diese haben. Dabei wird von der konstruktiv richtigen Einbindung der Anschlüsse in diese beiden Bauteile ausgegangen, wodurch keine ungünstigen Beanspruchungen (z.B. Querkraft), welche zu einem Versagen führen könnten, auftreten.

### 1. 5. 1 Zusätzliche Momente in den Anschlusspunkten

Um die Momente in den Anschlusspunkten definieren zu können, werden diese auf die Normalkraft im Stab bezogen. Daraus ergibt sich ein Abstand, mit welchem die vorhandene (und in der ersten Berechnung bekannte) Normalkraft multipliziert werden kann, um das Moment bereits in der Vorbemessung des Anschlusses berücksichtigen zu können.

Dieses zusätzliche Moment hat folgende Effekte auf den Anschlussbereich:

- Änderung des Bruttoquerschnittsnachweises durch zusätzliche Biegespannungen
- Änderung des Nettoquerschnittsnachweises durch zusätzliche Biegespannungen
- Erhöhung der Stabdübelbeanspruchung durch das Moment
- Anpassung des Nachweises der Stahlbauteile durch zusätzliche Biegespannungen

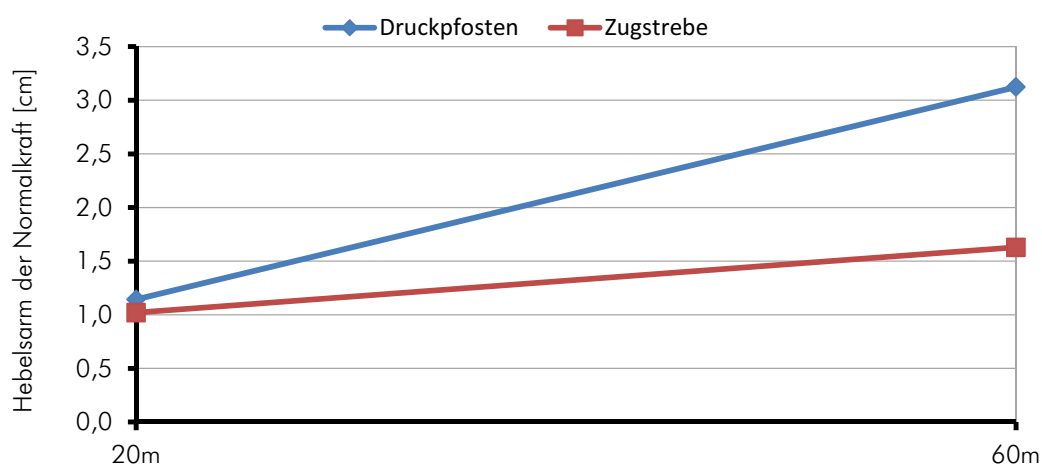


Abb. 1.29 Diagramm des Hebelsarms der Normalkraft für Streben/Pfosten - Fachwerke

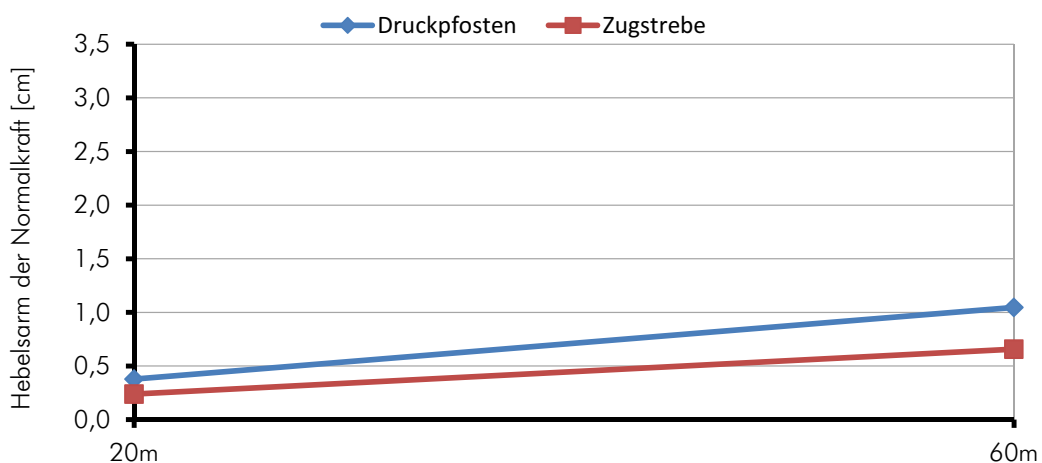


Abb. 1.30 Diagramm des Hebelsarms der Normalkraft für Strebenfachwerke

### 1. 5. 2 Zusätzliche Querkräfte in den Anschlusspunkten

Ebenso wie die Momente in den Anschlusspunkten, können auch die Querkräfte auf die Normalkraft bezogen werden. Daraus ergibt sich ein Faktor, mit welchem die Normalkraft multipliziert werden kann, um daraus die Querkraft zu erhalten.

Die zusätzliche Querkraft in den Anschlussbereichen führt zu folgenden Effekten:

- Änderung des Bruttoquerschnittsnachweises durch zusätzliche Schubspannungen
- Änderung des Nettoquerschnittsnachweises durch zusätzliche Schubspannungen
- Erhöhung der Stabdübelbeanspruchung durch zusätzliche Abscherbeanspruchung
- Anpassung des Nachweises der Stahlbauteile durch zusätzliche Schubspannungen

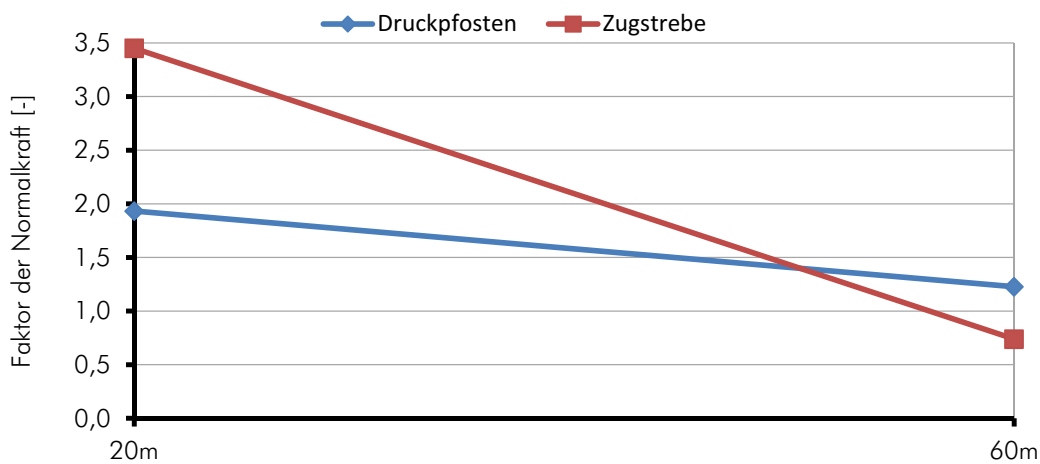


Abb. 1.31 Diagramm für den Faktor der Normalkraft für Streben/Pfosten - Fachwerke

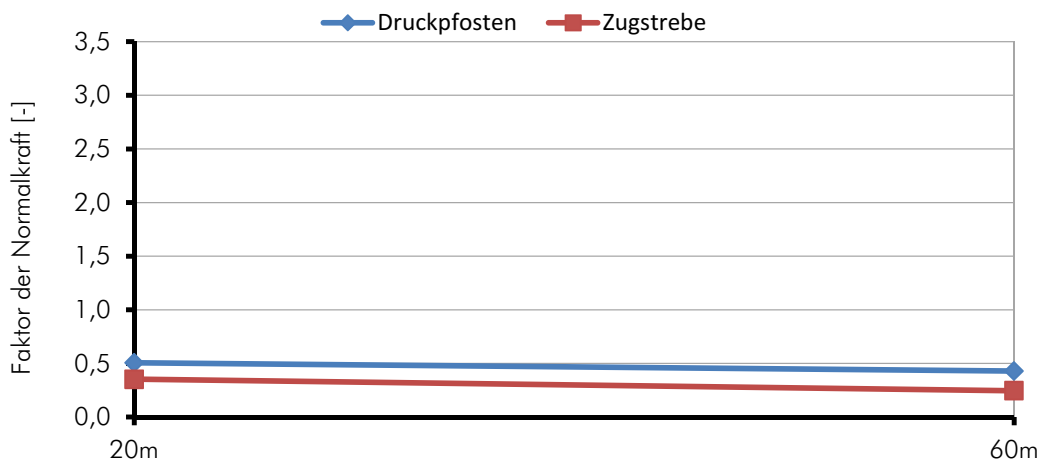


Abb. 1.32 Diagramm für den Faktor der Normalkraft für Strebenfachwerke

## 2 Empfehlungen für die praktische Modellierung von Fachwerken

In diesem Punkt sollen die Ergebnisse aus der Parameterstudie und deren Auswertung noch einmal gezeigt werden. Dabei werden hier jedoch nur die dafür erforderlichen Abbildungen erneut dargestellt und zu diesen eine Aussage getroffen, um die Modellierung von Fachwerken zu vereinfachen.

Ziel soll dabei sein, die Effekte in den Anschlüssen bereits in einer einfachen Modellierung mitberücksichtigen zu können, um eine schnellere Abschätzung zu ermöglichen und damit eine Grundlage für weitere Modellierungen zu geben, welche keinen zu hohen Änderungs- und Anpassungsaufwand erfordert.

Dazu wird dieser Abschnitt in folgenden Punkte gegliedert:

- Empfehlungen für die Vorbemessung der Bauteile
- Empfehlungen für die Vorbemessung der Anschlüsse
- Empfehlungen für die Verformungsberechnung

## 2.1 Vorbemessung der Holzbauteile

Allgemein lassen sich für die Vorbemessung der tragenden Holzbauteile folgende Schlussfolgerungen (für die Bruttoquerschnittsnachweise) ziehen:

- Strebenfachwerke weisen eine geringere Anfälligkeit auf die Erhöhung der Ausnutzung durch die Modellierung der Anschlüsse auf, als Streben/Pfosten - Fachwerke.
- Obergurte und Untergurte von Fachwerken beider Typen sollten, wenn sie durch ein ideelles Fachwerk Vorbemessen werden, mit einer Reserve von mehr als 20% dimensioniert werden. Bei großen Spannweiten kann diese Reserve jedoch auf ca. 10% reduziert werden.

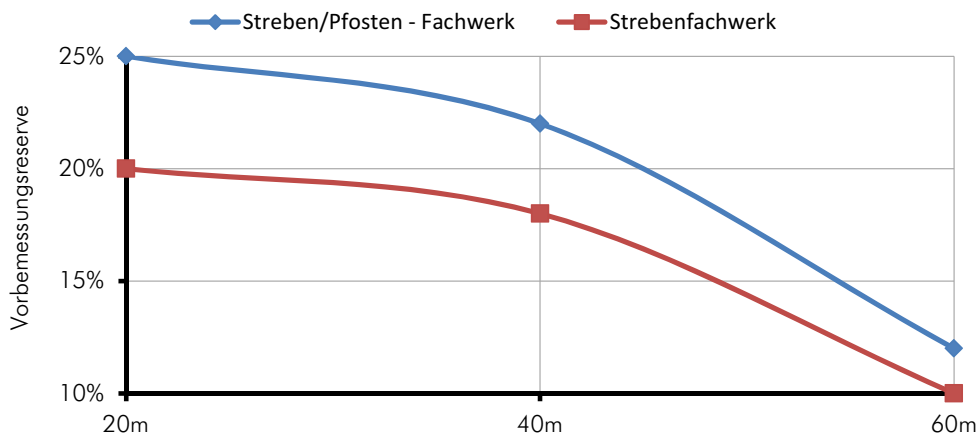


Abb. 2.1 Empfohlene Vorbemessungsreserve für Ober- und Untergurte

- Für die Druckpfosten ist bei einer Vorbemessung eine Reserve von ca. 15% ausreichend.

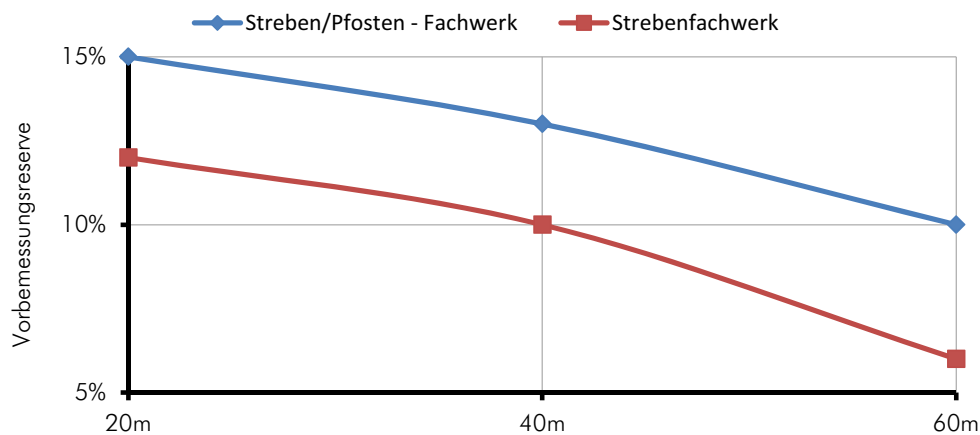


Abb. 2.2 Empfohlene Vorbemessungsreserve für Druckpfosten

- Zugstreben für Streben/Pfosten - Fachwerke sollten eine höhere Vorbemessungsreserve aufweisen als jene für Strebenfachwerke.

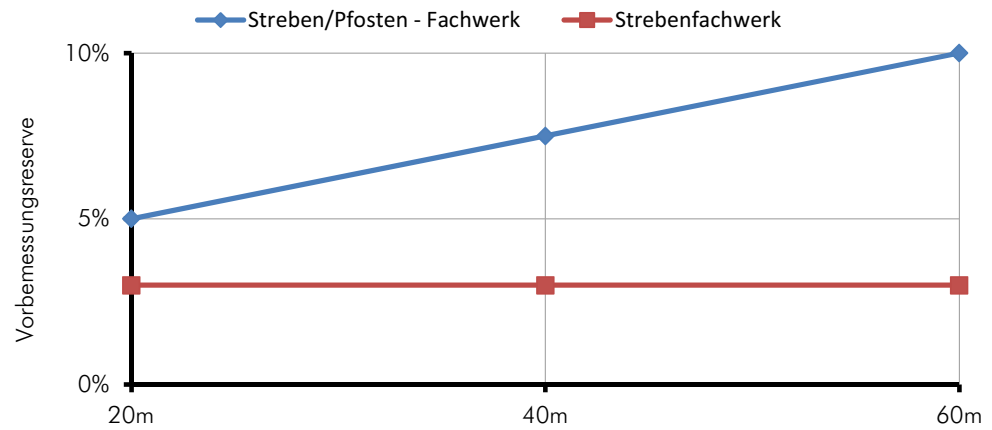


Abb. 2.3 Empfohlene Vorbemessungsreserve für Zugstreben

## 2.2 Vorbemessung der Anschlüsse

Bei der Vorbemessung der Anschlüsse ist es, wie bereits in Abschnitt 1.5 beschrieben, erforderlich, die zusätzlichen Schnittkräfte abzuschätzen.

Allgemein lässt sich zur Erhöhung der Schnittkräfte sagen, dass Strebenfachwerke eine geringere Anfälligkeit auf die Effekte durch die Modellierung der Anschlüsse zeigen, als Streben/Pfosten - Fachwerke.

### 2.2.1 Anschlussvorbemessung der Druckpfosten

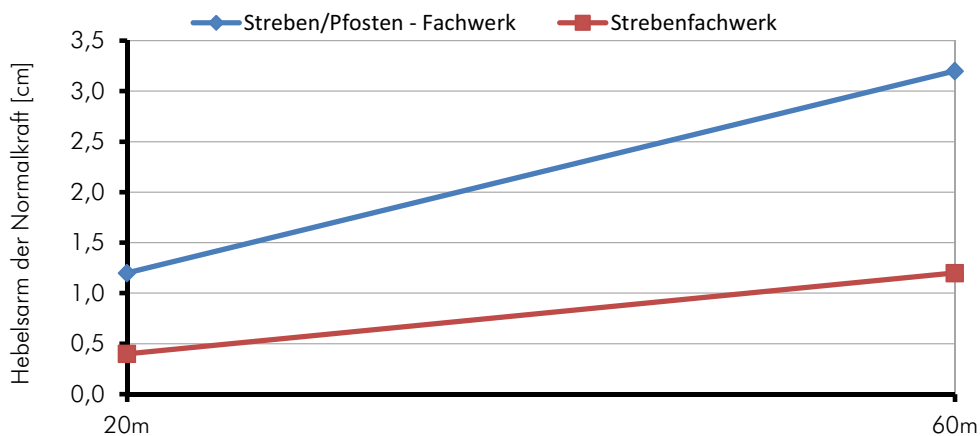


Abb. 2.4 Empfohlene Vorbemessungsreserve für das Moment in den Druckpfosten

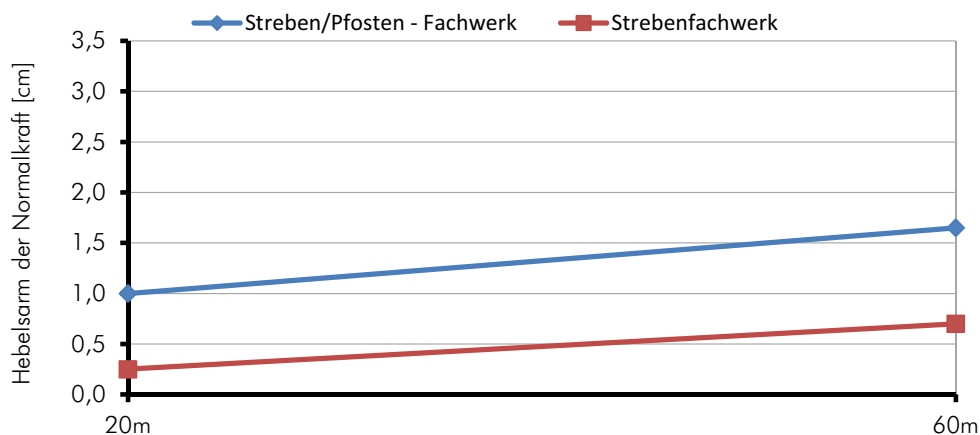


Abb. 2.5 Empfohlene Vorbemessungsreserve für die Querkraft in den Druckpfosten



2. 2. 2 Anschlussvorbemessung der Zugstreben

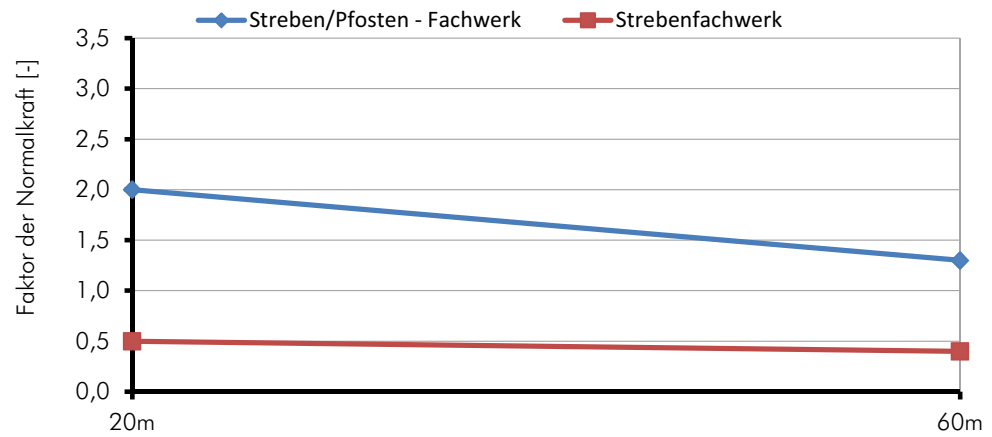


Abb. 2.6 Empfohlene Vorbemessungsreserve für das Moment in den Zugstreben

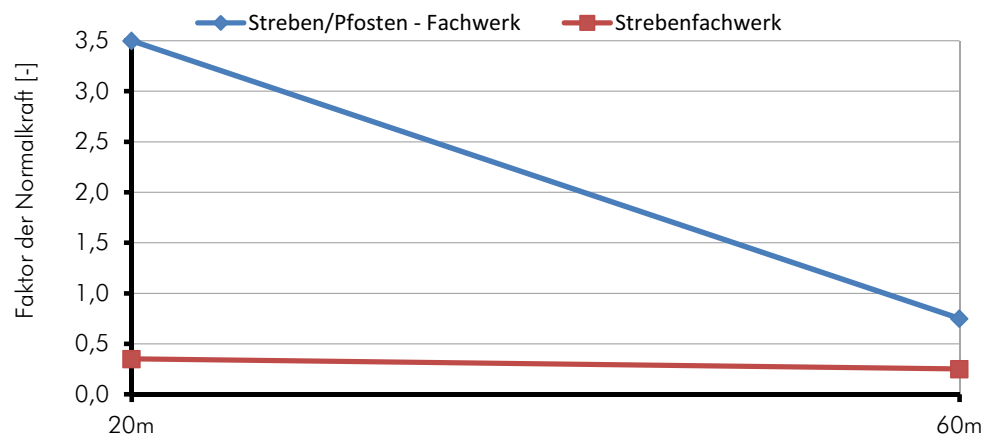


Abb. 2.7 Empfohlene Vorbemessungsreserve für die Querkraft in den Zugstreben

## 2.3 Verformungsberechnung

Eine Abschätzung der Änderungen in der Verformungsberechnung gestaltet sich schwierig, da die Erhöhung der Verformung sehr stark von der Verteilung der Steifigkeit innerhalb des Systems abhängt. Diese Verteilung kann durch eine geringe Änderung in den Querschnitten schon derart beeinflusst werden, dass daraus ein ganz anderes Verformungsverhalten entstehen würde.

Die nachfolgende Abbildung soll daher nur das generelle Verhalten der Verformung darstellen. Wie ersichtlich ist, nimmt der Verformungszuwachs mit der Spannweite ab. Dies liegt an den höheren Steifigkeiten in den Anschlussbereichen und Querschnitten. Bei kleinen Spannweiten sollte daher eine größere Reserve in der Verformung miteinberechnet werden, da bei diesen eine Vergrößerung der Anschlusssteifigkeit zu einem unwirtschaftlichen Aufwand führen würde.

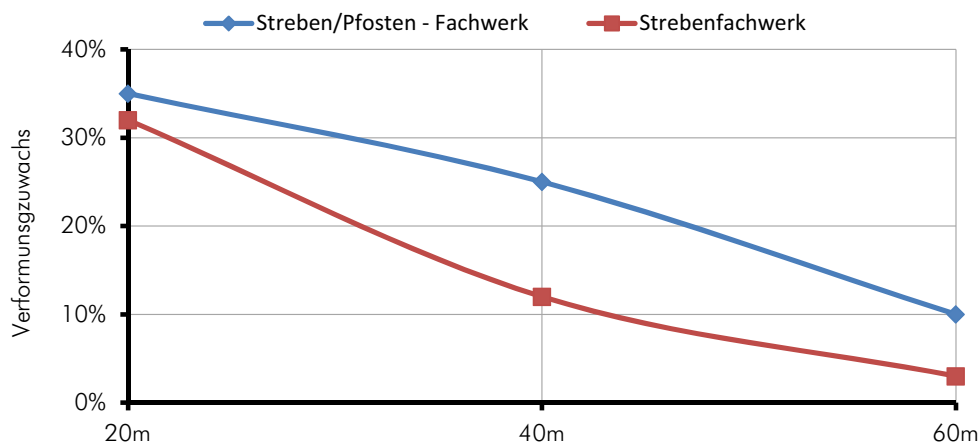


Abb. 2.8 zu berücksichtigender Verformungszuwachs in der Modellierung von Fachwerken

Um eine bessere Abschätzung des Verformungszuwachses zu geben, erscheint hierbei die einfachste Möglichkeit, nur die Wegfedern der Anschlüsse mitzumodellieren. Erstens ist die Modellierung einer Wegfeder auch in einem ideellen Fachwerk möglich und zweitens ist die Ermittlung der Wegfeder im Zuge der Vorbemessung eines Anschlusses sehr einfach.

## 2.4 Empfehlungen zum Ablauf

Nachfolgendes Schema soll den Ablauf in der Modellierung zeigen, wie er auf Grundlage der geführten Parameterstudie als sinnvoll gesehen wird.

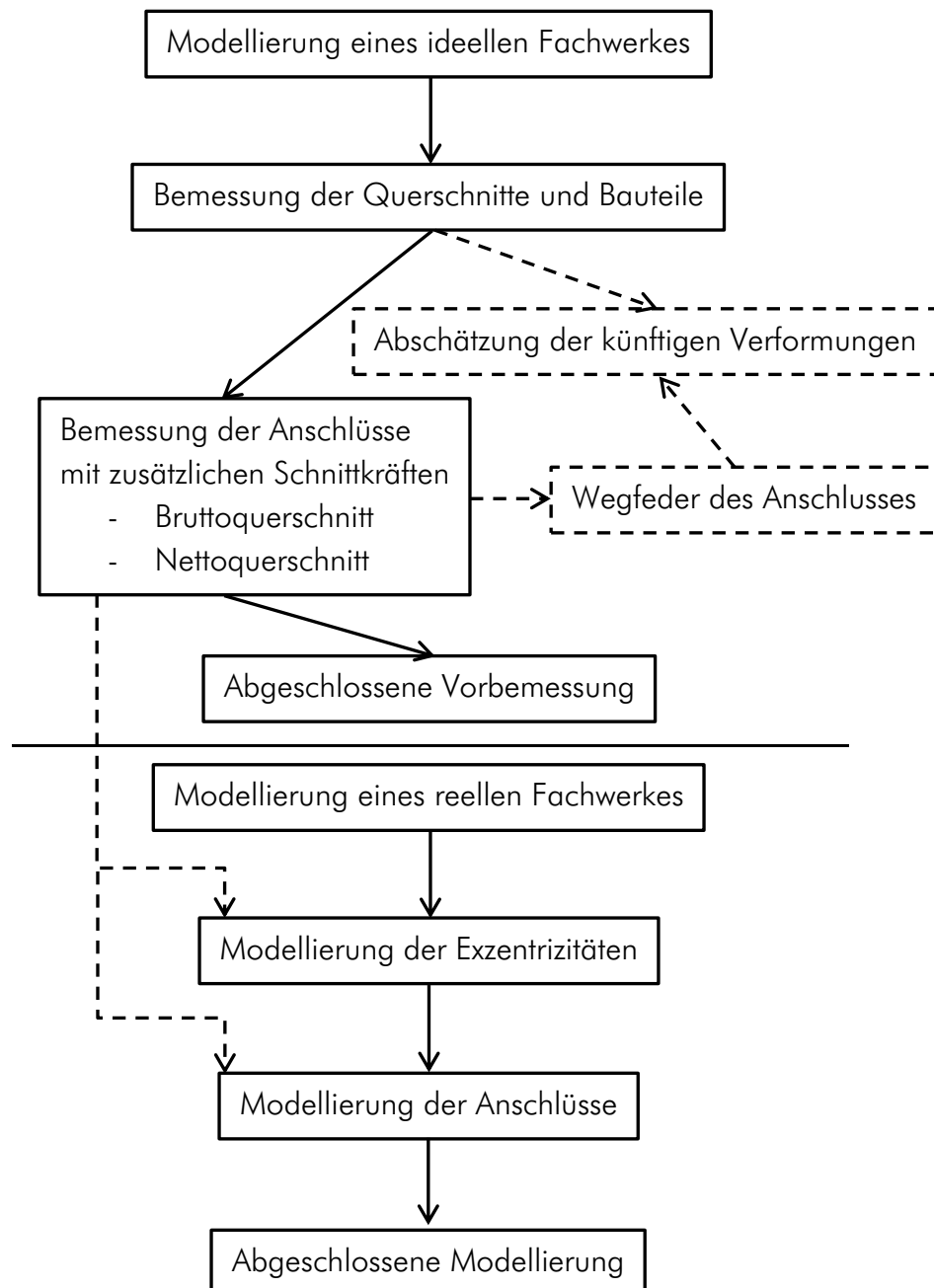


Abb. 2.9 Schema zur Modellierung von Fachwerken

## 3 Beispiel für die Bemessung

Mit zwei abschließenden Beispielen sollen einerseits die Möglichkeiten des Holzbaus gezeigt werden, andererseits der Ablauf in der Bemessung nochmals durch ein Beispiel verdeutlicht werden.

### 3.1 Beispiel 1 - Birkenfachwerk mit Hirnholzanschlüssen

Wie bereits in Kapitel 2: Abs. 2. 5 beschrieben wurde, sind Hirnholzverschraubungen für die Herstellung von Knotenpunkten bei Fachwerken sehr geeignet. Mit den Ergebnissen aktueller Forschungsarbeiten [41] soll ein Vergleich dieser Art eines Anschlusses mit den in den Parameterstudien verwendeten Stabdübelanschlüssen hergestellt werden. Dazu wird ein bereits berechnetes Fachwerk (FA1.5) an die Erfordernisse zur Verwendung einer Hirnholzverschraubung angepasst, da hierbei ähnlich große Normalkräfte in den Anschlüssen wie in den Prüfungen auftreten. Folgende Eingaben werden dabei verändert:

- Steifigkeiten der Anschlüsse

Die Steifigkeiten der Anschlüsse werden aus versuchsgestützten Ergebnissen (siehe [41]) ermittelt und im statischen Modell mitberücksichtigt.

- Querschnitte des Fachwerkes

Als Material wird Birke verwendet, da auch für die in [41] durchgeführten Versuche dieses Material verwendet wird.

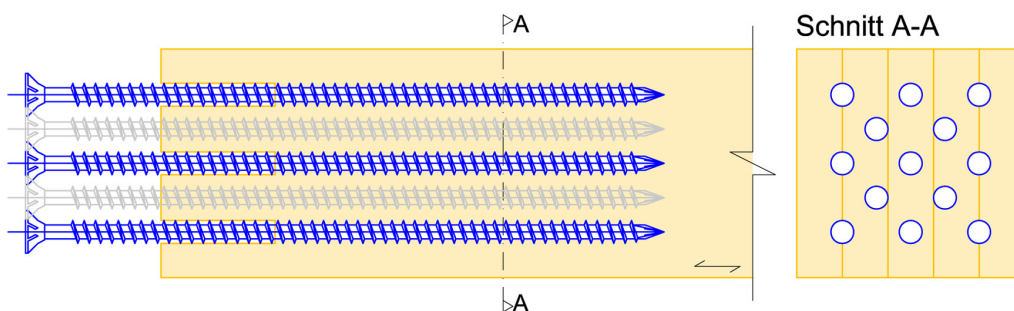


Abb. 3.1 Beispiel für eine Hirnholzverschraubung als Versuchskonfiguration [41]

Die Materialfestigkeit wurde ebenfalls in [41] durch Versuche ermittelt. Dabei wurde eine Zugfestigkeit  $f_{t,0,05,k}$  von  $30,00 \text{ N/mm}^2$  (als 5% Quantile) für die verwendete Birke festgestellt.

Mit den aus [41] erhaltenen Ergebnissen kann für die aus der Vorbemessung erhaltenen Querschnitte und Belastungen die folgende Steifigkeit dieses Anschlusses errechnet werden:

$$K_{ser} = n^{0,8} \cdot K_{ser}$$

Dies ergibt sich für den gegebenen Anschluss eine Verschiebungskapazität von  $K_{ser} = 160.000 \text{ kN/m}$ . Mit Hilfe dieser Wegfeder, kann auf die vorhandene Drehfeder zurückgeschlossen werden: [42]

$$K_{\varphi} = \frac{z^2}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_s}}$$

Mit dem aus dem Betonbau bekannten Prinzip des Spannungsblockes wird hier eine äquivalente Drehfeder errechnet. Diese ergibt sich für diesen Anschluss zu  $185 \text{ kNm/rad}$ .

Nachfolgend sollen die Ergebnisse dieser Berechnung dargestellt, und dabei mit denen eines Stabdübelanschlusses verglichen werden.

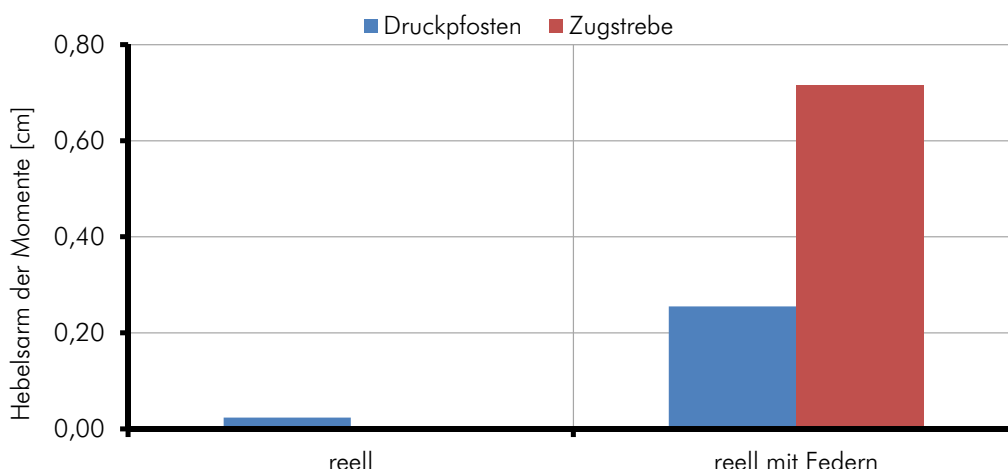


Abb. 3.2 Hebelsarm für die zusätzlichen Momente im Anschlussbereich

Aus obiger Abbildung lässt sich erkennen, dass in dem Anschluss ein zusätzliches Moment mit einem Hebelsarm von ca.  $0,70 \text{ cm}$  entsteht. Mit diesem Hebelsarm ergibt sich ein Moment von ca.  $3,15 \text{ kNm}$ , woraus wiederum eine zusätzliche Normalkraft auf der Zugseite des Anschlusses von  $40,00 \text{ kN}$  entsteht, welche durch die Schraubenverbindungen aufgenommen werden muss. Für diese Konfiguration des Anschlusses würde dies zu einer zusätzlichen Normalkraft von  $8,00 \text{ kN}$  je Schraube führen. Die höhere Beanspruchung des Anschlusses führt bei den Schrauben zu einer Steigerung der Ausnutzung um  $23\%$ , welche bereits in der Vorbemessung zu berücksichtigen wäre.

### 3.2 Beispiel 2 - Ablauf der Modellierung eines Fachwerkes

Mit dem nächsten Beispiel sollen die in Abschnitt 2 beschriebenen Empfehlungen für die Modellierung, Berechnung und Bemessung von Fachwerken umgesetzt werden.

Hierzu wird ein Streben/Pfosten - Fachwerk mit einer Spannweite von 50,00 m und einer Belastung von 37,5 kN/m modelliert. Zur Vorbemessung wurde die in [23] definierte Vorbemessungsgrenze von  $L/12$  für die Höhe dieses Fachwerkes verwendet.

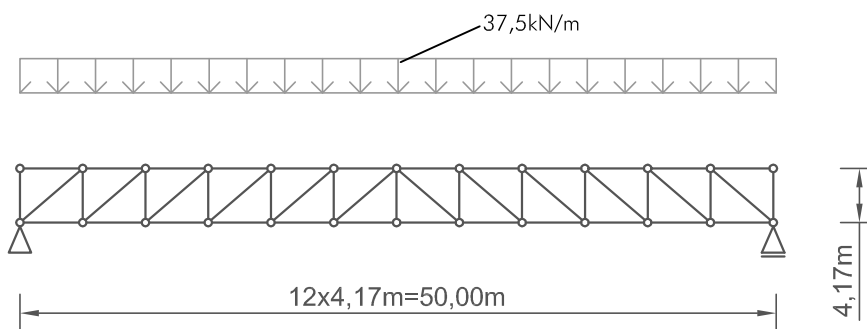


Abb. 3.3 statisches System des berechneten Fachwerkes

Mit diesem statischen System ergeben sich folgende Querschnitte für die Bauteile. Hierbei wurde bereits ein reelles Fachwerk verwendet.

Beschreibung	[mm]
Fachwerkhöhe	6000
Obergurt	280x800
Untergurt	320x800
Druckpfosten	280x520
Zugstreben	280x280

Tab. 3.1 Abmessungen des Fachwerkes und der Querschnitte

Für die Vordimensionierung der Bauteile wurden die in Abb. 2.1 bis Abb. 2.3 definierten Grenzen für die Vordimensionierung beachtet. Da es sich bereits um ein reelles Fachwerk handelt, wurden keine sehr großen Reserven für die Ober- und Untergurte verwendet. Für die Druckpfosten wurde eine Reserve von ca. 11 % angenommen (aus geometrischen Gründen muss diese jedoch auf 22 % erhöht werden). Bei den Zugstreben konnte eine kleinere Reserve von circa 9 % angenommen werden. Diese musste jedoch ebenso aus geometrischen Gründen auf 33 % erhöht werden, um genügend Platz für den Anschluss zu schaffen.

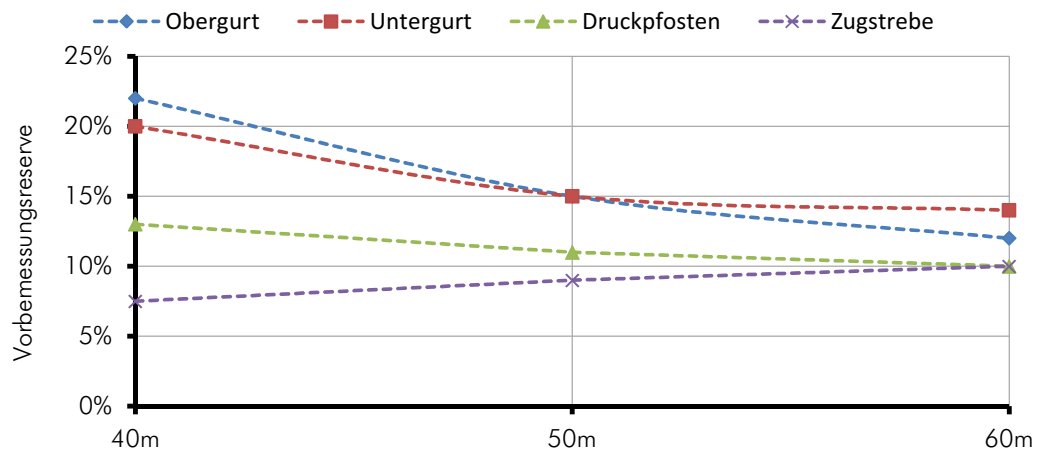


Abb. 3.4 Annahmen für die Vorbemessung der Querschnitte

Mit den Querschnitten und den Stabkräften wurden die Anschlüsse für die Stäbe dimensioniert. Hierfür wurden ebenso wie in der Parameterstudie Stabdübelanschlüsse mit innenliegenden Stahlblechen verwendet.

Beschreibung	
Schnittigkeit	6
Stabdübeldurchmesser	16
Druckpfosten	4 x 7
Zugstreben	3 x 5
Obergurt	4 x 5
Untergurt	4 x 5

Tab. 3.2 Anschluss für das Fachwerk

Die zusätzlichen Schnittkräfte wurden wie folgt berücksichtigt:

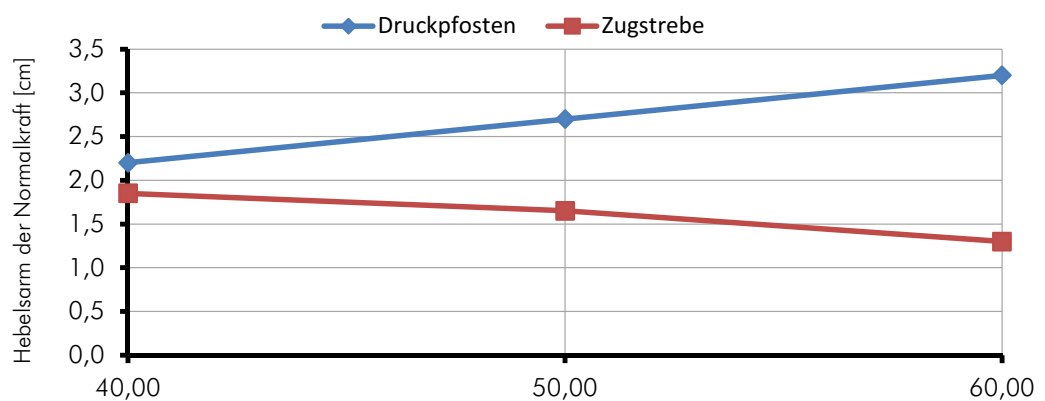


Abb. 3.5 zusätzliche Momente in der Bemessung der Anschlüsse

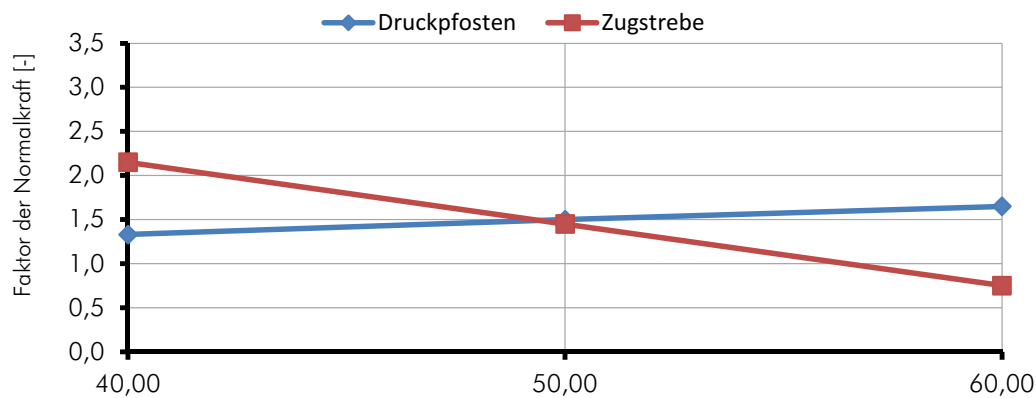


Abb. 3.6 zusätzliche Querkräfte in der Bemessung der Anschlüsse

Beschreibung		
Anschluss Druckpfosten		
	$K_{u,ges}$	736.409 kN/m
	$K_{\varphi}$	3.495 kNm/rad
Anschluss Zugstrebe		
	$K_{u,ges}$	394.505 kN/m
	$K_{\varphi}$	943 kNm/rad
Anschluss Ober/Untergurt		
	$K_{u,ges}$	526.006 kN/m
	$K_{\varphi}$	1.375 kNm/rad

Tab. 3.3 Steifigkeiten der Anschlüsse

Mit diesen Steifigkeiten wurde nun erneut eine Modellierung des Fachwerkes durchgeführt. Anschließend werden die zusätzlichen Schnittkräfte aus dieser Modellbildung mit jenen, welche in der Bemessung der Anschlüsse angesetzt wurden verglichen.



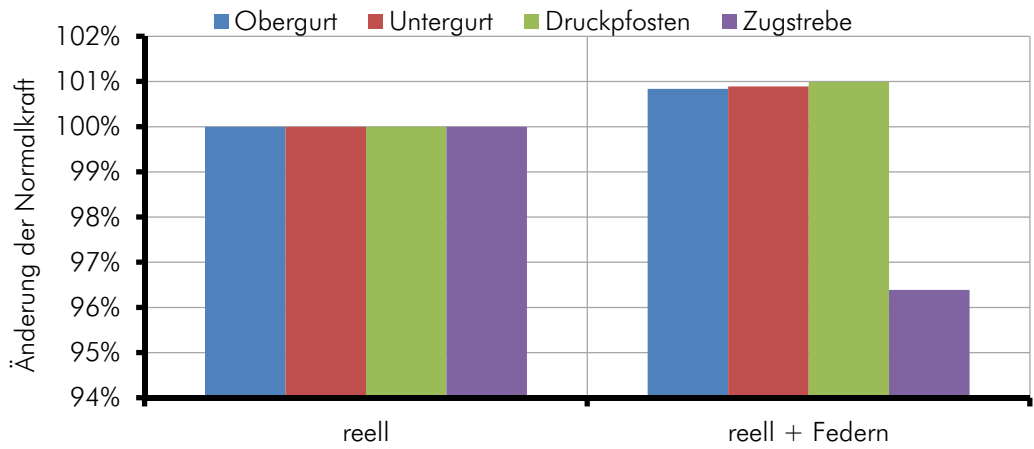


Abb. 3.7 Normalkraftverlauf in den Stäben

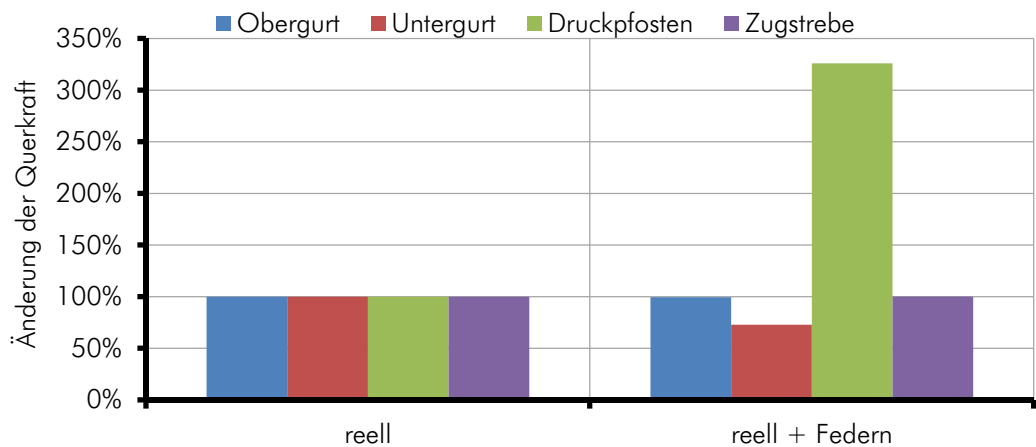


Abb. 3.8 Querkraftverlauf in den Stäben

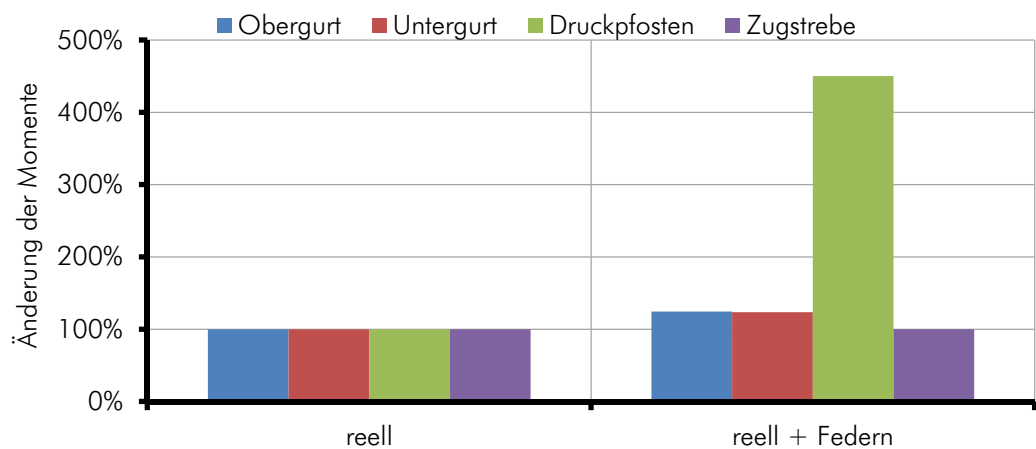


Abb. 3.9 Momentenverlauf in den Stäben

Die Änderungen der Schnittkräfte in den Anschlüssen eines Fachwerkes werden nachfolgend mit den Annahmen in der Berechnung verglichen, um die Gültigkeit der Aussagen in den Empfehlungen zu validieren.

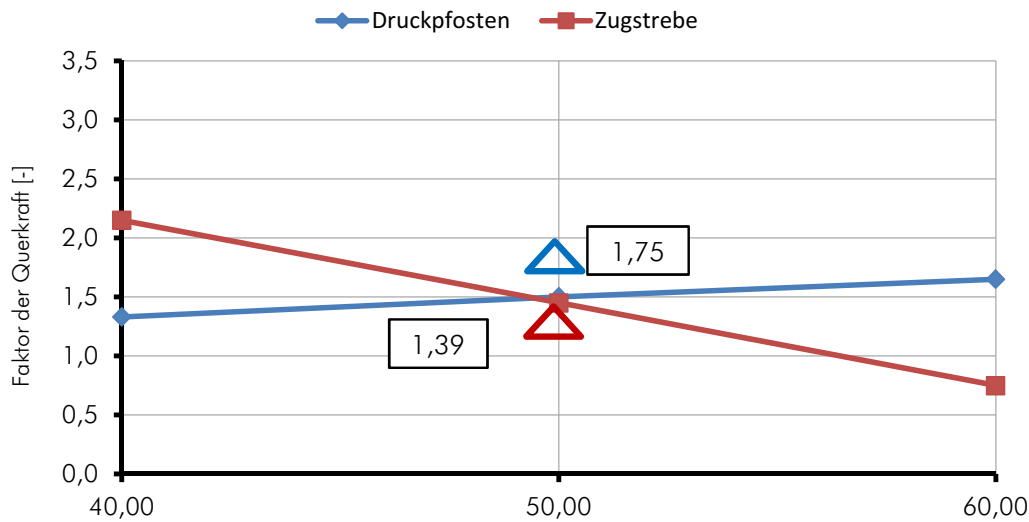


Abb. 3.10 Änderung in der Berücksichtigung der Querkraft

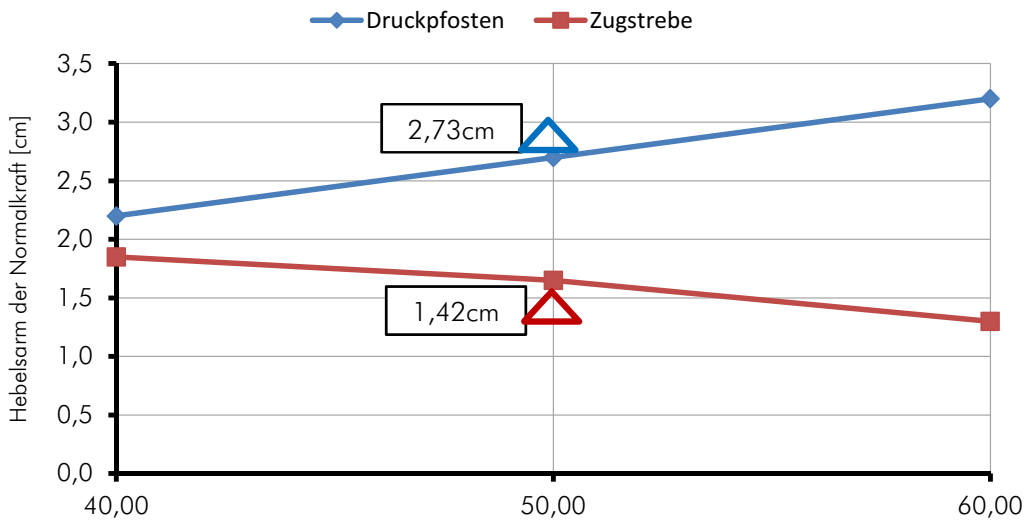


Abb. 3.11 Änderung in der Berücksichtigung der Momente

Wie aus den beiden obigen Abbildungen ersichtlich wird, liegen die tatsächlichen Ergebnisse der zusätzlichen Schnittkräfte nahe an jenen, mit Hilfe der Empfehlungen in Abschnitt 2 ermittelten. Daraus lässt sich schließen, dass die Verwendung dieser „Vordimensionierungshilfen“ zu einem ausreichend genauem Ergebnis führen kann.

## 4 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei, in der Praxis des Ingenieurholzbaues übliche Fachwerktypen untersucht. Für Streben/Pfosten - Fachwerke und Strebenfachwerke mit unterschiedlichen Belastungen und Spannweiten wurden Parameterstudien zu den Einflüssen in der Modellbildung untersucht.

Daraus resultierend konnte festgestellt werden, dass die ingenieurmäßigen Annahmen mit 20% Reserve zur Vorbemessung von Bauteilen bei einigen Komponenten von Fachwerken nicht immer zutreffend sind. Um die „notwendigen“ Reserven in der Vorbemessung besser abschätzen zu können, wurden Vorbemessungsbefehle gestaltet, um einen Anhaltspunkt für die ungefähre Größe dieser zu geben.

Des Weiteren wurde mit der Parameterstudie aufgezeigt, dass Fachwerke, im Gegensatz zur Forderung in der aktuellen Normung, diese nur eine sehr geringe Redundanz gegenüber dem Ausfall bestimmter Komponenten aufweisen. Hier treten bei Versagen oder Fehlen eines auflagernahen Untergurtes teilweise 25-fache Überbeanspruchungen in den noch bestehenden Bauteilen auf.

Zur Erstellung der Parameterstudie wurden die Bemessungsgrundlagen aus den aktuellen für den Holzbau gültigen Normen entnommen. In diesen wird für die bemessenen Stabdübelverbindungen davon ausgegangen, dass weder eine Winkelabhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung vorliegt noch alle Verbindungsmittel gleichmäßig bei der Lastabtragung zur Gewährleistung der Steifigkeit eines Anschlusses angesetzt werden können. Hierbei ist jedoch aus aktuellen Untersuchungen und Forschungsvorhaben bereits bekannt, dass dem nicht so ist.

Abschließend lässt sich sagen, dass Fachwerke im Ingenieurholzbau durch die Verwendung innovativer Anlusstechniken und Materialien für große Spannweiten unter Berücksichtigungen der Eigenschaften dieser Anschlüsse und Baustoffe als geeignet zu betrachten sind.





---

## Literatur

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Imperfektion> Zugriff am 26.11.2013 um 13:30
- [2] ÖNORM EN 1990-1; Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1- Hochbau; Österreichisches Normungsinstitut; 1020 Wien; Ausgabe 01.01.2013
- [3] ÖNORM B 1990-1; Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1- Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 und nationale Ergänzungen; konsolidierte Fassung mit ÖNORM EN 1990-1; Österreichisches Normungsinstitut; 1020 Wien; Ausgabe 01.01.2013
- [4] ÖNORM EN 1995-1-1; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Österreichisches Normungsinstitut; 1020 Wien; Ausgabe 01.07.2009
- [5] ÖNORM B 1995-1; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1; Österreichisches Normungsinstitut; 1020 Wien; Ausgabe 15.08.2010
- [6] DIN 1052; Herstellung und Ausführung von Holzbauwerken; Alle Teile; Ausgabe 08.2004
- [7] Lehrbuch des Ingenieurholzbaus; Helmuth Neuhaus; B.G. Teubner Stuttgart; 1994; 3-519-05248-2
- [8] <http://www.ubstadt-weier.de/pb/,Lde/642747.html>; Zugriff am 08.05.2015 um 13:30
- [9] <http://dasfachwerkhaus.wordpress.com/>; Zugriff am 08.05.2014 um

13:35

- [10] Die Geschichte der Bauingenieurkunst - Ein Überblick von der Antike bis in die Neuzeit; Hans Straub; Birkhäuser Verlag Berlin; 4. Auflage 1992; 3-7643-2441-4
- [11] [http://community.fachwerk.de/index.cfm/ly/1/0/image/a/showPicture/9602\\$.cfm](http://community.fachwerk.de/index.cfm/ly/1/0/image/a/showPicture/9602$.cfm) Zugriff am 26.11.2013 um 18:50
- [12] Skriptum Holzbrückenbau; Gerhard Schickhofer; Institut für Holzbau & Holztechnologie, Technische Universität Graz; 2005
- [13] Fachwerkträger; Czapalla Oliver; <http://www.biw.fhd.edu>; Zugriff am 19.10.2013 um 21:00
- [14] [http://www.ducret-orges.ch/porteurs\\_d.htm](http://www.ducret-orges.ch/porteurs_d.htm); Zugriff am 05.03.2013 19:00
- [15] <http://www.wiehag.com>; Zugriff am 26.11.2013 um 20:05
- [16] <http://www.karl-gotsch.de>; Zugriff am 26.11.2013 um 20:20
- [17] Skriptum statische bestimmte Systeme; Technische Universität Karlsruhe
- [18] Statik der Stabtragwerke; Konstantin Meskouris, Erwin Hake; Springer Verlag; 2. Auflage 2009; 978-3-540-88992-2
- [19] [http://de.wikipedia.org/wiki/Baustatik#Rechnerische\\_Verfahren](http://de.wikipedia.org/wiki/Baustatik#Rechnerische_Verfahren) ; Zugriff am 27.11.2013 um 11:20
- [20] Entwicklung der Holzverbindungen; Manfred Gerner; Fraunhofer IRB Verlag; 3-8167-4728-0
- [21] <http://www.vdg-online.de/162.html>; Zugriff am 27.11.2013 um 11:45
- [22] <http://www.payer.de/tropenarchitektur/troparch0452.htm>; Zugriff am 27.11.2013 um 16:30
- [23] Bautabellen für Ingenieure; Schneider; Werner Verlag; 20.Auflage 2012; 978-3-8041-5251-9
- [24] Holzfachwerkträger; Scheer, Laschinski, Knauf; Ernst & Sohn Berlin; 1989; 3-433-01133-8
- [25] Geometrisch nichtlineare Berechnung von räumlichen Stabwerken mit Imperfektionen; Dissertation Andre Mertinaschk; 28.Juni 2002; Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

- [26] Stahlbau Kalender 2009 - Stabilität Membrantragwerke; Ernst & Sohn Berlin; 2009; 978-3-433-02909-1
- [27] Skriptum Stahlbau GL; Technische Universität Graz - Institut für Stahlbau und Flächentragwerke; 2010
- [28] Skriptum Stahlbau; Technische Universität Graz - Institut für Stahlbau und Flächentragwerke; 2011
- [29] Zum Tragverhalten druck- und biegebeanspruchter Holzbauteile; Dissertation Olaf-Philippe Hörsting; 01. Februar 2008; Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- [30] Ingenieurholzbau; Helmuth Neuhaus; Vieweg + Teubner Wiesbaden; 3. Auflage; 2011; 978-3-8348-1286-5
- [31] Skriptum Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz; Technische Universität Graz - Institut für Holzbau & Holztechnologie; 2009
- [32] Fachwerkträger für den industriellen Holzbau - Karlsruher Berichte für den Ingenieurholzbau 22; H.J. Blas & M. Enders-Comberg; Karlsruher Institut für Technologie; 2012; 978-3-86644-854-4
- [33] <http://bear-country-news.blogspot.co.at/2012/05/reparaturarbeiten-in-der-st-georges.html>; Zugriff am 06.03.2014 um 12:40
- [34] bauen mit holz; Sonderdruck 3/2006; Flughafenerweiterung Wien; Wiehag Timer Construction
- [35] 15. Internationales Holzbau-Forum 09; Beitrag Messehalle 11 Frankfurt; A. Brunauer; Wiehag
- [36] Holzverbindungen H03/H013/H014 Frilo; Handbuch zur Programmverwendung
- [37] Untersuchungen an traditionellen Holzverbindungen - Der abgestirnte Zapfen; Auszug aus Bautechnik 89 (2012) Heft 1; Ernst & Sohn; Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co KG; Berlin
- [38] Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau; Diplomarbeit Purgstaller Thomas; Institut für Holzbau und Holztechnologie; Technische Universität Graz; 2010
- [39] <http://www.bti.de/shop-de/product/248761-Einpressd%C3%BCbel-B-G/9028531-0-Einpressd%C3%BCbel-G1>; Zugriff am 09.05.2014 um 13:45
- [40] <http://de.wikipedia.org/wiki/Knicken>; Zugriff am 09.05.2014 um 16:40

- [41] Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken- Laubholzkonstruktionen; Diplomarbeit Irene Obermayr, Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie
- [42] Erdbebennormung in Europa und deren Anwendung auf Wohnbauten in Holz- Massivbauweise; Diplomarbeit Andreas Ringhofer; Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie





Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl