

Zimmermannmäßige Verbindungen - Klassifizierung und Tragverhalten

Dr. Andreas Meisel
WK Consult Hamburg
Hamburg, Deutschland
Lehrbeauftragter an der TU Graz

andreas.meisel@wk-consult.com



Zimmermannsmäßige Verbindungen - Klassifizierung und Tragverhalten

Zimmermannsmäßige Verbindungen sind selbstverständliche Bestandteile historischer Holztragwerke. Deren Tragwirkung kann häufig erst durch die Berücksichtigung des Tragverhaltens der Verbindungen realitätsnah abgebildet werden. Zum Verständnis der Vielfalt zimmermannsmäßiger Verbindungen werden zuerst alle Verbindungsarten und deren Klassifizierung vorgestellt.

Danach wird das vergleichsweise komplexe Tragverhalten zimmermannsmäßiger Verbindungen erläutert. Es werden Möglichkeiten für deren realitätsnahe Modellbildung aufgezeigt und Größenordnungen der wichtigsten Federsteifigkeiten angegeben.

Ausführlichere Fassungen dieses Beitrags sind [1], [2] und [3] zu entnehmen.

1. Einleitung und Motivation

Unter dem Begriff „zimmermannsmäßige Verbindungen“ werden im Folgenden traditionelle Holzverbindungen verstanden, die weitgehend ohne zusätzliche metallische Verbindungsmittel auskommen. Neben schmiedeeisernen Klammern, Bändern, Bolzen und Nägeln waren diese Verbindungen bis zum Ende des 19. Jh. die einzige Möglichkeit, Stäbe aus Holz zum Zweck der dauerhaften Kraftübertragung zusammen zu fügen (vgl. [4] S. 1).

Im letzten Jahrhundert wurden die tradierten Holzverbindungen weitgehend von ingenieurmäßigen Verbindungen abgelöst. Als Gründe für diese Entwicklung sind die zum Teil vergleichsweise geringe Tragfähigkeit zimmermannsmäßiger Verbindungen sowie deren zeit- und somit kostenintensive Herstellung im Vergleich zu ingenieurmäßigen Verbindungen zu nennen. Zudem muss die Tragsicherheit von Holztragwerken heute in der Regel durch baustatische Analysen nachgewiesen werden. Der Nachweis bestehender zimmermannsmäßiger Holzverbindungen als auch deren neuerliche Anwendung scheitert aber daran, dass sie in der Normung (vgl. EN 1995-1-1) und Literatur großteils nicht geregelt bzw. ausreichend behandelt sind.

Die Erhaltung historischer Bausubstanz sollte als kultureller Umweltschutz im Interesse unserer Gesellschaft sein. Des Weiteren sind auch geometrisch aufwendige Holzverbindungen dank CNC-Abundtechnologien heute wirtschaftlich herstellbar. In jedem Fall sind Kenntnisse über das Tragverhalten zimmermannsmäßiger Verbindungen unverzichtbar.

2. Grundbegriffe und Klassifizierung

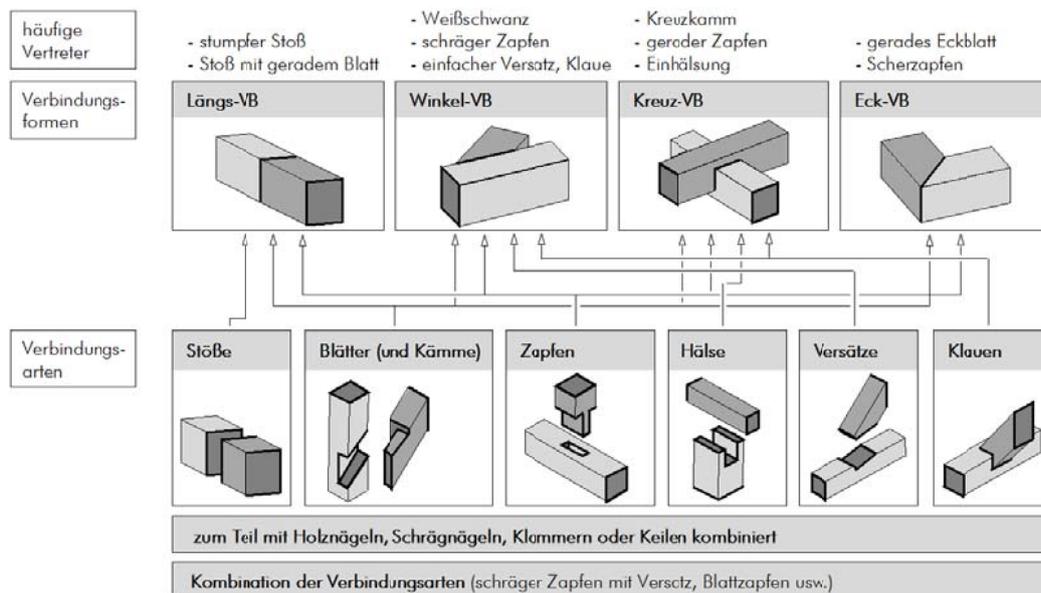


Abbildung 1: Klassifizierung der Verbindungen (VB), mögliche Kombinationen von Verbindungsarten und -formen sowie exemplarisch häufige Vertreter (vgl. [1]).

- Knoten: Mehrere Stäbe treffen aufeinander und interagieren miteinander.
- Anschluss: eines Stabes an einen anderen.
- Verbindung: Zwei Stäbe werden zum Zweck der Kraftübertragung zusammengefügt. Es werden unterschiedliche Verbindungsformen und -arten unterschieden (siehe Abb. 1).
- Verbindungsmittel: Bauteil zu Kraftübertragung, z. B. stiftförmig - Holznagel

3. Verbindungsarten

3.1. Stöße

Sind die Konstruktionshölzer so lang, dass sie nicht mehr aus einem Stamm herausgearbeitet werden können oder müssen sie transportbedingt abgelängt werden, sind Stöße in Längsrichtung erforderlich. Eine passgenaue Herstellung vorausgesetzt, können Drucknormalkräfte übertragen werden. Andere Beanspruchungen erfordern aufwendigere Verbindungsarten oder zusätzliche Verbindungsmittel (z. B. geschmiedete Klammern).

3.2. Blätter (und Käme)

Blattverbindungen sind universell einsetzbare Längs-, Winkel-, Kreuz- oder Eckverbindungen bei denen ein einseitig abgesetztes Bauteilende – das „Blatt“ – in eine seitliche Ausnehmung – die „Blattsasse“ – des zweiten Konstruktionsholzes eingreift (siehe Abb. 2). Blätter können je nach Verbindungsausbildung Drucknormalkräfte, zum Teil Querkräfte und vergleichsweise geringe Zugnormalkräfte übertragen. Zur Lagesicherung sind zumeist zusätzliche Verbindungsmittel (z. B. häufig Holznägel) erforderlich.

Kämme können als Sonderform der Blätter angesehen werden, bei der die sich kreuzenden Konstruktionshölzer nicht in einer Ebene liegen (siehe Abb. 2).



Abbildung 2: Links: einseitige Schwalbenschwanz-Querblätter (Glockenturm von Nyírbátor, Ungarn), rechts: Schwalbenschwanzkamm an einem Fachwerkhaus (Freilichtmuseum Kiekeberg, Deutschland).

3.3. Zapfen

Zapfenverbindungen sind universell einsetzbare Längs-, Winkel- oder Eckverbindungen bei denen ein beidseitig abgesetztes Bauteilende – der „Zapfen“ – in eine (in der Regel annähernd mittige) Ausnehmung – das „Zapfenloch“ – des zweiten Konstruktionsholzes eingreift (siehe Abb. 3). Zapfenverbindungen können Drucknormalkräfte und Querkräfte übertragen. Für die Aufnahme von Zugnormalkräften sind zusätzliche Verbindungsmittel erforderlich.

3.4. Hälse

Hälse sind Kreuzverbindungen, bei denen ein Konstruktionsholz vom anderen „gabelartig“ umfasst wird (siehe Abb. 3). Halsverbindungen übertragen Drucknormalkräfte und gewährleisten zudem die Kippstabilität der angeschlossenen Bauteile.



Abbildung 3: Links: schräge Zapfenverbindungen in einer Scheune (Freilichtmuseum Kiekeberg, Deutschland), rechts: Einhalsung des Längsbalkens (Alte Hof in München, Deutschland).

3.5. Versätze

Versätze sind Winkelverbindungen, bei der ein Konstruktionsholz in einen Einschnitt des anderen Holzes eingreift. Je nach Ausbildung werden unter anderem Stirnversätze, Fersenversätze und doppelte Versätze unterschieden (siehe Abb. 4). Über die schräg angeschnittene(n) Hirnholzfläche(n) können Drucknormalkräfte übertragen werden. Andere Beanspruchungen erfordern aufwendigere Verbindungsarten (Kombinationen) oder zusätzliche Verbindungsmittel.

3.6. Klauen



Abbildung 4: Links: mehrfache Versätze an einer Hängesäule (Liebfrauenmünster in Ingolstadt, Deutschland), rechts: Klaue an einer Treppenwange (Wehrmauer von Luzern, Schweiz).

Klauen sind Kreuzverbindungen zweier rechtwinklig zueinander stehenden Konstruktionshölzer. Endet ein Bauteil, handelt es sich um „ein durch einen Einschnitt gespreiztes Holzende“ ([5] S. 150, siehe Abb. 4). Ansonsten wird ein Bauteil durch einen Kantenschnitt – der „Kerbe“ – ausgenommen. Klauen eignen sich insbesondere zur Übertragung von Querkräften.

3.7. Lagesicherung

Mit zimmermannsmäßigen Verbindungen alleine ist es häufig schwierig oder aufwendig die angeschlossenen Holzbauteile dauerhaft in ihrer Lage zueinander zu fixieren. Zur konstruktiven Lagesicherung wurden daher häufig zusätzliche Verbindungsmittel wie zum Beispiel Holznägel, geschmiedete Klammern und Bolzen verwendet. Diese Sicherungen sind unter anderem erforderlich aufgrund:

- unplanmäßiger, wechselnder oder dynamischer Beanspruchungen,
- herstellungs- und materialbedingter Imperfektionen,
- schwind- und quellinduzierter Verformungen in Kombination mit Wuchsunregelmäßigkeiten

4. Tragverhalten

Unter "Tragverhalten" wird hier sowohl Tragfähigkeit als auch Verformungsverhalten verstanden.

4.1. Grundlagen

Stabbereiche, die an Knoten angrenzen, können als Diskontinuitätsbereiche bezeichnet werden (siehe Abb. 5). Die Spannungsverläufe in diesen Bereichen können im Unterschied zu den Regelbereichen nicht mehr nach den klassischen Stabtheorien berechnet werden (vgl. [6]). Stattdessen sind für die Ermittlung der lokalen Spannungsverläufe z. B. numerische Berechnungen erforderlich.

Die Berechnung von vollständigen Dachwerken mittels Volumenmodellen ist mit den derzeit verfügbaren Rechnern praktisch nicht möglich (vgl. [2]). Daher besteht keine Alternative zur Modellbildung eines Dachtragwerks als Stabwerk. Für die Ermittlung realitätsnaher Schnittkraftverläufe und -verteilungen in statisch unbestimmten Holztragwerken sind die Verbindungen bei der Modellbildung zu berücksichtigen. Erfahrungsgemäß beeinflusst die Berücksichtigung des Tragverhaltens zimmermannsmäßiger Verbindungen die Ergebnisse der statischen Analyse hochgradig unbestimmter Systeme ganz erheblich (z. B. vgl. [2], [7], [8] und andere).

Das liegt daran, dass zimmermannsmäßige Verbindungen die Kräfte über Kontaktdruck und Reibung übertragen. Aus geometrischen Gründen kommt es dabei immer zu einer lokalen Beanspruchung rechtwinklig oder schräg zur Faser. Aufgrund der ausgeprägten Anisotropie des Baustoffes Holz können lokale Deformationen infolge Querdruckbeanspruchung größere Werte annehmen, als jene beispielsweise infolge der Stauchung eines gesamten Stabes in Faserrichtung. Für Bauholz – Nadelholz C24 nach Önorm EN 338 – beträgt das Verhältnis der Elastizitätsmoduli in Faserrichtung zu quer zur Faser etwa 30 zu 1 ($E_{0,mean} / E_{90,mean} = 11.000 / 370$).

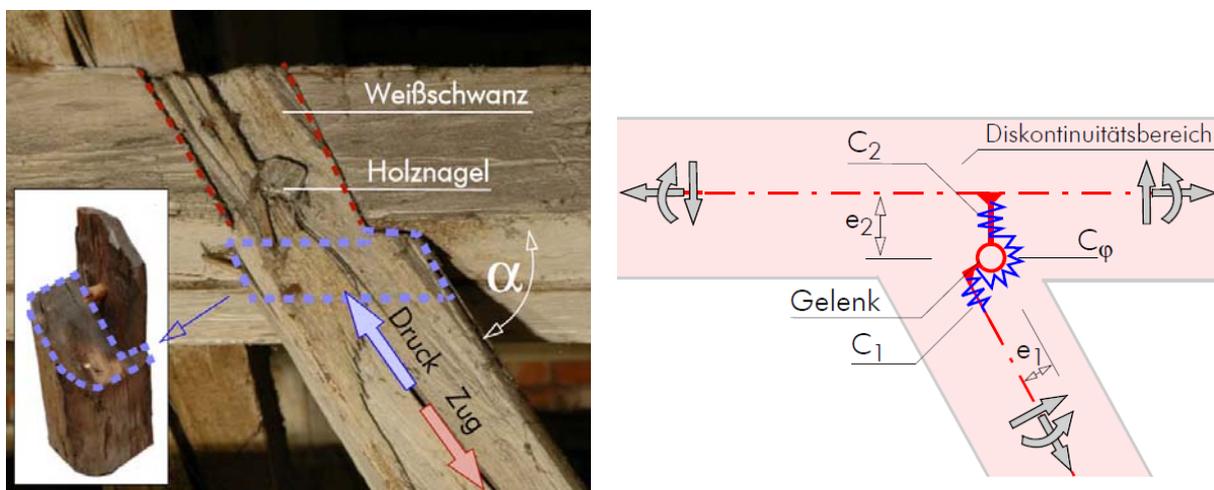


Abbildung 5: Links: Kontaktflächen an einer Weißschwanzverbindung (schräges Schwalbenschwanz-Querblatt), rechts: denkbare Idealisierung im baustatischen Modell.

Daher fordert z. B. die Önorm EN 1995-1-1 (Abschnitt 5.1 und 5.4.2), dass die Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen bei der Systemberechnung zu berücksichtigen sind. Allerdings beinhalten die gültigen Fassungen der EN 1995-1-1 praktisch keine Angaben für die Ermittlung der Nachgiebigkeiten beziehungsweise Steifigkeiten und Exzentrizitäten zimmermannsmäßiger Verbindungen. Auch für die Ermittlung vieler Bemessungswiderstände (mit Ausnahme von Versätzen und Holznägeln) fehlen die Berechnungsalgorithmen.

Die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten zimmermannsmäßiger Verbindungen wird grundsätzlich von drei Faktoren beeinflusst (vgl. [9]):

- dem *Material*: Holzart, Rohdichte, lokale Inhomogenitäten, ggf. Schädigungen infolge von Pilzen und/oder Insekten
- der *Herstellung*: Qualität der Bearbeitung, Holzfeuchte beim Einbau, verwendeter Querschnittstyp (meist Ganzhölzer bei denen aufgrund der etwa im Zentrum verlaufenden Markröhre mit ausgeprägten Schwindrissen zu rechnen ist)
- der *Beanspruchung beziehungsweise Beanspruchungsgeschichte*: dauernd, kurzzeitig, außerplanmäßig

4.2. Ermittlung der Tragfähigkeit

Bei der Ermittlung der Tragfähigkeiten zimmermannsmäßiger Verbindungen sind nach [7], [4] und [6] folgende Herausforderungen zu nennen:

- Die Bemessungswiderstände (= Tragfähigkeiten) zahlreicher zimmermannsmäßiger Verbindungen variieren je nach Beanspruchung. Beispielsweise werden Zugnormalkräfte in der in Abb. 5 dargestellten Verbindung über den Holznagel und die rot strichlierten Kontaktflächen übertragen. Drucknormalkräfte werden über den Holznagel und die blau strichlierten Kontaktflächen weitergeleitet. Unter anderem dem Anschlusswinkel kommt bei der Größe der übertragbaren Kräfte eine wesentliche Bedeutung zu, siehe Abb. 6.
- In zimmermannsmäßigen Verbindungen kommt es in der Regel zu einer Interaktion von Verbindungsmitteln (z. B. Blatt und Holznagel, siehe Abb. 5). Zutreffende Aussagen über das Gesamttragverhalten können nur unter Berücksichtigung der Steifigkeiten der einzelnen Verbindungsmittel getroffen werden.
- Zimmermannsmäßige Verbindungen übertragen Druck- und Zugkräfte über Kontaktdruck und Reibung. Häufig ergeben sich aus der Geometrie erhebliche lokale Querdruck- und – noch problematischer – Querzug- und Rollschubbeanspruchungen. Diese können ohne numerische Berechnung quantitativ nicht bestimmt werden, da die Spannungsinteraktionen, geometrischen Bezugsflächen und die Spannungsverteilungen unbekannt sind.
- In der Önorm EN 1995-1-1 und Önorm B 1995-1-1 sind derzeit keine Regeln für einen Interaktionsnachweis für einen allgemeinen Spannungszustand angegeben. Beanspruchungsinteraktionen (zum Beispiel Querdruck/-zug und Schub) treten in zimmermannsmäßigen Verbindungen jedoch häufig auf.

„Aufgrund der komplexen Spannungsverhältnisse (Kerbwirkung, teilweise kombinierte Querzug-, Querdruck-, Schub- und Biegebeanspruchungen) im Zapfen- und Zapfenlochbereich sowie der extremen Inhomogenität und Anisotropie des Holzes lassen sich solche Regeln (Anmerkung: damit sind hier Ingenieurmodelle zur Ermittlung der Tragfähigkeit gemeint) nur durch statistisch aussagekräftige Versuchsergebnisse an Prüfkörpern im Maßstab 1:1 gewinnen.“ ([10]S. 1)

Trotz der Fortschritte im Bereich numerischer, bruchmechanischer Berechnungen von Holzverbindungen sind aus Sicht des Verfassers Prüfungen im Labor in statistisch aussagekräftiger Anzahl unumgänglich (siehe Abb. 7). Da gleichartige Prüfkörper gleicher Belastungsgeschichte aus historischen Tragwerken nicht in einer ausreichenden Anzahl zur Verfügung stehen, müssen die Prüfungen an nachgebauten Verbindungen aus neuem Holz durchgeführt werden (vgl. [9] S. 282). Diese Vorgehensweise lässt sich auch damit rechtfertigen, dass bisher keine statisch relevanten Alterungseffekte von Holz nachgewiesen werden konnten (vgl. u. a. [11]).

Literaturquellen zur Bestimmung der Tragfähigkeiten zimmermannsmäßiger Verbindungen sind unter anderem in [2] und [8] angegeben.

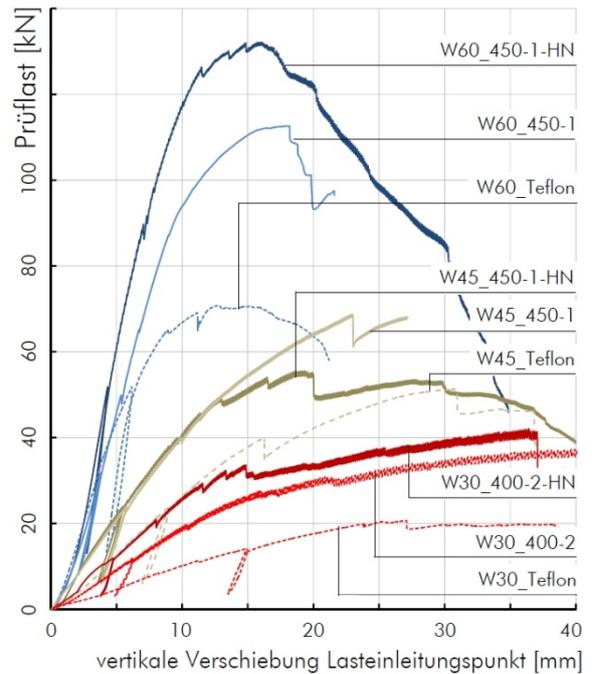
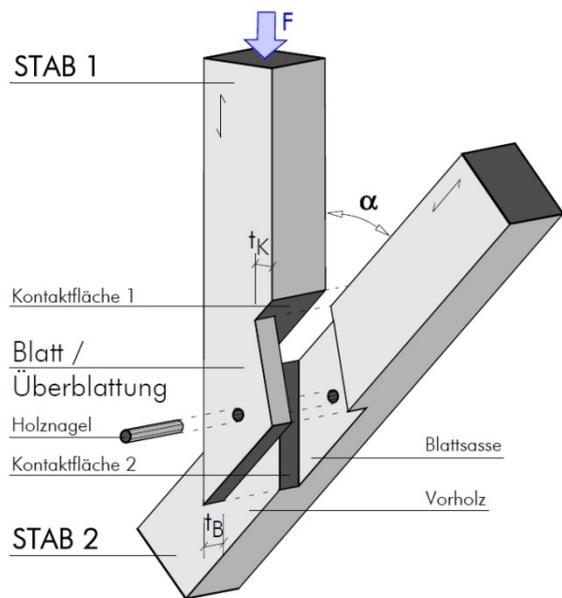


Abbildung 6: Ausgewählte, typische Last-Verformungsdiagramme von Weißschwanzverbindungen: Anschlusswinkel $\alpha = 30^\circ$ in rot, $\alpha = 45^\circ$ in grün, $\alpha = 60^\circ$ in blau (vgl. [3] S. 707).

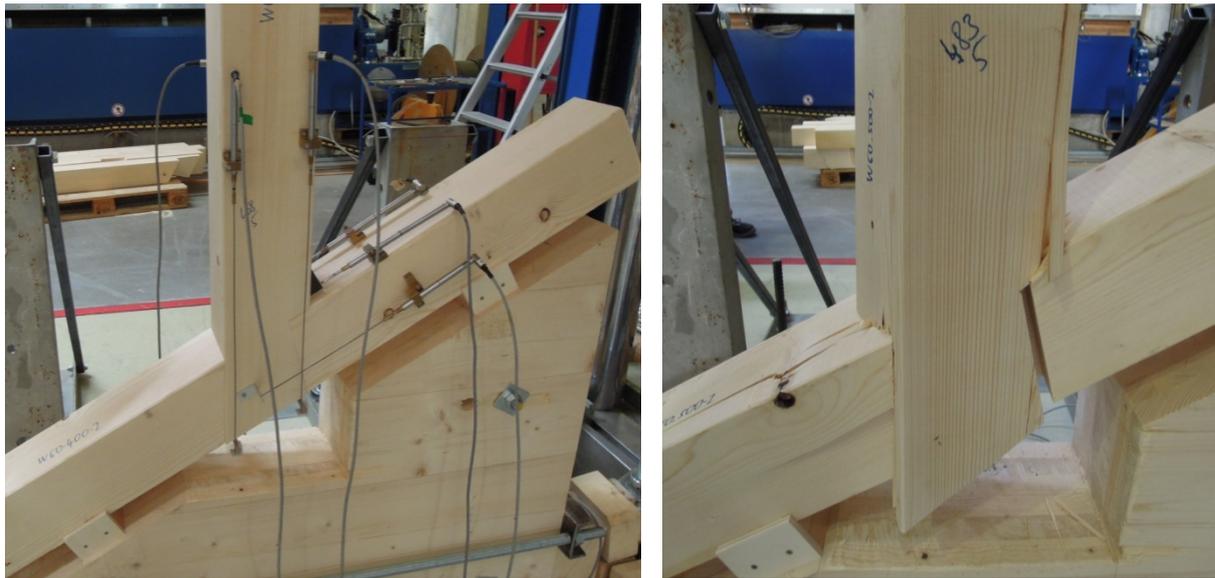


Abbildung 7: Prüfungen an insgesamt 92 Blattverbindungen an der TU Graz (weiterhin siehe [2]).

4.3. Ermittlung des Verformungsverhaltens

Gelenke – mit / ohne Drehfedersteifigkeit

Zimmermannsmäßige Verbindungen werden in der Literatur in der Regel als gelenkige Anschlüsse modelliert (vgl. [2]). Diese Vereinfachung ist zumeist zutreffend, da:

- die oft kleinen Kontaktflächen nur kurze Hebelarme zur Momentenübertragung bieten,
- die seitlichen Kontaktflächen herstellungs- und materialbedingt häufig klaffen und
- keine großen Winkeländerungen zwischen den Stäben zu erwarten sind.

Insbesondere präzise hergestellte Blattverbindungen mit großen Kontaktlängen können jedoch eine nachgiebige Einspannung der betreffenden Stäbe bewirken. Das kann in der Modellbildung durch die Eingabe einer Drehfedersteifigkeit C_φ berücksichtigt werden (siehe Abb. 5). Der Verfasser ist der Auffassung, dass die Berücksichtigung der Drehfedersteifigkeiten zimmermannsmäßiger Verbindungen nur in besonderen Fällen gerechtfertigt ist.

Exzentrizitäten, diese können auftreten infolge:

- der Geometrie der Verbindungen. Die Lage der Druckkontaktflächen weicht häufig von den Stabachsen ab (siehe Abb. 5).
- von Systemverformungen und daraus resultierenden Winkeländerungen zwischen den Konstruktionshölzern (die wiederum zu klaffenden Fugen führen können)
- von ungleichförmigen Kontaktspannungsverläufen
- von herstellungs- oder materialbedingten Imperfektionen

Darüber hinaus ist von Veränderungen der Exzentrizitäten je nach Beanspruchungsart und -richtung auszugehen. Exzentrizitäten in den Verbindungen bewirken zusätzliche Biegemomente in den angeschlossenen Stäben. Weitere Angaben siehe [2].

Steifigkeiten

Zimmermannsmäßige Verbindungen übertragen die Kräfte nachgiebig. Das kann in Stabmodellen durch die geeignete Anordnung von Wegfedern (z. B. C_1 , C_2 siehe Abb. 5 und 8) berücksichtigt werden. Je nach Beanspruchung weisen zahlreiche Verbindungen unterschiedliche Steifigkeiten beziehungsweise Nachgiebigkeiten auf. Die Last-Verformungsverläufe (siehe Abb. 6 und 8) zeigen zudem ein mehr oder weniger ausgeprägtes plastisches Verhalten. Das bedeutet, die Steifigkeiten bei Erstbelastung (C_I) sind zum Teil deutlich geringer als jene unter Wiederbelastung (C_{II}), hierzu siehe [2].

Die Größenordnung des Schlupfes (siehe Abb. 8) hängt wesentlich von zwei in der Praxis nur schwer bestimmbar Parametern ab. Erstes ergibt sich der Schlupf aus herstellungs- und materialbedingten Klaffungen. Nach ([7] S. 94): „Der infolge ungenauer Passung und Schwindens auftretende Schlupf kann von Anschluss zu Anschluss so unterschiedlich sein, dass selbst die Angabe einer Größenordnung für eine entsprechende Zusatzverformung nicht immer zutrifft.“ Zweitens ist die Belastungsgeschichte zu nennen. Je höher die vorherige Belastung, desto größer der bereits aufgetretene Schlupf infolge plastischer Verformungen.

Eine annähernd realitätsnahe Einschätzung des lokal vorliegenden Schlupfes kann durch eine Messung der Verbindungsklaffungen im Tragwerk erfolgen. In ([12] S. 185ff) wurde unter anderem der Einfluss der Verbindungsklaffungen untersucht. Es zeigte sich, dass die rechnerischen Verformungen deutlich zunahmten. Allerdings traten keine wesentlichen Schnittgrößenumlagerungen im Vergleich zur Modellbildung in der „nur“ die Verbindungsnachgiebigkeiten berücksichtigt wurden auf.

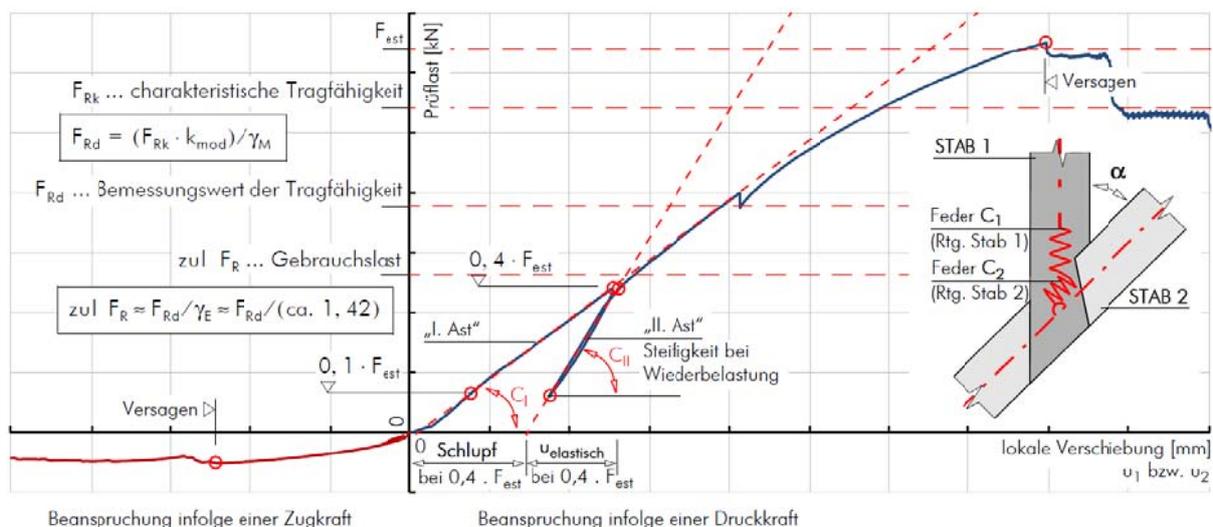


Abbildung 8: Last-Verformungsdiagramm einer typischen Weißschwanzverbindung ([1] S. 185).

Ermittlung der Steifigkeiten

In den meisten Literaturquellen wird vereinfachend eine linear elastische Federsteifigkeit angegeben (z. B. vgl. [13] S. 226). Realitätsnäher kann das Verformungsverhalten mit z. B. elasto-plastischen oder trilinearen Steifigkeitscharakteristiken beschrieben werden (vgl. [12]). Für die Ermittlung der Federsteifigkeiten bestehen folgende Möglichkeiten:

- *Angaben der Normung:* zimmermannsmäßige Verbindungen werden derzeit nicht behandelt.
- *Angaben der Literatur:* Federsteifigkeiten aus der Literatur sind [7], [8], [12], [13] und [2] Kapitel 4b.4.4 zu entnehmen. Die meisten Ingenieurmodelle definieren die Steifigkeit C wie folgt:

$$\text{Steifigkeit } C = \frac{F_{R(k)}}{u} = \frac{\text{(charakteristische) Tragfähigkeit [kN]}}{\text{theoretische Verschiebung in [mm]}}$$

- *Ansatz von Möhler*

„Bei Versätzen und Kontaktanschlüssen (z. B. Druckstabanschlüsse senkrecht zur Faser) ist mit $zul\ v = 1,5\ mm$, bei faserparallelen Passstößen mit $zul\ v = 1,0\ mm$ zu rechnen. Da die eintretenden Verschiebungen in erster Linie von der Ausführungsgenauigkeit abhängen, ist in der Regel eine Abhängigkeit von der Höhe der Beanspruchung nicht zu berücksichtigen.“ ([14] Abschnitt 4.10) Gemäß ([13] S. 227) gilt dann:

$$\text{Steifigkeit } C = \frac{zul\ F_R}{zul\ v} \quad \text{mit } zul\ F_R \approx \frac{F_{Rd}}{\gamma_E} \approx \frac{F_{Rd}}{ca. 1,42}$$

Für Blattverbindungen und schräge Zapfen sollte dieser Ansatz aus Sicht des Verfassers nicht verwendet werden. Im Gebrauchszustand sind zum Teil größere Verschiebungen zu erwarten.

- *Lastausbreitungsmodelle*

Einfache ingenieurmäßige Modelle (vgl. [2], [13]) können ebenfalls zur Abschätzung der Nachgiebigkeiten dienen. Die Nachgiebigkeiten rechtwinkliger oder schräger Querdruckanschlüsse können wie folgt abgeschätzt werden. Für den Fall des Anschlusses an einen Biegeträger kann angenommen werden, dass die Spannungen von der Kontaktfläche bis in die Stabachse übertragen werden müssen (siehe Abb. 9). Für einen Lastausbreitungswinkel von $\alpha = 40^\circ$ ergeben sich realitätsnahe Ergebnisse.

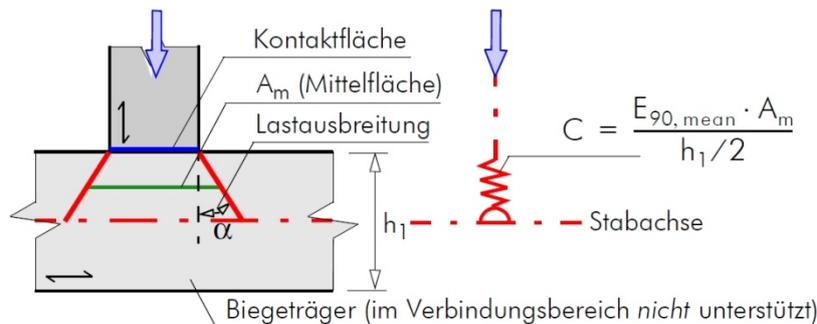


Abbildung 9: Lastausbreitungsmodell [2].

Ähnlich kann auch bei querdruckbeanspruchten, kontinuierlich gelagerten Schwellen vorgegangen werden. Die Spannungen werden in diesem Fall von der Kontaktfläche bis zur Unterkante der Schwelle übertragen.

- *Prüfungen im Labor*

Statistisch aussagekräftige Prüfungen im Labor sind hervorragend zur Ableitung realitätsnaher Steifigkeiten geeignet. Gemäß Önorm EN 26 891 sind die Steifigkeiten bei Erst- und Wiederbelastung im Bereich zwischen 0,1 und 0,4 der erwarteten Bruchlast auszuwerten.

- *numerische Berechnungen*

Numerische Berechnungen sind zumindest für die Ermittlung der Steifigkeiten infolge Erstbelastung geeignet. Das anisotrope Materialverhalten und die Eigenschaften der Kontaktflächen müssen berücksichtigt werden. Die Modellbildung von schrägen Blattverbindungen hat gezeigt, dass die Ergebnisse sensibel auf Änderungen der Reibungsbeiwerte in den Kontaktflächen reagieren (vgl. [2]).

4.4. Größenordnungen der Federsteifigkeiten

Zahlreiche baustatische Analysen in z. B. [2], [7] und [8] haben gezeigt, dass es ausreicht, die wesentlichen Nichtlinearitäten (z. B. den Ausfall einer Verbindung unter Zugbeanspruchung) und die richtigen Größenordnungen der Federsteifigkeiten der zimmermannsmäßigen Verbindungen in der Modellbildung zu berücksichtigen.

Diese Vereinfachungen sind unter anderem dadurch gerechtfertigt, dass bei der statischen Analyse hochgradig unbestimmter historischer Dachwerke immer erhebliche Unsicherheiten verbleiben werden (siehe auch [2], [8]). Beispielhaft wird hier die Belastungsgeschichte in Kombination mit den Einflüssen des rheologischen Verhaltens von Holz (ausgeprägtes Kriechverhalten unter Querdruck, vgl. [15]) angeführt.

Für Ingenieurmodelle können die in Abb. 10 angegebenen Größenordnungen verwendet werden. Die Literaturangaben weichen unter anderem aufgrund von Unterschieden in der Prüfkörperherstellung und Prüfungsauswertung zum Teil erheblich voneinander ab. Die Werte sind teilweise nicht vergleichbar.

* ... „übliche“ Bauteil- und Verbindungsabmessungen, für die Angabe der Steifigkeiten wird sofern erforderlich von folgenden Abmessungen ausgegangen:

- Querschnitte: $b / h = 14 - 18 / 18 - 30$ cm
- Dicke von Zapfen und Blättern: 5 cm
- Einschnitttiefe von Kämmen: 3 cm, von Versätzen: 5 cm

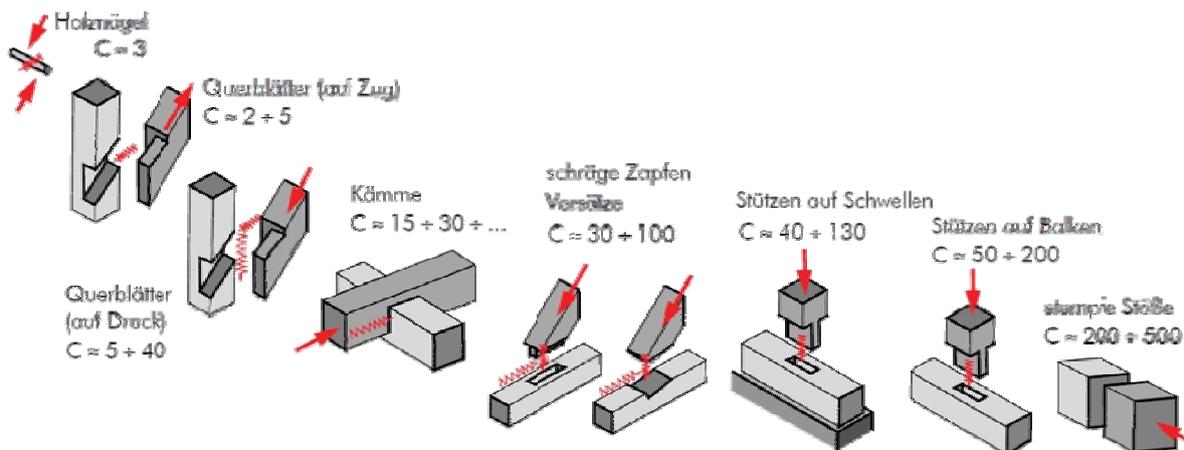


Abbildung 10: Größenordnungen der Federsteifigkeiten zimmermannsmäßiger Verbindungen, gültig für Nadelholz und "übliche" Bauteil- und Verbindungsabmessungen* (detailliertere Angaben siehe [1] und [2]).

5. Resümee

Unter dem Begriff „zimmermannsmäßige Verbindungen“ werden hier traditionelle Holzverbindungen verstanden, die weitgehend ohne metallische Verbindungsmittel auskommen. Zuerst werden die Klassifizierung dieser Verbindungen als auch die wichtigsten Verbindungsarten erläutert.

Die Berücksichtigung des Tragverhaltens der Verbindungen ist häufig der wesentliche Schlüssel zum Verständnis der tatsächlichen Tragwirkung eines historischen Holzbaus. Trotzdem kann nicht oft genug betont werden, dass die handnahe, persönliche Befassung mit dem vorliegenden Tragwerk oberste Priorität hat. Auch aufwendige baustatische Analysen sind wertlos, wenn nicht der Abgleich zwischen den Berechnungsergebnissen und der bauseits vorliegenden Realität durchgeführt wird und gelingt.

Zimmermannsmäßige Verbindungen übertragen Druck- und Zugkräfte prinzipiell über Kontaktdruck und Reibung. Nur Holznägel sind als stiftförmige Verbindungsmittel zu betrachten. Unter anderem infolge der Verbindungsgeometrien sowie der Anisotropie von Holz zeigen zimmermannsmäßige Verbindungen ausgeprägt nichtlineare Last-Verformungsverläufe. Zudem werden die Kräfte in der

Regel – je nach Beanspruchung und Verbindungsart unterschiedlich ausgeprägt – exzentrisch übertragen.

Anschließend wird erläutert, wie die Last-Verformungsverläufe durch die Angabe von Federsteifigkeiten näherungsweise abgebildet werden können. Dabei sind teilweise mehrere Wegfedern und eventuell eine Drehfeder je Anschluss erforderlich. Zudem wird auf die Möglichkeiten zur Ermittlung der Steifigkeiten eingegangen. Zuletzt werden Größenordnungen der Steifigkeiten zimmermannsmäßiger Verbindungen anhand von Literaturangaben vorgestellt.

In der Normung und Literatur werden zimmermannsmäßige Verbindungen bislang nicht umfassend behandelt. Daher hat der Verfasser umfangreiche Prüfungen im Labor durchgeführt, die unter anderem in [1] und [2] vorgestellt werden. Aufgrund der Entwicklung der CNC-Abbundtechnologie können Holz-Holz-Verbindungen heute wieder wirtschaftlich hergestellt werden. Weitere Untersuchungen und gegebenenfalls Optimierungen der Verbindungsgeometrie erscheinen daher lohnenswert.

6. Literatur

- [1] MEISEL Andreas: *Zimmermannsmäßige Verbindungen – Klassifizierung und Tragverhalten*. In: *Bauingenieur*, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag April 2017, Band 92, S. 179–189
- [2] MEISEL Andreas: *Historische Dachwerke – Beurteilung, realitätsnahe statische Analyse und Instandsetzung*. Dissertation, TU Graz, 2015
- [3] MEISEL Andreas ; WALLNER Bernhard ; SCHICKHOFER Gerhard: *Tragfähigkeit und Verformungsverhalten druckbeanspruchter Blattverbindungen*. In: *Bautechnik*, Berlin: Verlag Ernst & Sohn 2015, Nr. 10, S. 702–715
- [4] HEIMESHOFF Bodo ; SCHELLING Wolfgang ; REYER Eckhard ; Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (Hrsg.): *Informationsdienst Holz : Zimmermannsmäßige Holzverbindungen*. Düsseldorf, November 1988
- [5] GERNER Manfred ; u. a.: *Handwerkliche Holzverbindungen der Zimmerer*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1992
- [6] REYER E. ; SCHMIDT M.: *Zum Tragverhalten zimmermannsmäßiger Holzverbindungen*. In: *bauen mit holz*, Bruderverlag 1989, Nr. 7 und 8, S. 493–499 und 544–546
- [7] GÖRLACHER Rainer ; u. A.: *Historische Holztragwerke : Untersuchen, Berechnen, Instandsetzen*, Sonderforschungsbereich 315. Universität Karlsruhe (TH), 1999
- [8] HOLZER Stefan M.: *Statische Beurteilung historischer Tragwerke – Band 2 | Holzkonstruktionen*. Berlin ; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 2015
- [9] EHLBECK Jürgen ; HÄTTICH Ronnie: *Über die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens von Knotenpunkten und Verbindungsmitteln alter Holzkonstruktionen*. In: *SFB 315 – Jahrbuch 1986*, S. 180–190
- [10] SCHELLING Wolfgang ; HINKES Franz-Josef: *Tragverhalten von Zapfenverbindungen - T 1533*. Universität Hannover : IRB Verlag, Forschungsbericht, 1985
- [11] RUG Wolfgang ; SEEMANN Axel: *Festigkeit von Altholz*. In: *bauen mit holz*, Bruderverlag (1989), Nr. 10, S. 696–699
- [12] KÖCK Bernd: *Barocke Dachwerke : Konstruktion und Tragverhalten*. Universität der Bundeswehr München, Diss., 2011
- [13] BLASS Hans Joachim ; FALK Volker Claus ; GÖRLACHER Rainer: *Historische Holzkonstruktionen - Statische Modellierung der Nachgiebigkeiten historischer Holzverbindungen*. In: *SFB 315 – Jahrbuch 1996*, S. 219–249. Berlin : Verlag Ernst & Sohn
- [14] MÖHLER Karl: *Verschiebungsgrößen mechanischer Holzverbindungen der DIN 1052, Teil 2 (Entwurf 1984)*. In: *bauen mit holz*, Bruderverlag 1986, Nr. 4, S. 206–214
- [15] MÖHLER Karl ; MAIER G.: *Kriech- und Relaxations- Verhalten von lufttrockenem und nassem Fichtenholz bei Querdruckbeanspruchung*. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1970, 28. Jg. Heft 1, S. 14–20