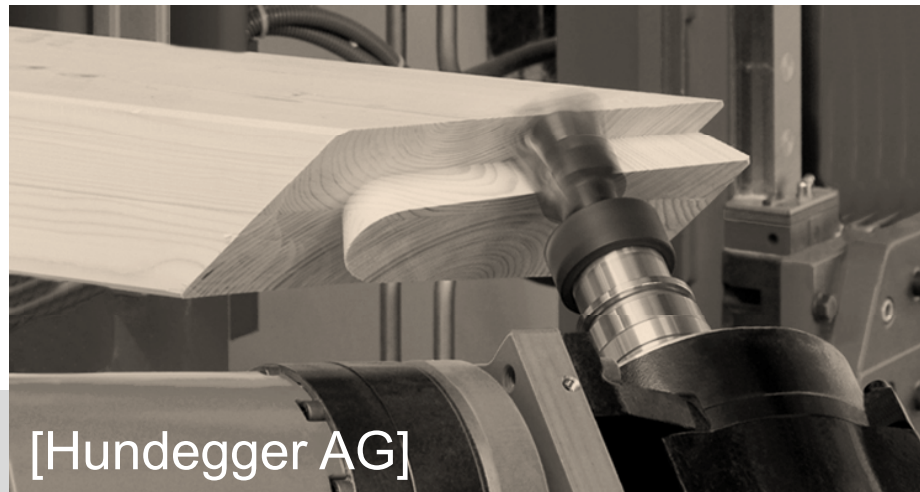


Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von Holz-Holz-Verbindungen

1. **Motivation und Übersicht**
2. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten
3. Kämme
4. Druckbeanspruchte Blätter
5. Resümee und Ausblick

1. Motivation

- “Holz-Holz-Verbindungen”
 - ... Verbindungen ohne anderer Werkstoffe
 - ... Summe aus:
 - Zimmermannsmäßigen Verbindungen
 - CNC-gefertigten Verbindungen



1. MOTIVATION UND ÜBERSICHT



Alte Universität in Graz, 1609

1. MOTIVATION UND ÜBERSICHT



Glockenturm in Nyirbator, Ungarn, 17. Jh.



1. MOTIVATION UND ÜBERSICHT



Hiltensweiler Brücke, Landkreis Ravensburg, Bayern, 1790

1. MOTIVATION UND ÜBERSICHT



Hauszeile in Quedlinburg



Zimmermanns-
mäßige
Verbindungen

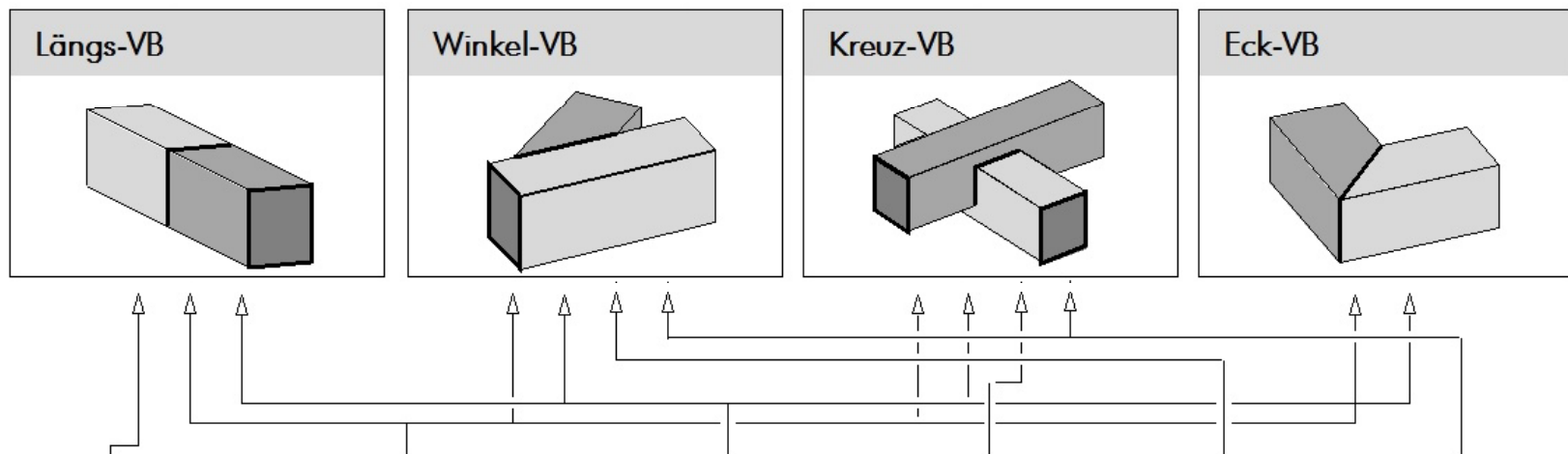
- Erhaltung historischer Holztragwerke = „kultureller Umweltschutz“
- Nachrechnung und bestandsschonende Instandsetzung: Kenntnis des Tragverhaltens der Verbindungen erforderlich
- ABER: Normung und Literatur lückenhaft
- UND: neuerliche Anwendung (CNC ...)

Übersicht

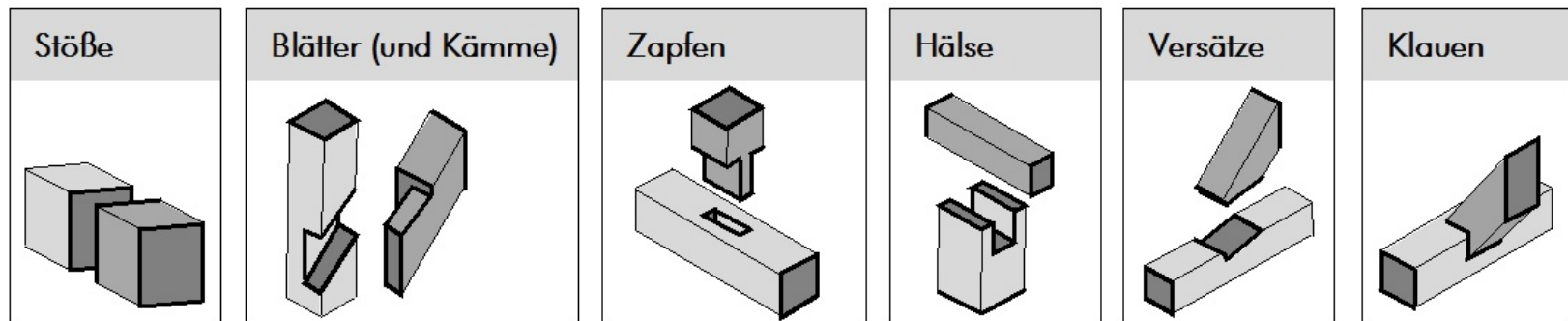
häufige
Vertreter

- stumpfer Stoß
- Stoß mit geradem Blatt
- Weißschwanz
- schräger Zapfen
- einfacher Versatz, Klaue
- Kreuzkamm
- gerader Zapfen
- Einhäsung
- gerades Eckblatt
- Scherzapfen

Verbindungs-
formen



Verbindungs-
arten



zum Teil mit Holznägeln, Schrägnägeln, Klammern oder Keilen kombiniert

Kombination der Verbindungsarten (schräger Zapfen mit Versatz, Blattzapfen usw.)

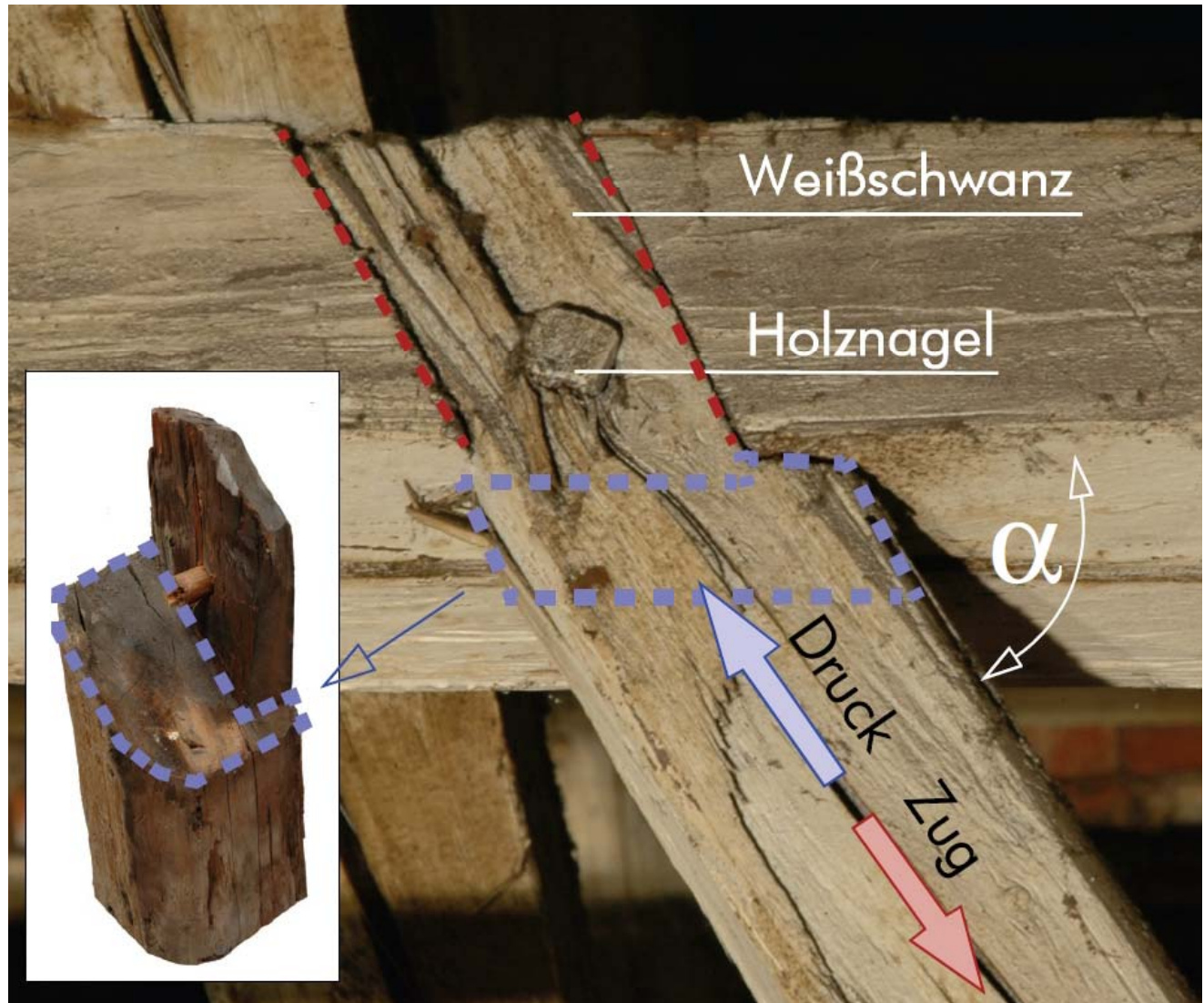
Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von Holz-Holz-Verbindungen

1. Motivation und Übersicht
- 2. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten**
3. Kämme
4. Druckbeanspruchte Blätter
5. Resümee und Ausblick

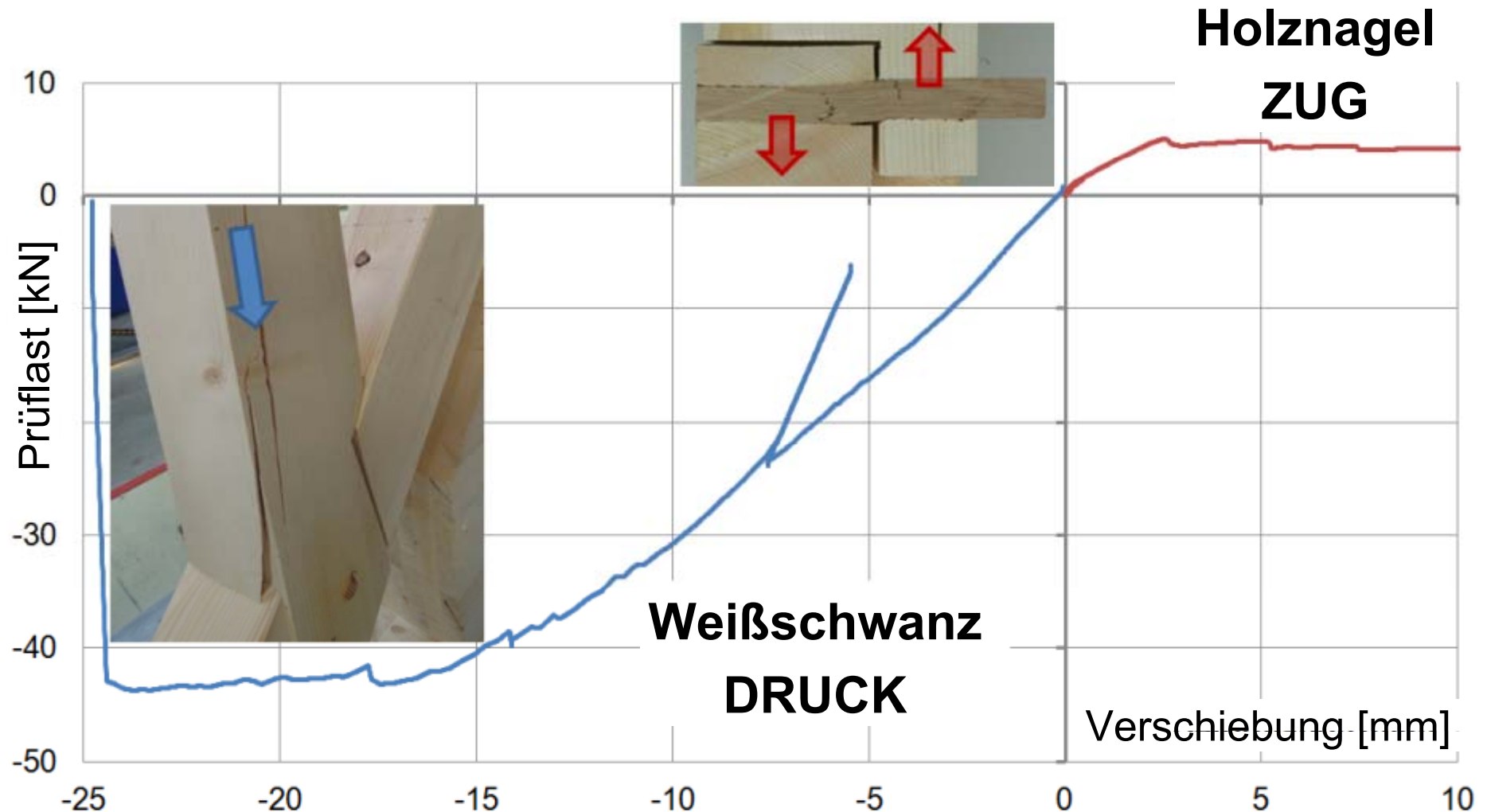
Zimmermannsmäßige Verbindungen

- weitgehend ohne Metall
- Kräfte:
Kontaktdruck
und Reibung

(Holznägel:
stiftförmiges
Verbindungs-
mittel)



Last-Verformungsverhalten: ausgeprägt nichtlinear



Einflussfaktoren

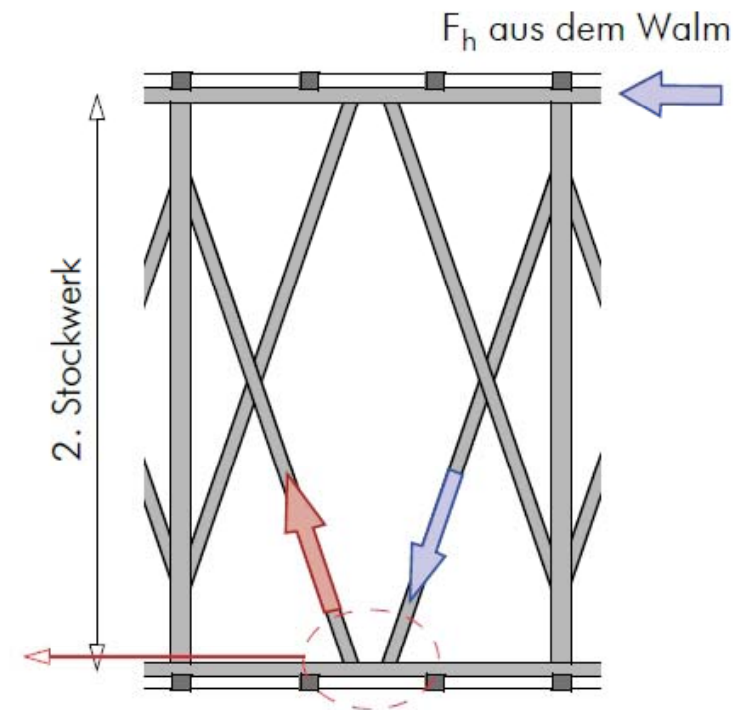
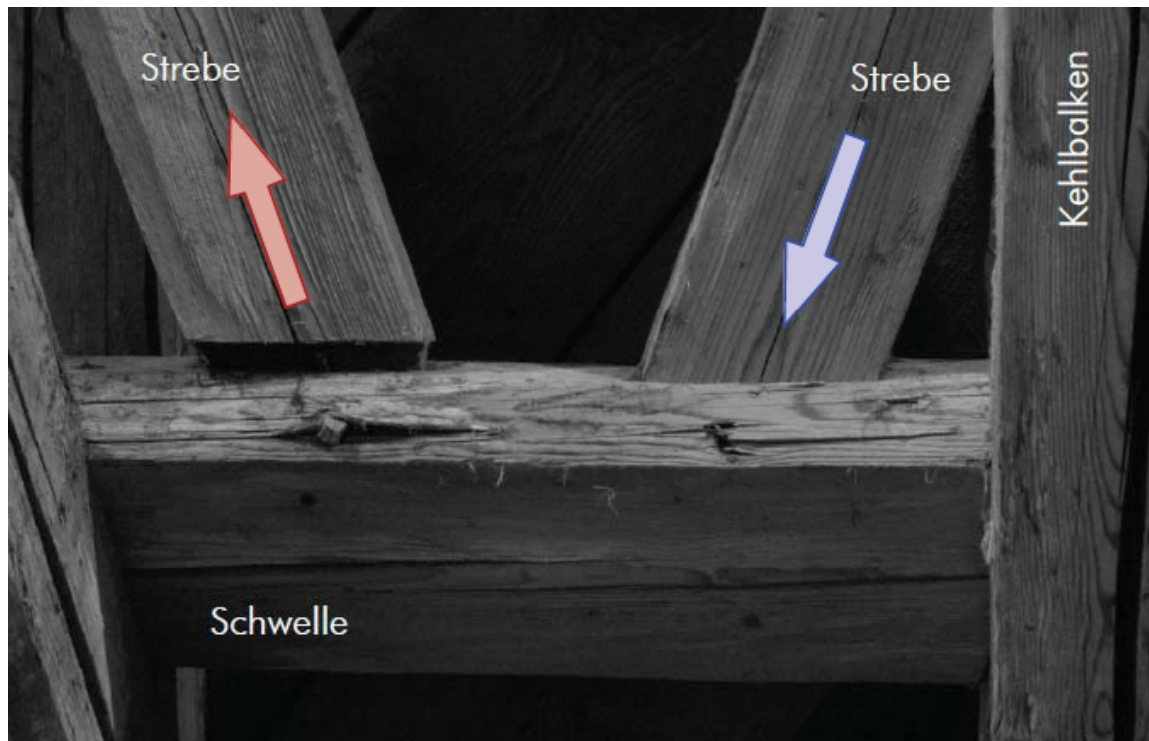
- **Material:**
Holzart, Rohdichte, lokale Inhomogenitäten, ggf. Schädigungen
- **Herstellung:**
Bearbeitungsqualität, Feuchte, Querschnitte
- **Beanspruchung und Beanspruchungsgeschichte:**
Zug-/Druck, dauernd, kurzzeitig, Erst-/Widerbelastung

Ermittlung

- **Tragfähigkeiten:** Versuche im Labor, **Steifigkeiten:** ggf. auch numerisch

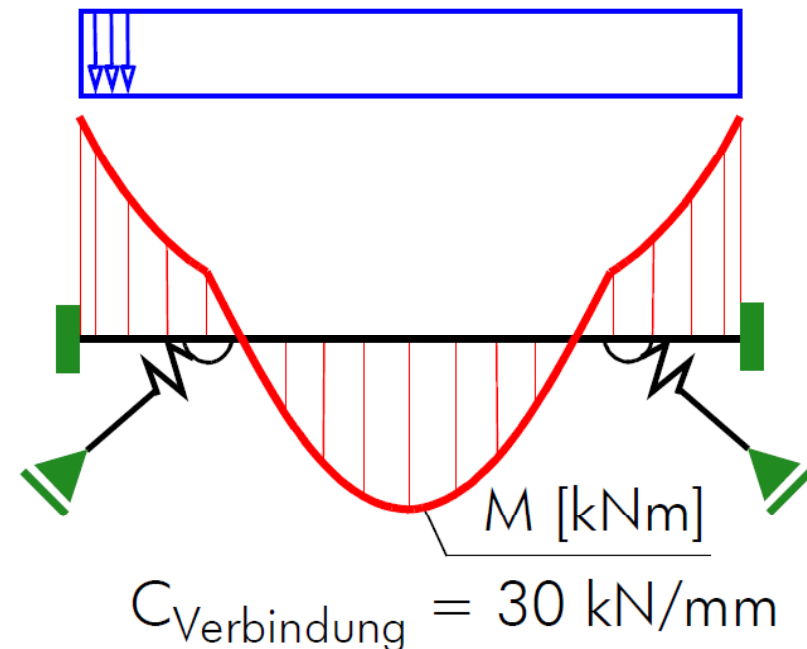
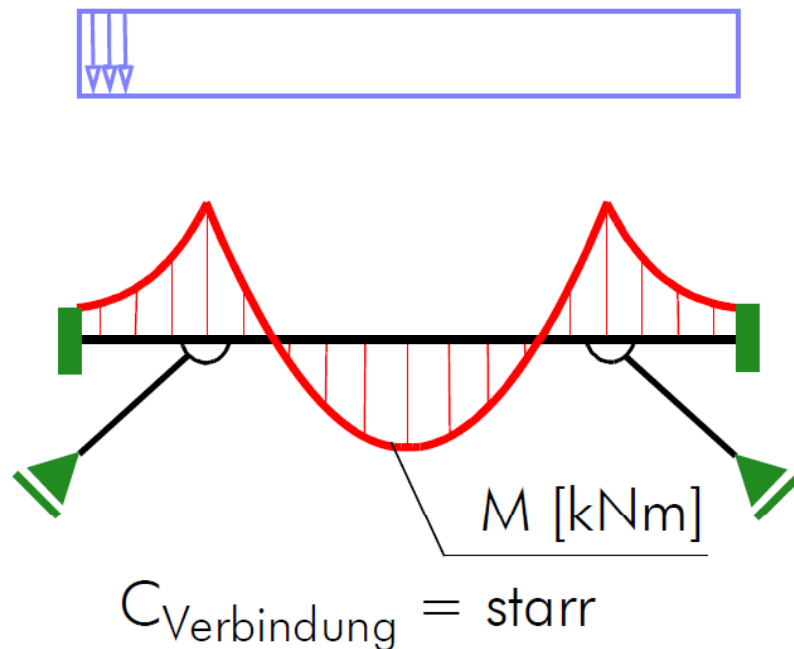
Einfluss auf die Schnittgrößen (statisch unbestimmter Systeme)

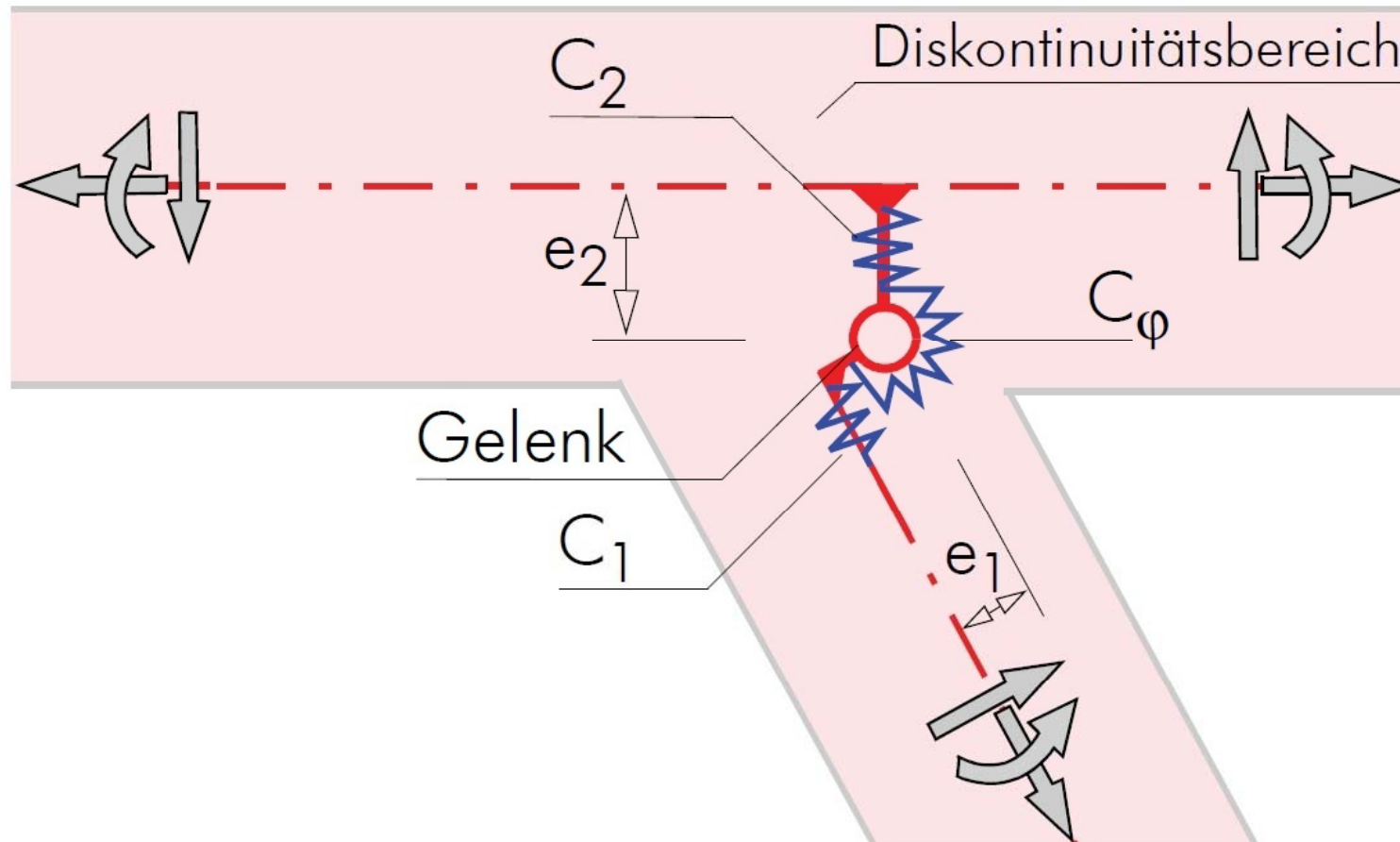
- Beispiel: „Zugausfall“



Einfluss auf die Schnittgrößen (statisch unbestimmter Systeme)

- Beispiel: Kopfbandträger
- Druck quer oder schräg zur Faser
- Anisotropie von Holz (z. B. E_0 zu $E_{90} \sim 30$ zu 1)



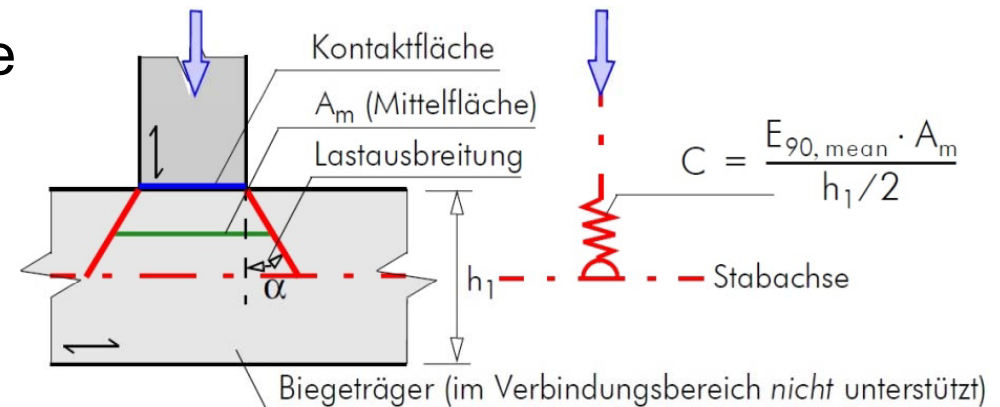


Ermittlung der Federsteifigkeiten

- Angaben der Literatur Steifigkeit $C = \frac{F_{R(k)}}{U}$

- lt. Möhler: zul $v = 1$ bis $1,5$ mm

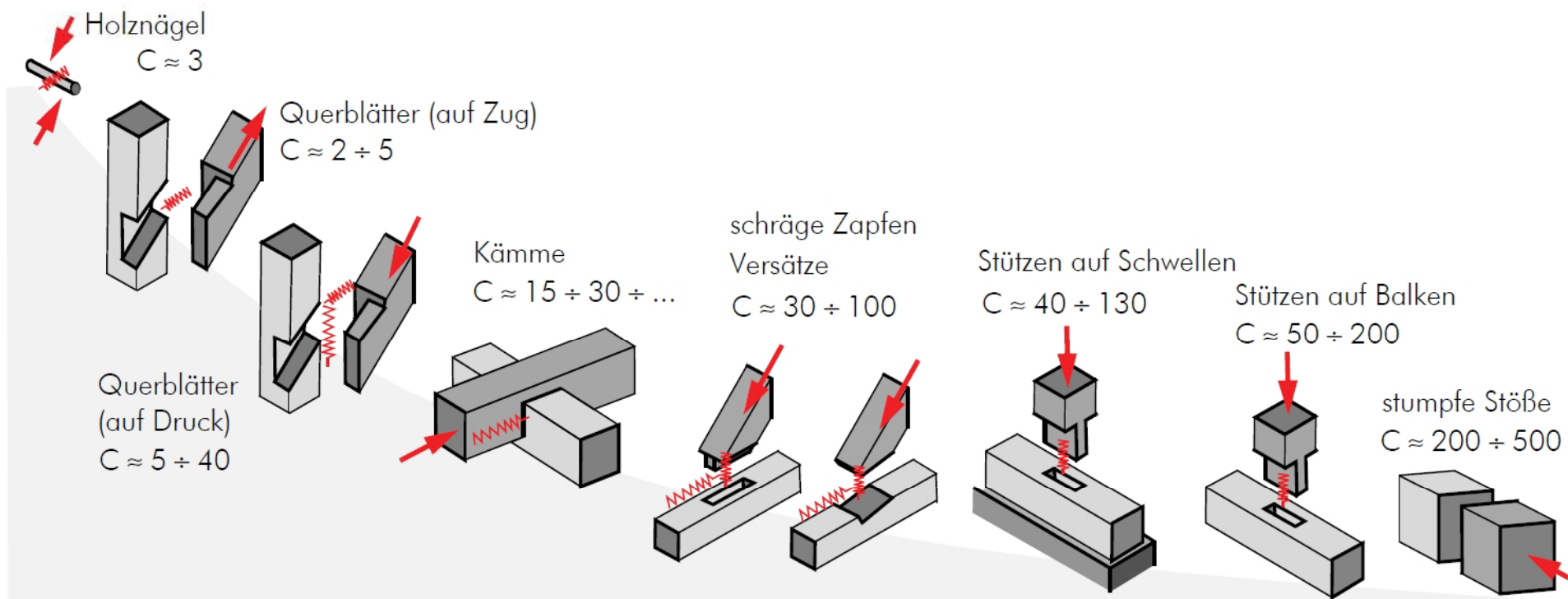
- Lastausbreitungsmodelle
($\alpha = 40^\circ$)



- Prüfungen im Labor (nach EN 26 891)
- Numerische Berechnungen

Übersicht der Federsteifigkeiten [kN/mm]

- wesentlich:
- Nichtlinearitäten
 - richtige *Größenordnung* der Steifigkeiten



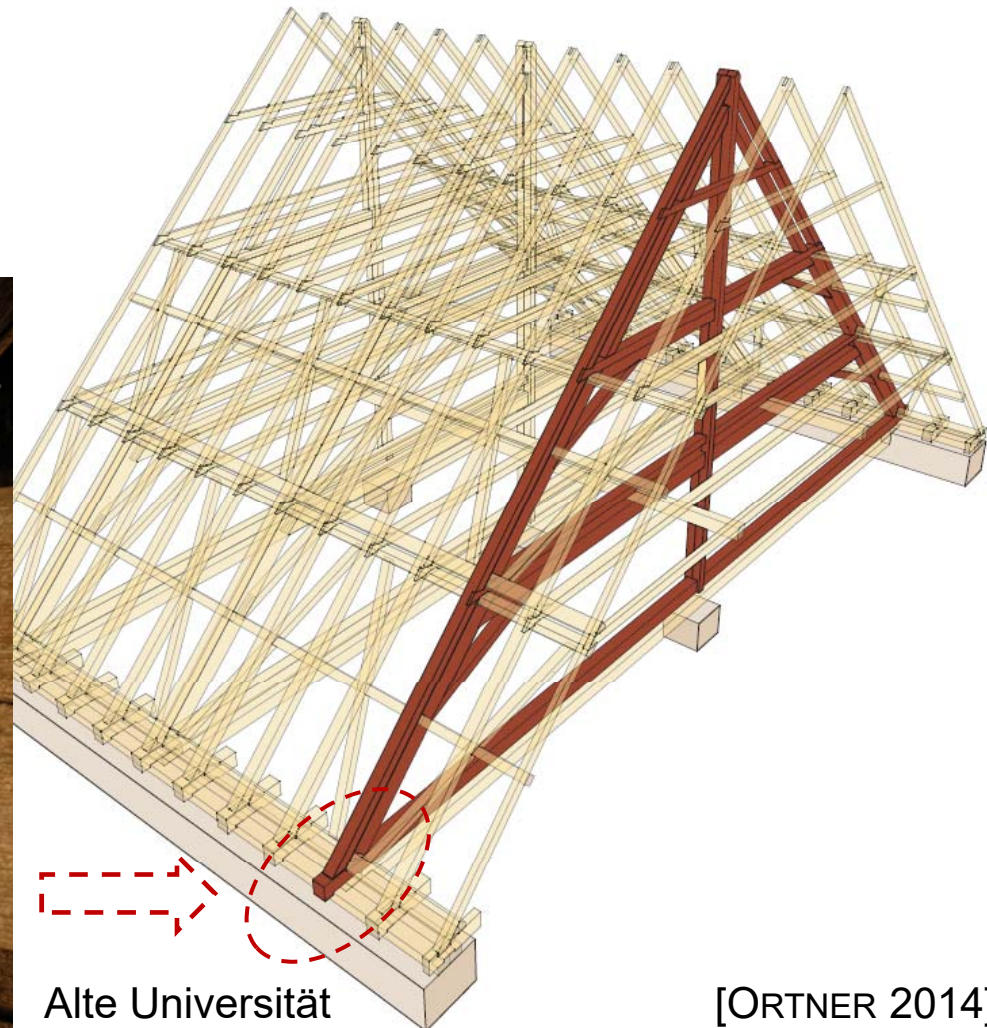
- Basis: „übliche“ Abmessungen, Literatur u. Versuche an TUG

Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von Holz-Holz-Verbindungen

1. Motivation und Übersicht
2. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten
- 3. Kämme**
4. Druckbeanspruchte Blätter
5. Resümee und Ausblick

3. Kämme

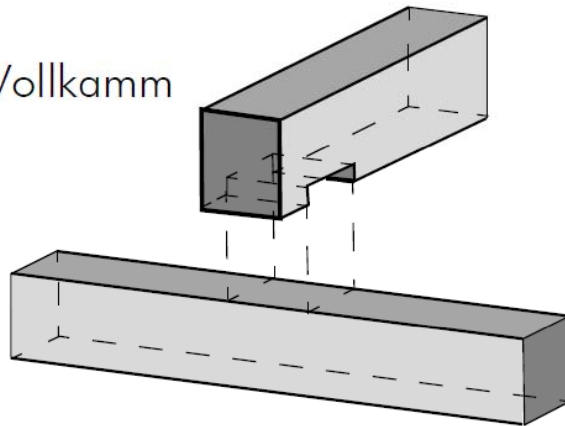
- Sonderform der Blätter
- unscheinbar



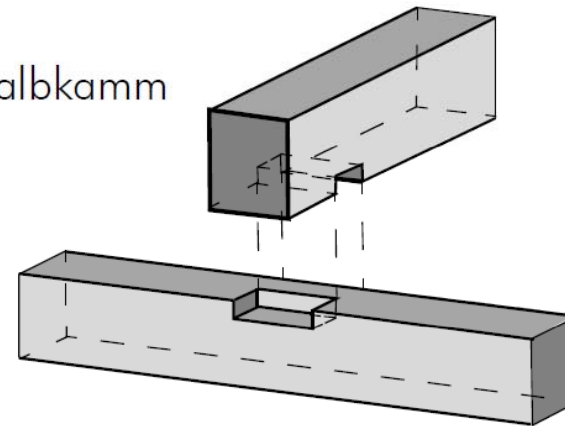
[ORTNER 2014]

Kammarten (für die Prüfungen im Labor, je 6 Prüfkörper)

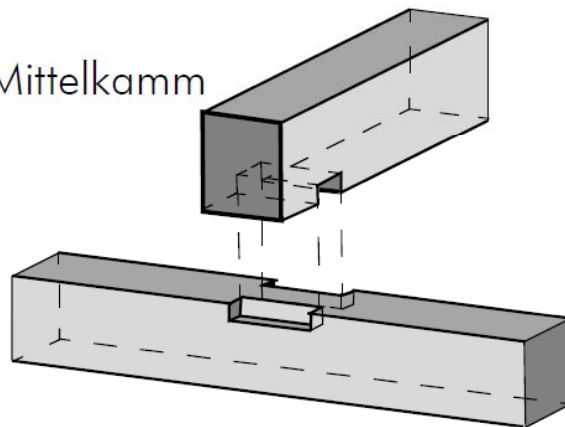
Vollkamm



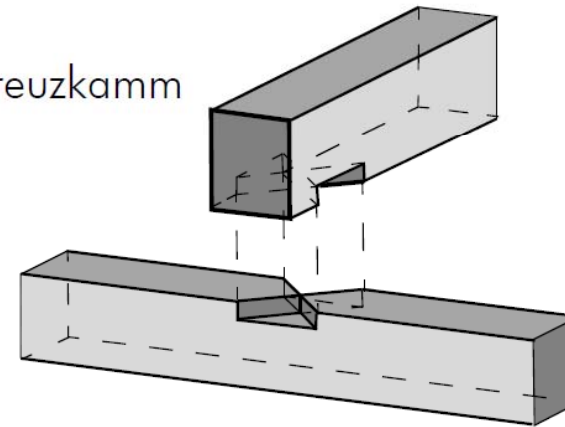
Halbkamm



Mittelkamm



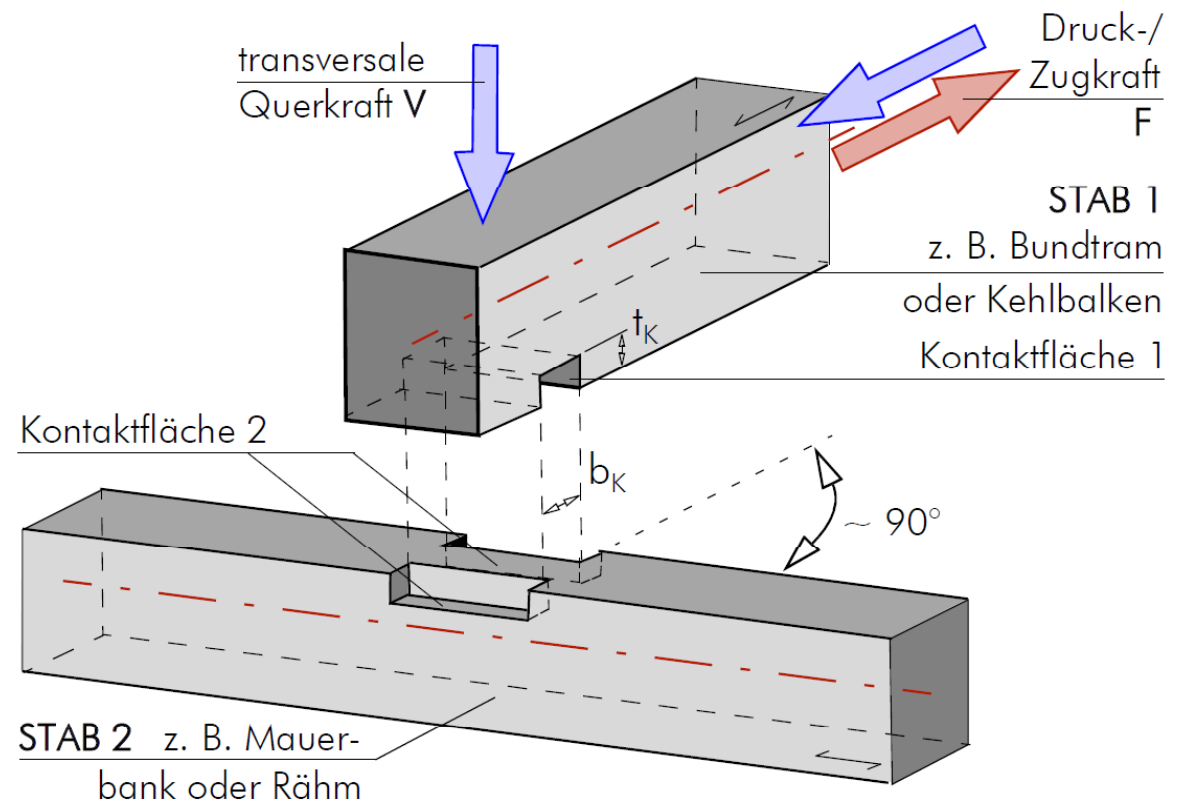
Kreuzkamm



Prüfkonfiguration (insgesamt 26 Prüfkörper)

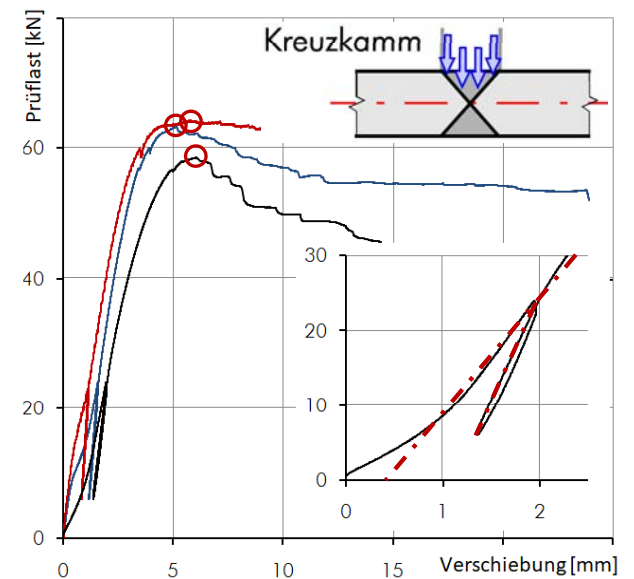
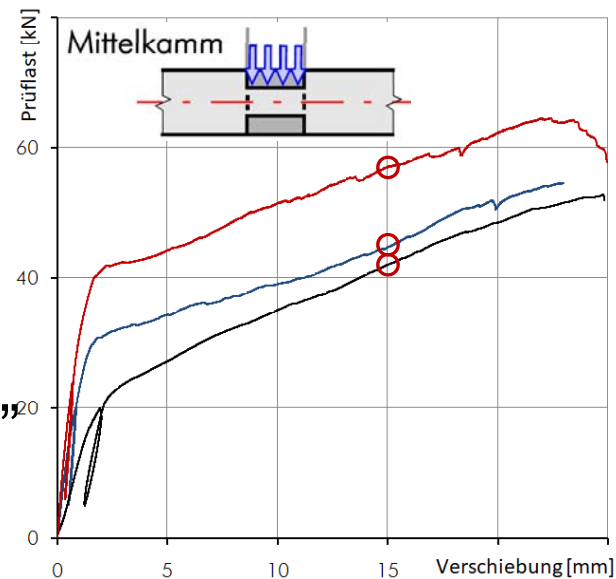
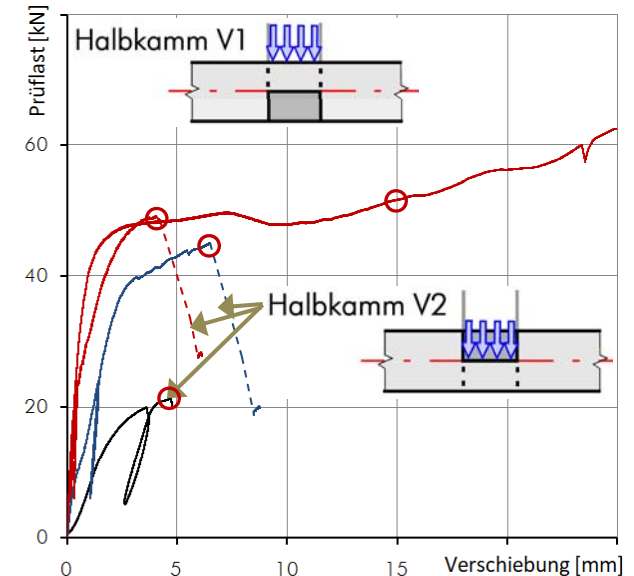
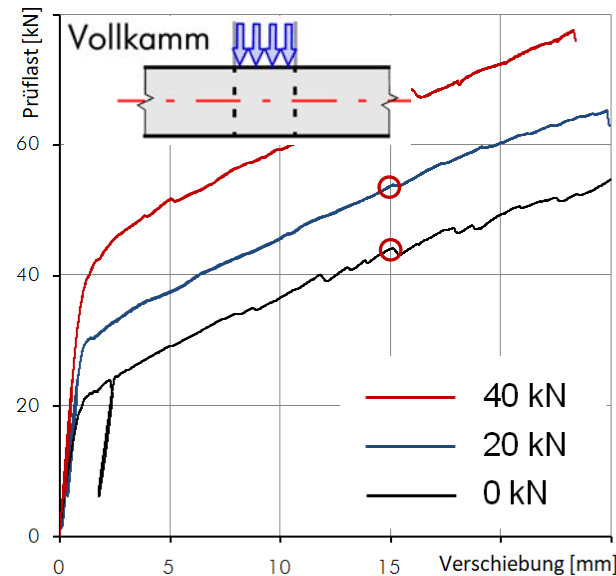
Stäbe 14/16 cm

$t_k = 3 \text{ cm}$



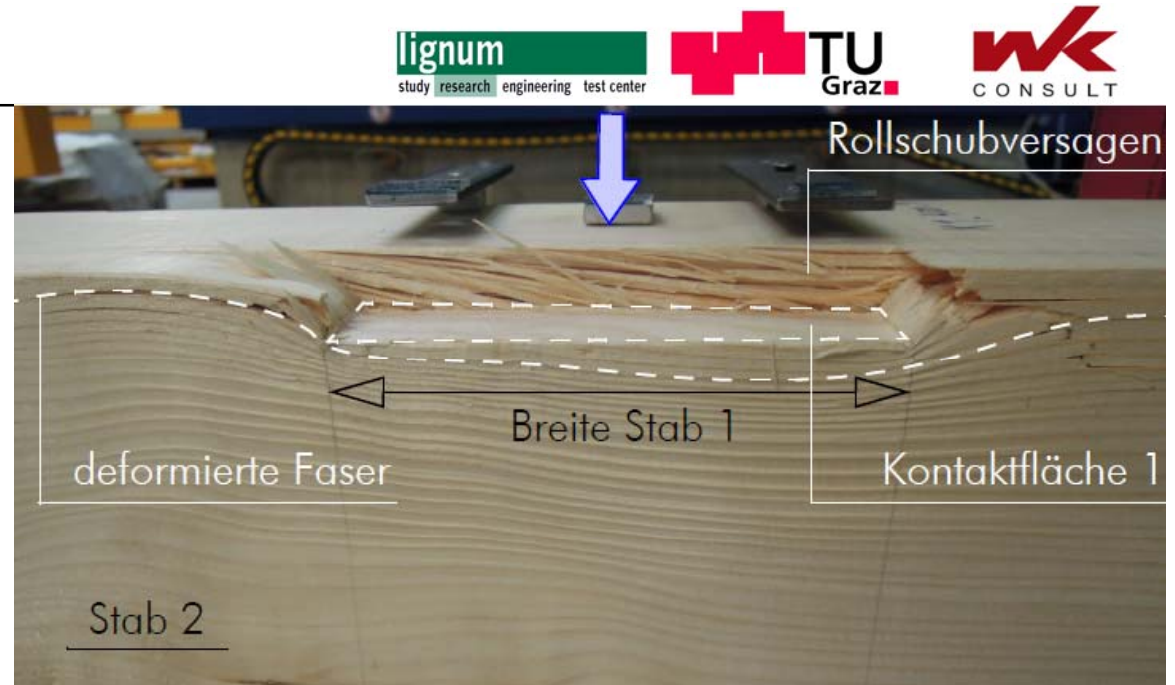
Typische Last-Verformungs-Verläufe

- Vorspannung
- meist:
duktil
bzw.
gutmütig
- Ausnahmen:
Halbkamm V2
Kreuzkamm
- “1. Ast” / “2. Ast”²⁰



Versagens- mechanismen (VM)

- Querdruck



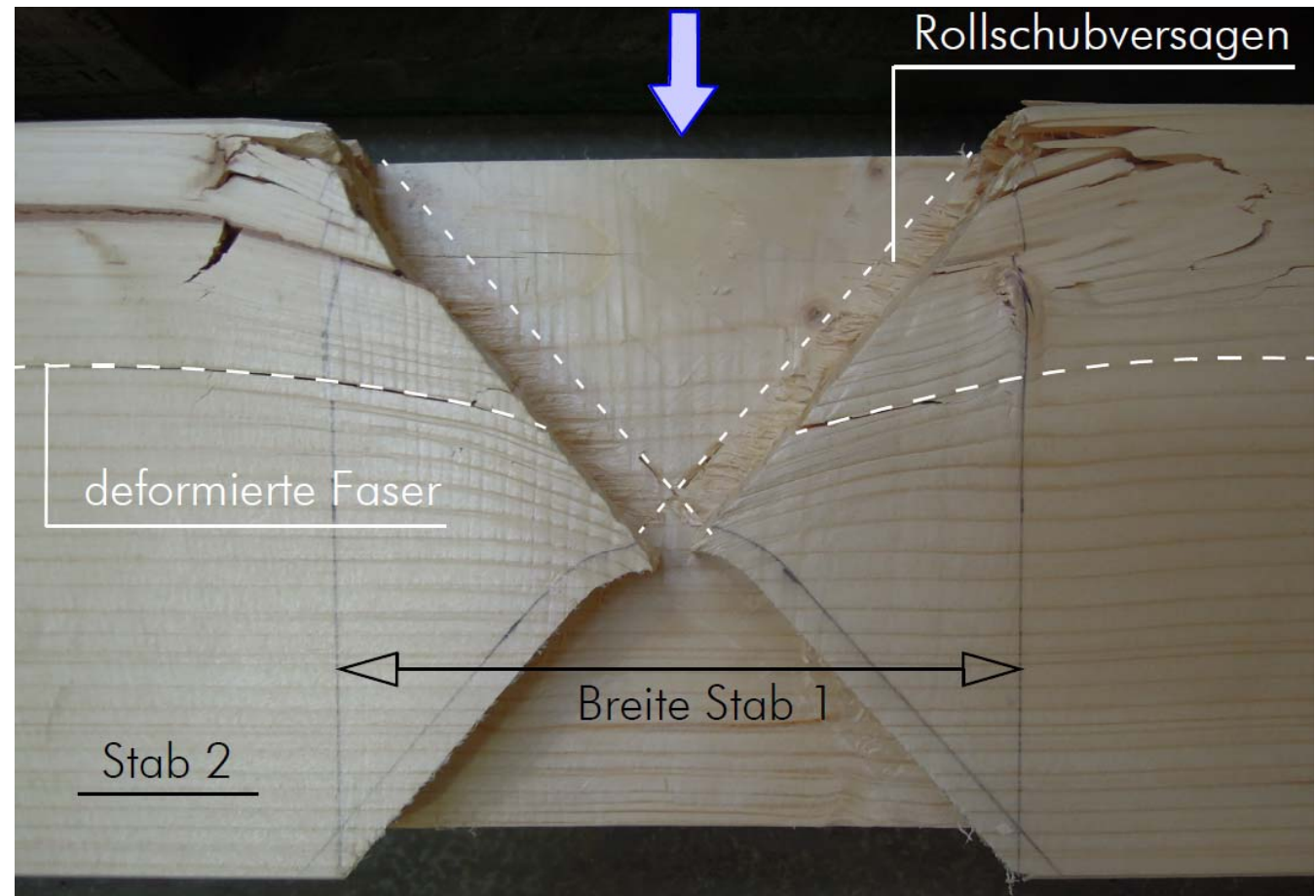
Halbkamm
lastabgewandt (V2):

- Querzug



Versagensmechanismen (VM)

Kreuzkämme: Interaktion aus Querdruck, Rollschub, Biegung und Schub



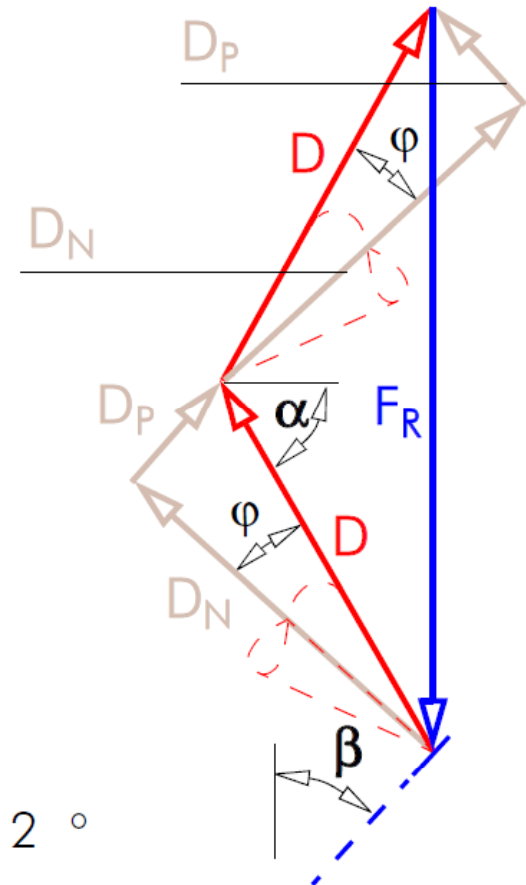
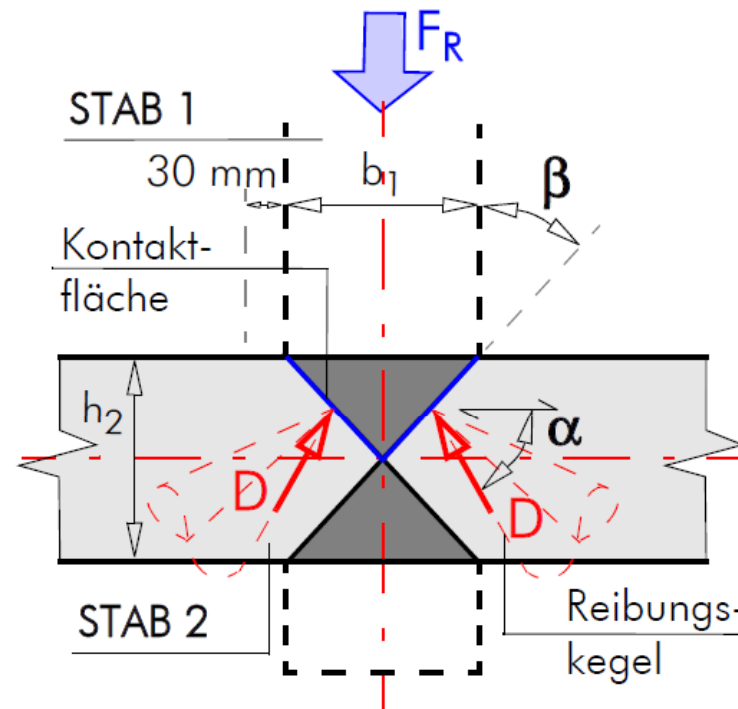
Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit

$$F_{Rd} = \frac{F_{Rk, \text{Kontakt}} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} + V \cdot \mu_{||, d}$$

- Reibung: Vorschlag $\mu_{||, k} = 0,25$ und $\mu_{||, d} = 0,18$ („längs-quer“)
vgl. EN 1995-2: $\mu_{||, d} = 0,17$ (längs-längs)
 $\mu_{||, d} = 0,20$ (quer-quer)
- $F_{Rk, \text{Kontakt}} = \text{VM Querdruck nach EC 5}$
- $F_{Rk, \text{Kontakt}} = \text{VM Querkzug nach EC 5 –}$
Verbindungsmittel unter einem Winkel zur Faser

Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit

- $F_{Rk, \text{Kontakt}} =$
VM beim
Kreuzkamm



$$\beta = \arctan \frac{b_1}{h_2} = \arctan \frac{14}{16} = 41,2^\circ$$

$$\varphi = \arctan(\mu_{\perp, k}) = \arctan(0,35) = 19,3^\circ$$

Berechnungsmodell für die Steifigkeit

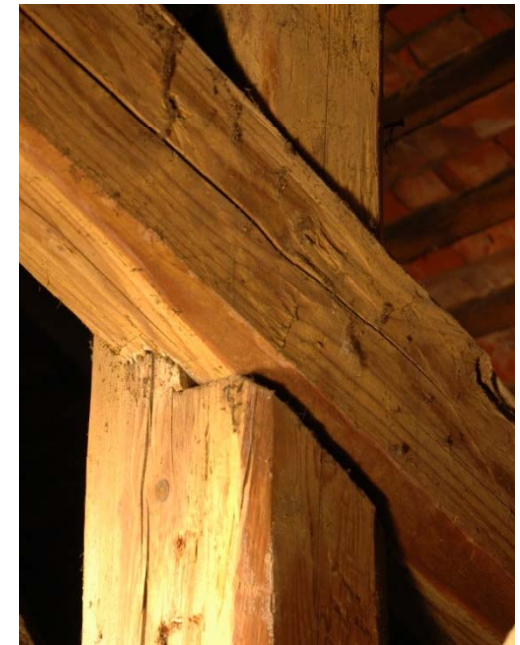
$$\text{Steifigkeit } C = \frac{F_{Rk}}{u} = \frac{\text{charakteristische Tragfähigkeit}}{\text{theoretische Verschiebung}}$$

- unter Erstbelastung (“1. Ast”) $C_I = \frac{F_{Rk}}{1,5 \text{ mm}}$
- unter Wiederbelastung (“2. Ast”) $C_{II} = \frac{F_{Rk}}{0,8 \text{ mm}}$

Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von Holz-Holz-Verbindungen

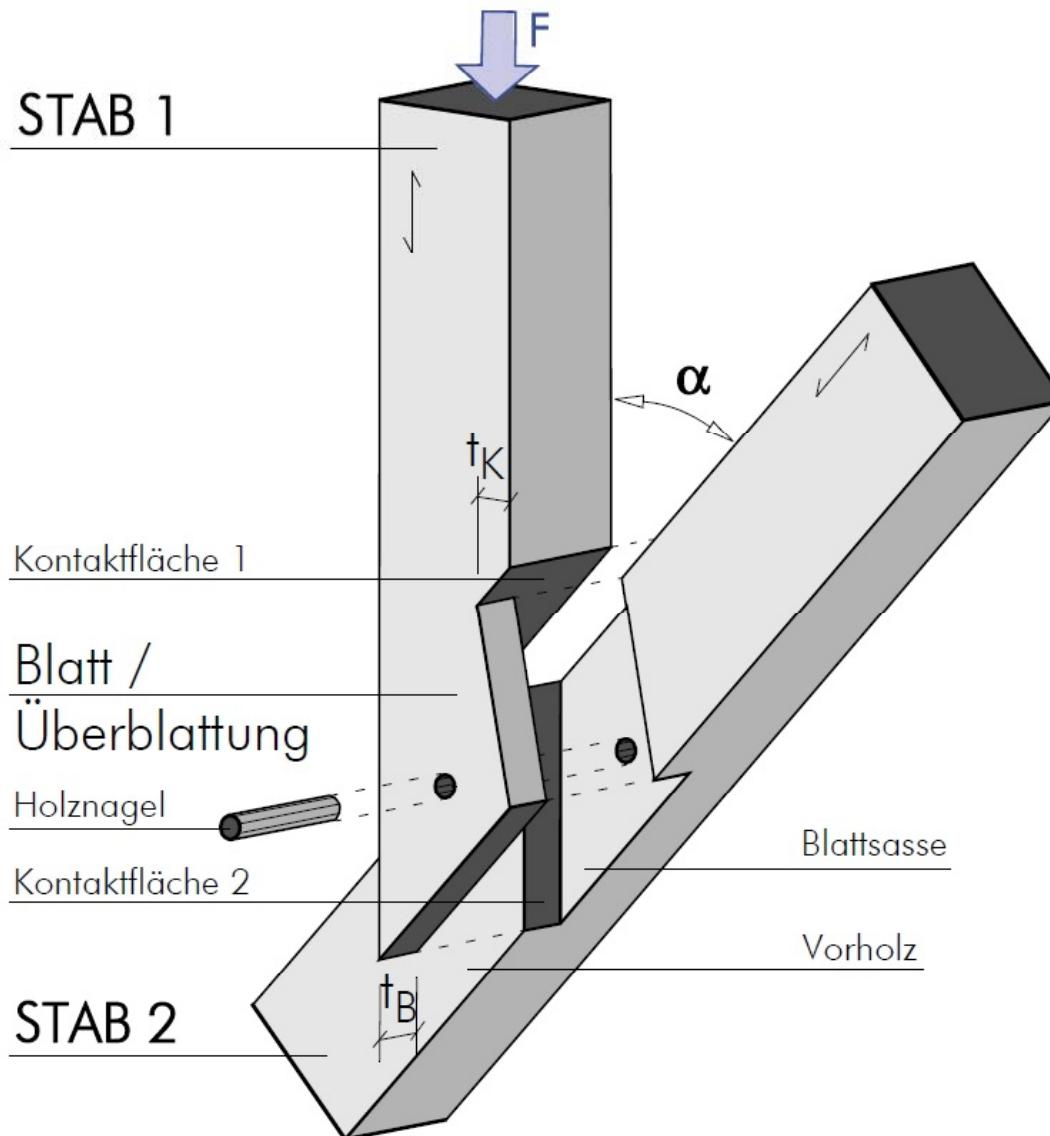
1. Motivation und Übersicht
2. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten
3. Kämme
- 4. Druckbeanspruchte Blätter**
5. Resümee und Ausblick

4. Druckbeanspruchte Blätter



- häufig, insbesondere in Dachwerken
- bislang nur eine Quelle zu Überblattungen: Köck (2011)

92 Prüfungen (Weißschwänze und Überblattungen)



Stäbe 14 / 16 cm

Weißschwänze

$t_B = 5 \text{ cm}$

$t_K = 4 \text{ cm}$

Überblattungen

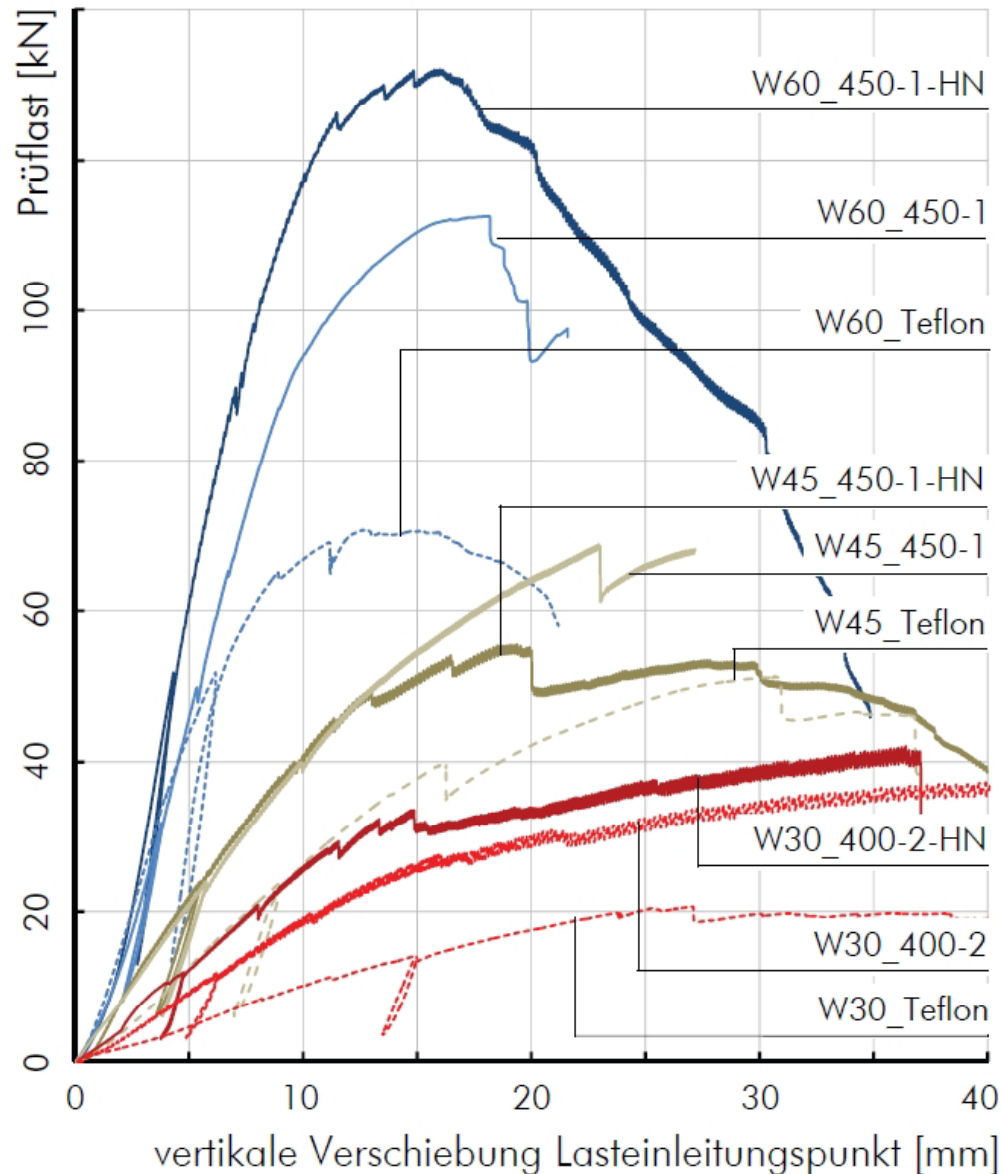
$t_B = 7 \text{ cm}$

$t_K = 0 \text{ cm}$

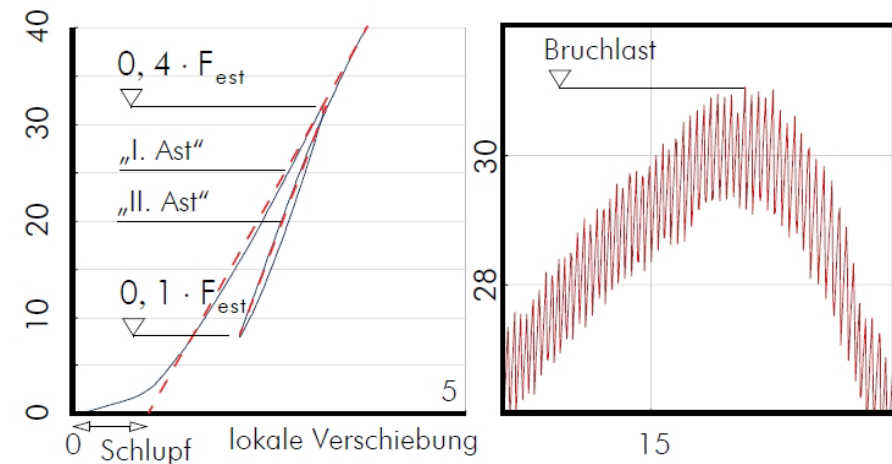
$\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

vereinzelt: Teflon

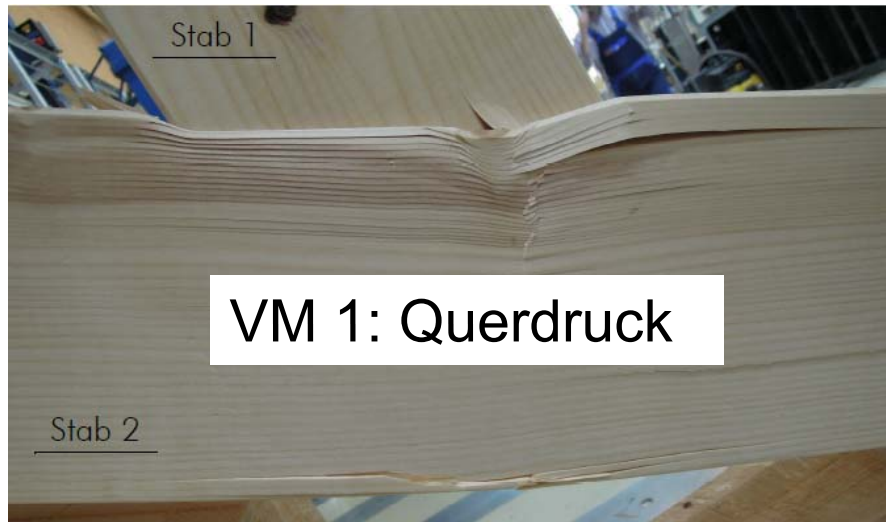
Typische Last-Verformungs-Verläufe für Weißschwänze



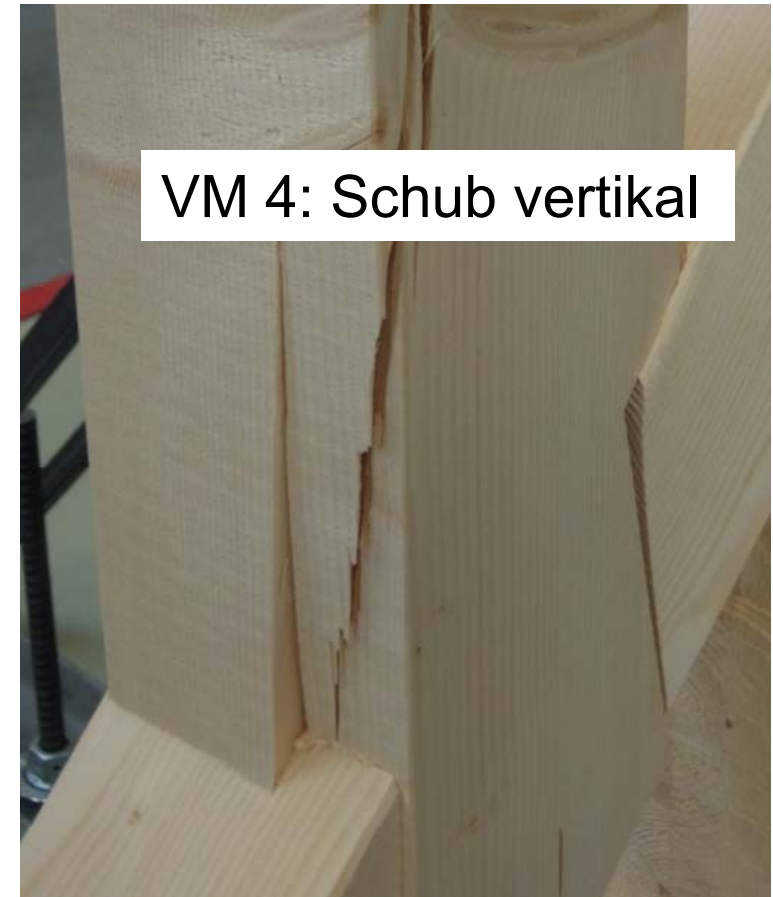
- Anschlusswinkel
- Holznagel erhöht Steifigkeit
- Reibung
- Erstbelastung nicht elastisch



Versagensmechanismen (VM)

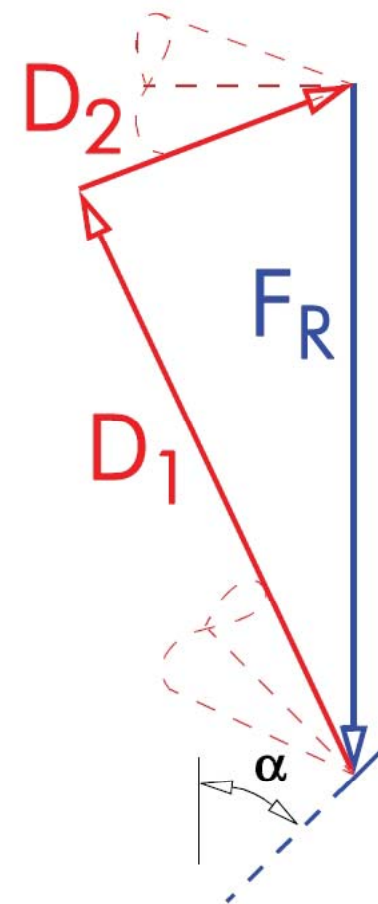
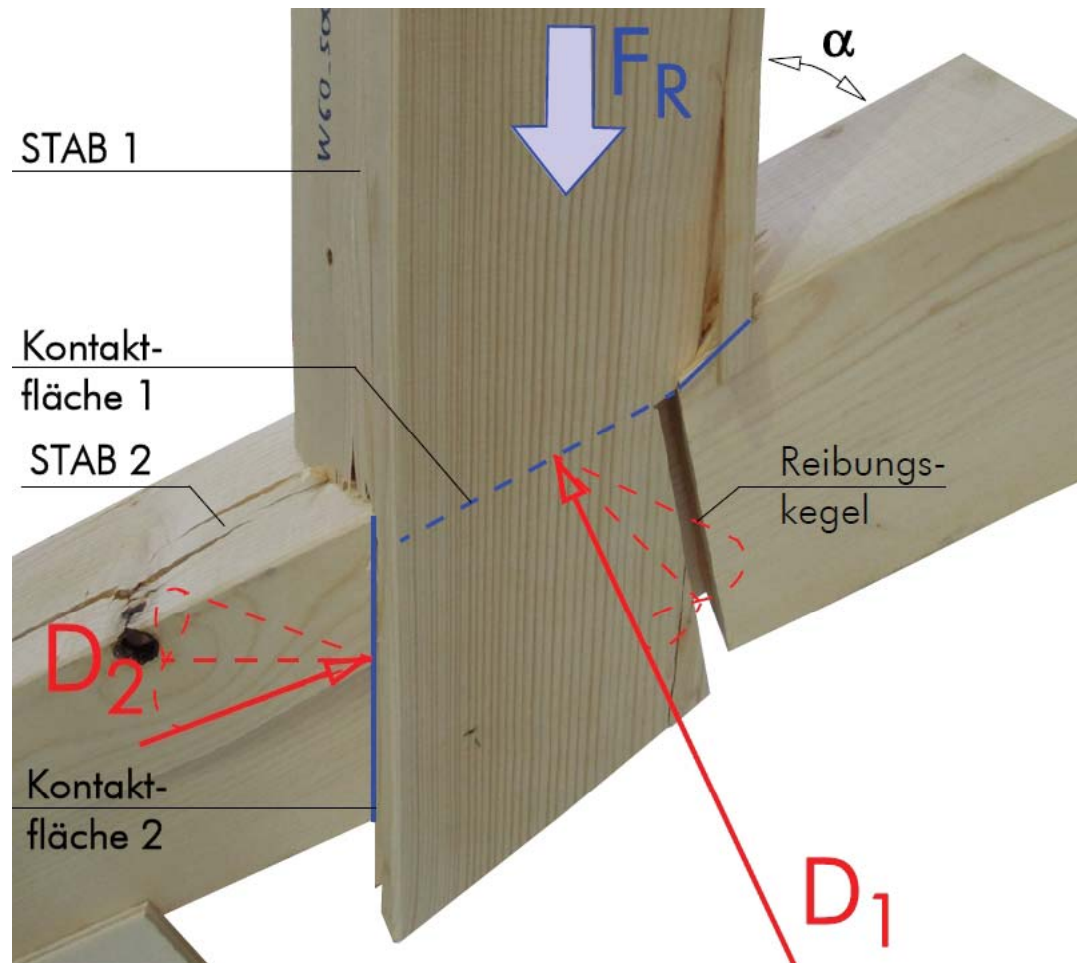


Versagensmechanismen (VM)



Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit

- Abbildung der Versagensmechanismen, Reibung $\mu_{\perp,k} = 0,35$



Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit - Nachweise

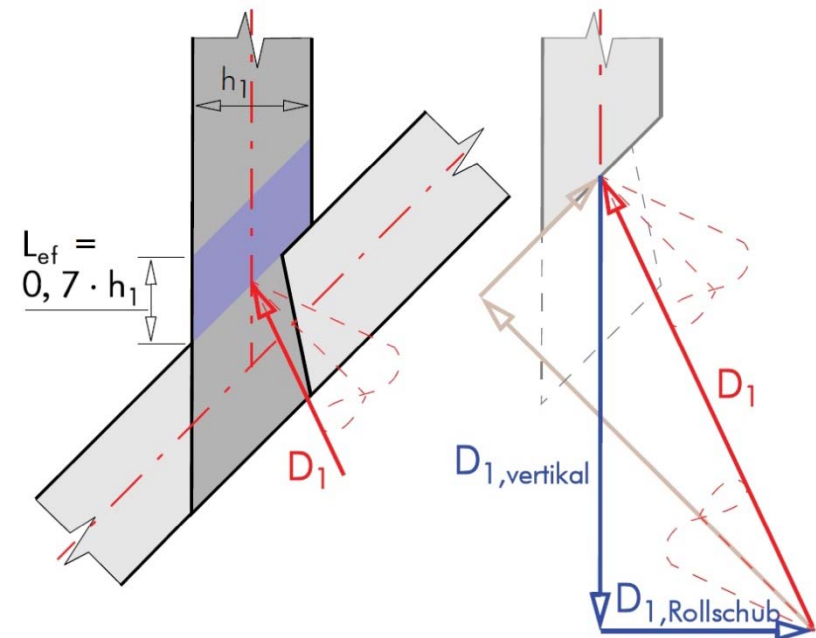
VM 1: Querdruck ... nach EC5

VM 2: Biegezug Blatt

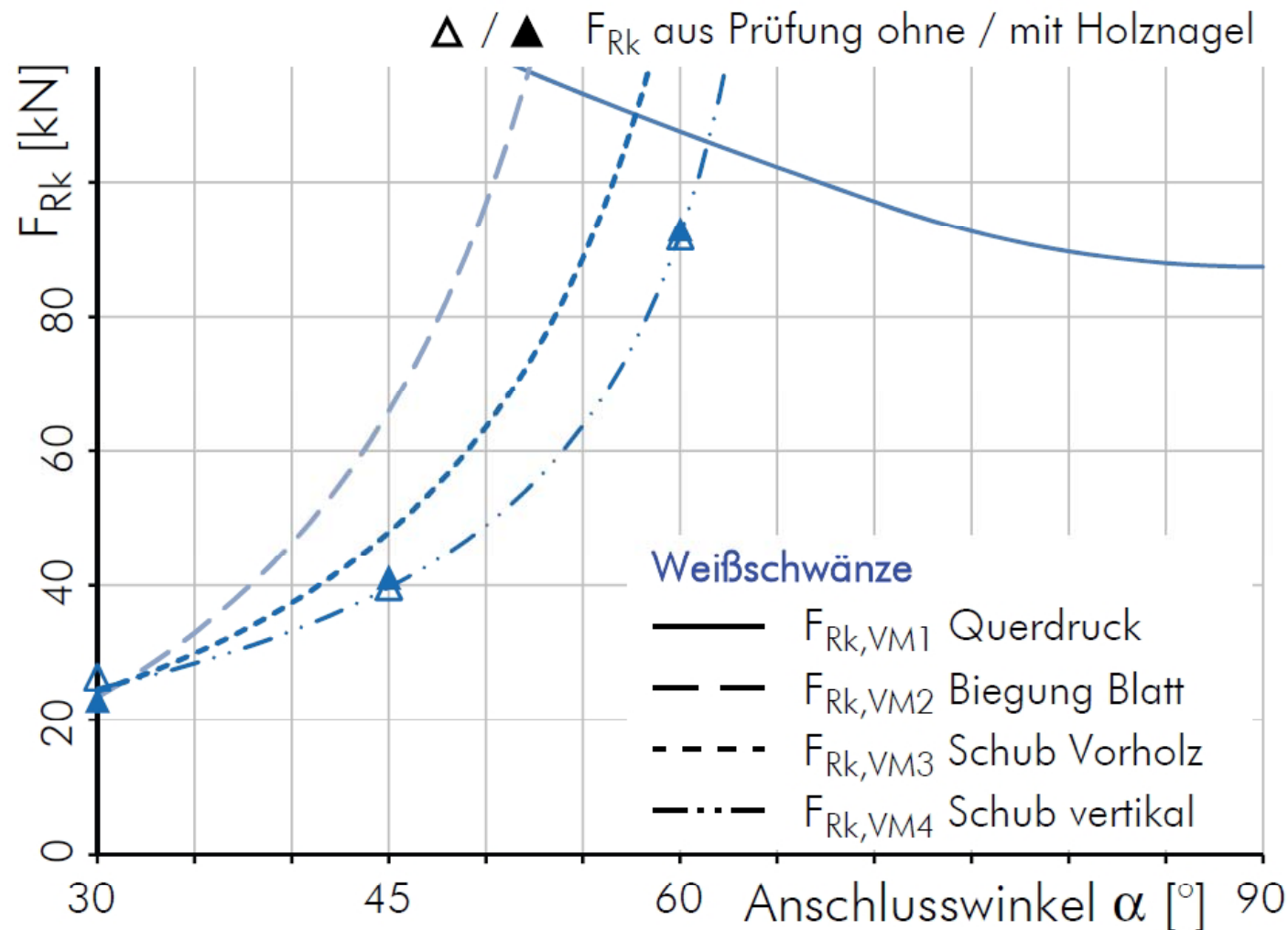
VM 3: Schub Vorholz

VM 4: Schub vertikal

$$F_{Rk} = \text{Minimum} \begin{bmatrix} F_{Rk, VM1} & \dots \text{ Querdruck Stab 2} \\ F_{Rk, VM2} & \dots \text{ Biegung Blatt} \\ F_{Rk, VM3} & \dots \text{ Schub Vorholz} \\ F_{Rk, VM4} & \dots \text{ Schub vertikal} \end{bmatrix}$$



Berechnungsmodell – Vergleich mit den Prüfungen



=> ausgezeichnete Übereinstimmung

Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von Holz-Holz-Verbindungen

1. Motivation und Übersicht
2. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten
3. Kämme
4. Druckbeanspruchte Blätter
- 5. Resümee und Ausblick**

5. Resümee

- Zimmermannsmäßige Verbindungen...
 - ... übertragen Kräfte über Kontaktdruck und Reibung
 - ... ausgeprägt nichtlineare Last-Verformungsverläufe
 - ... weisen i.d. R. große Querschnittsschwächungen und Exzentrizitäten, geringe Steifigkeiten, meist *gutmütiges Tragverhalten* auf
 - ... sind wesentlich für das Verständnis der Tragwirkung historischer Holztragwerke, insbesondere Dachwerke
 - ... es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf

... und Ausblick

- CNC-gefertigte Holz-Holz-Verbindungen

... wirtschaftlich

... großes Potential für Weiter- und Neuentwicklungen



[BLASS UND ENDERS-COMBERG, 2012]

- Potentiale von Holz-Holz-Verbindungen (dank CNC...)



Golfclub in Südkorea [JAERMANN 2012]



Bürobau in Zürich [ANTEMANN 2014]

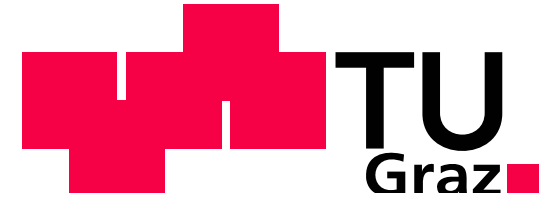
Robuste Holztragwerke dank:

- statisch unbestimmter Systeme UND
- duktiler Holz-Holz-Verbindungen



Danksagung

Institut für Holzbau und Holztechnologie
(Prof. Schickhofer, DI Bernhard Wallner)



Fördergeber Forschungsprojekt „Holz-Holz-Verbindungen“



FFG



Holz&Bau Hirschböck Hartberg



Arbeitgeber: WKC Hamburg GmbH



Dipl.Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Meisel

WKC Hamburg GmbH

andreas.meisel@wk-consult.com

Heimgartenstr. 24, 21244 Buchholz i. d. N.

Buch:

**„Historische Dachwerke: Beurteilung,
realitätsnahe statische Analyse und Instandsetzung“**

ISBN: 978-3-85125-433-4, 52 €

Alle nicht gekennzeichneten Abbildungen stammen vom Verfasser.