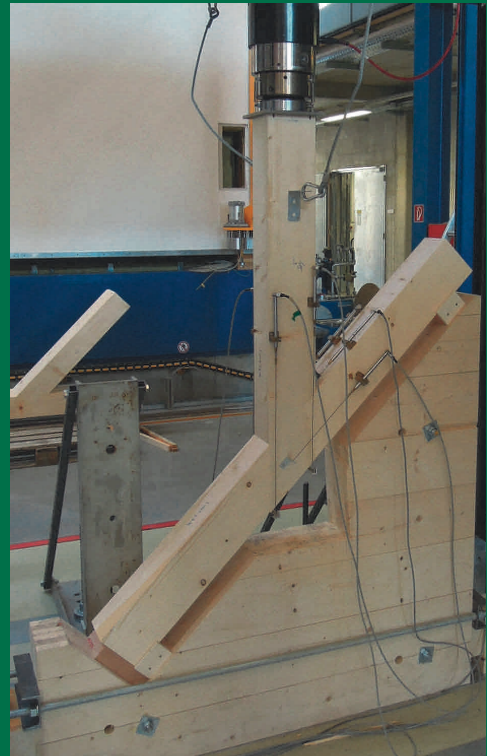


# HOLZ-HOLZ-VERBINDUNGEN

## Forschungsbericht



Mechanisches Verhalten von Holz-Holz-Verbindungen  
in historischen und modernen Holztragwerken

Technische Universität Graz  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
holz.bau forschungs gmbh

Graz, April 2014

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung .....	1
2	Grundlagenermittlung .....	3
2.1	Literaturrecherche .....	3
2.1.1	Überblick der wichtigsten Literaturquellen .....	3
2.1.2	Literaturangaben zur Berechnung der Steifigkeiten und Tragfähigkeiten .....	5
2.1.3	Zugbeanspruchte Blattverbindungen .....	5
2.1.4	Zugbeanspruchte Schwalbenschwanzblätter .....	8
2.1.5	Normalkraftbeanspruchte schräge Zapfenverbindungen .....	9
2.1.6	Querdruckbeanspruchte Kontaktverbindungen .....	11
2.1.7	Stirnversatzverbindungen .....	13
2.1.8	Hakenblatt .....	16
2.1.9	Querkraftbeanspruchte Zapfenverbindungen .....	18
2.1.10	Ausgeklinkte Bauteile .....	20
2.1.11	„Neuartige Zapfenverbindung“ .....	21
2.2	Begriffserklärungen .....	22
2.3	Typische Verbindungsausbildungen und -geometrien .....	24
2.4	Tragverhalten von Holz – Holz – Verbindungen .....	26
2.5	Referenzobjekt: Dachtragwerk der Alten Universität Graz .....	26
2.5.1	Allgemeine Beschreibung / Überblick .....	26
2.5.2	Montagevorgang .....	33
2.5.3	Aufnahmegenaugigkeit .....	40
2.5.4	Vorkommende Verbindungen .....	40
3	Prüfungen im Labor .....	43
3.1	Allgemeines .....	43
3.2	Ermittlung einer geeigneten Prüfkfiguration .....	43
3.2.1	Abschätzung der maximalen Lasten .....	44
3.2.2	Variante 1 Prüfrahmen .....	47
3.2.3	Variante 2: horizontale Prüfung am Aufspannfeld .....	48
3.2.4	Variante 3: Universalprüfmaschine Zwick/Roell .....	49
3.2.5	Variante 4: Prüfgerüst .....	53
3.3	Bestimmung von Steifigkeiten und Bruchlasten .....	54
3.4	Festlegung der Federn .....	55
3.4.1	Weißschwanz / Überblattung .....	55
3.4.2	Kammverbindungen .....	56
3.5	Vorversuche Weißschwanzverbindung .....	57

3.5.1	Montage der Wegaufnehmer .....	59
3.5.2	Ergebnisse Vorversuche Weißschwanzverbindung .....	61
3.5.3	Zusammenfassung .....	63
3.6	Vorversuche Kammverbindung .....	64
3.6.1	Anbringung der Wegaufnehmer .....	65
3.6.2	Ergebnisse Vorversuche Vollkamm .....	66
3.6.3	Zusammenfassung .....	67
3.7	Vorbereitung der Prüfungen der Hauptserie .....	68
3.7.1	verwendetes Holz .....	68
3.7.2	Abmessungen der Prüfkörper .....	68
3.7.3	historische Verbindungen .....	73
3.7.4	Anzahl der Prüfkörper .....	74
3.7.5	Wegmessung .....	75
3.8	Bestimmung der Federsteifigkeiten der Hauptprüfungen .....	77
3.8.1	Weißschwanzverbindung / Überblattung .....	77
3.8.2	Kammverbindungen .....	77
3.9	Prüfergebnisse der Weißschwanzverbindung .....	78
3.9.1	Allgemeines .....	78
3.9.2	Holzfeuchte und Rohdichte .....	79
3.9.3	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Weißschwanzverbindungen mit 30° Neigungswinkel 79	
3.9.4	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Weißschwanzverbindungen mit 45° Neigungswinkel 85	
3.9.5	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Weißschwanzverbindungen mit 60° Neigungswinkel 89	
3.9.6	Einfluss der Rohdichte .....	92
3.9.7	Einfluss der Reibung .....	94
3.9.8	Lastabtragung der Weißschwanzverbindung .....	96
3.9.9	Vergleich der Prüfergebnisse des Weißschwanzes .....	98
3.10	Prüfergebnisse der Überblattungen .....	104
3.10.1	Allgemeines .....	104
3.10.2	Rohdichten und Holzfeuchten .....	104
3.10.3	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Überblattungen mit 30° Neigungswinkel .....	105
3.10.4	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Überblattungen mit 60° Neigungswinkel .....	109
3.10.5	Einfluss der Rohdichte .....	113
3.10.6	Vergleich der Prüfergebnisse der Überblattungen .....	114
3.10.7	Vergleich der Ergebnisse für die Überblattung und den Weißschwanz .....	119
3.11	Prüfergebnisse der Kammverbindungen .....	121
3.11.1	Allgemeines .....	121
3.11.2	Rohdichten und Holzfeuchte .....	122
3.11.3	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Vollkämme .....	123

3.11.4	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Halbkämme .....	124
3.11.5	Federsteifigkeiten und Bruchlasten Mittelkamm .....	126
3.11.6	Federsteifigkeiten und Bruchlasten der Kreuzkämme .....	128
3.11.7	Federsteifigkeiten und Bruchlasten historischer Halbkämme .....	129
3.11.8	Vergleich der Prüfergebnisse der Kammverbindungen .....	131
3.12	Zusammenfassung .....	132
4	Finite-Elemente Berechnungen .....	133
4.1	Einleitung .....	133
4.2	FE-Modellierung der Verbindungen .....	133
4.2.1	Parametrisierung der Verbindungen .....	133
4.3	FE-Berechnungen zu den Blattverbindungen .....	134
4.3.1	Allgemeines .....	134
4.3.2	Ermittlung der Verschiebungsmoduln (Federsteifigkeit) .....	135
4.3.3	Ergebnisvergleich der Weißschwanzverbindungen – Federsteifigkeit $C_B$ .....	136
4.3.4	Ergebnisvergleich der Weißschwanzverbindungen – Federsteifigkeit $C_S$ .....	140
4.3.5	Ergebnisvergleich der Überblattungen – Federsteifigkeit $C_B$ .....	141
4.3.6	Ergebnisvergleich der Überblattungen – Federsteifigkeit $C_S$ .....	142
4.4	Zusammenfassung und Fazit .....	142
5	Entwicklung von Berechnungsmodellen .....	143
5.1	Allgemeines .....	143
5.2	Weißschwanzverbindung und Überblattung .....	143
5.2.1	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{B,1}$ .....	144
5.2.2	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{S,1}$ .....	147
5.2.3	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{B,2}$ .....	150
5.3	Tragfähigkeit von Weißschwänzen und Überblattungen .....	152
5.4	Vollkämme, Halbkämme und Mittelkämme .....	154
5.4.1	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{BT,1}$ .....	154
5.4.2	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{MB,1}$ .....	157
5.4.3	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{BT,2}$ .....	160
5.4.4	Ermittlung der Federsteifigkeit $C_{MB,2}$ .....	161
5.4.5	Ermittlung der Tragfähigkeit .....	161
5.5	Kreuzkamm .....	163
5.5.1	Federsteifigkeit $C_{BT,K,1}$ .....	163
5.5.2	Federsteifigkeit $C_{BT,K,2}$ .....	163
5.5.3	Federsteifigkeit $C_{MB,K}$ .....	164
5.5.4	Ermittlung der Tragfähigkeit von Kreuzkämmen .....	165
5.6	Zusammenfassung .....	167

6	Beanspruchung der Verbindungen im Referenz – Tragwerk .....	169
6.1	Baustatische Analyse des Referenzdachwerkes .....	169
6.1.1	Modellbildung des Tragwerkes .....	169
6.1.2	Auflager .....	171
6.1.3	Verbindungen .....	171
6.2	Analyse der einzelnen Knotenpunkte .....	173
6.2.1	Detail Fußpunkt .....	174
6.2.2	Detail liegender Stuhl der 1. Ebene sowie 1. Kehlbalkeebene .....	189
6.2.3	Detail liegender Stuhl der 2. Ebene sowie 2. Kehlbalkeebene .....	211
6.2.4	Detail Hahnenbalken sowie Firstpunkt .....	228
6.2.5	Detail Anschluss Hängesäule – Bundtram .....	236
6.2.6	Detail Firstpunkt des Leergespärre .....	237
6.2.7	Zusammenfassung der einzelnen Steifigkeiten .....	238
6.3	Resümee .....	242
7	Prüfung und Optimierung von CNC-gefertigten Schwalbenschwanzzapfenverbindungen 243	
7.1	Allgemeines .....	243
7.2	Prüfung der Schwalbenschwanzzapfenverbindungen im Labor .....	244
7.2.1	Konfiguration zur Prüfung der Schwalbenschwanzzapfenverbindungen .....	244
7.2.2	Wegmessung und Bestimmung der Federsteifigkeiten. ....	246
7.2.3	Prüfergebnisse S-I „glatter“ Schwalbenschwanzzapfen .....	247
7.2.4	Prüfergebnisse S-II „abgestufter“ Schwalbenschwanzzapfen .....	249
7.3	Zusammenfassung .....	252
7.4	Optimierung der Schwalbenschwanzzapfen .....	253
7.4.1	Variante 1 - Ausgangsgeometrie .....	253
7.4.2	Variante 2 - bogenförmige Flanken .....	254
7.4.3	Variante 3 - Abstufung .....	255
7.4.4	Variante 4 - stärkere Neigung der Flanken .....	255
7.4.5	Variante 5 - zwei Abstufungen .....	256
7.4.6	Variante - 6 Abstufung mit zusätzlicher Abstufung aus der Ebene .....	256
7.4.7	Vergleich der Varianten auf Basis einer FE-Simulation .....	257
7.4.8	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse .....	259
8	Anhang A: Prüfdaten .....	261
8.1	Kraft-Weg-Diagramme .....	261
8.1.1	Weißschwanzverbindungen mit 30° Neigungswinkel .....	261
8.1.2	Weißschwanzverbindungen mit 45° Neigungswinkel .....	265
8.1.3	Weißschwanzverbindungen mit 60° Neigungswinkel .....	267
8.1.4	Überblattungen mit 30° Neigungswinkel .....	269

8.1.5	Überblattungen mit 60° Neigungswinkel .....	273
8.1.6	Vollkämme .....	275
8.1.7	Halbkämme .....	276
8.1.8	Mittelkämme .....	277
8.1.9	Kreuzkämme .....	278
8.2	Einfluss der Rohdichte .....	279
8.2.1	Weißschwanzverbindungen mit 30° Neigungswinkel .....	279
8.2.2	Weißschwanzverbindungen mit 45° Neigungswinkel .....	282
8.2.3	Weißschwanzverbindungen mit 60° Neigungswinkel .....	285
8.2.4	Überblattungen mit 30° Neigungswinkel .....	288
8.2.5	Überblattungen mit 60° Neigungswinkel .....	291
8.3	Einfluss der Quervorspannkraft FMB bei den Kammverbindungen .....	294
8.3.1	Vollkamm .....	294
8.3.2	Halbkämme .....	295
8.3.3	Mittelkämme .....	297
8.3.4	Kreuzkämme .....	298
8.4	Rohdichten und Holzfeuchten der Prüfkörper .....	299
8.4.1	Weißschwanzverbindungen mit 30° Neigungswinkel .....	299
8.4.2	Weißschwanzverbindungen mit 45° Neigungswinkel .....	301
8.4.3	Weißschwanzverbindungen mit 60° Neigungswinkel .....	303
8.4.4	Überblattungen mit 30° Neigungswinkel .....	305
8.4.5	Überblattungen mit 60° Neigungswinkel .....	307
8.4.6	Vollkämme .....	309
8.4.7	Halbkämme .....	310
8.4.8	Mittelkämme .....	311
8.4.9	Kreuzkämme .....	312
8.5	Boxplot-Diagramme .....	313
8.5.1	Weißschwanzverbindungen .....	313
8.5.2	Überblattungen .....	317
8.5.3	Kammverbindungen .....	321
8.6	Bruchbilder .....	322
8.6.1	Weißschwanz mit 30° Neigungswinkel .....	322
8.6.2	Weißschwanz mit 45° Neigungswinkel .....	324
8.6.3	Weißschwanz mit 60° Neigungswinkel .....	326
8.6.4	Überblattungen mit 30° Neigungswinkel .....	328
8.6.5	Überblattungen mit 60° Neigungswinkel .....	329
8.6.6	Vollkämme .....	331
8.6.7	Halbkämme .....	332
8.6.8	Mittelkämme .....	333
8.6.9	Kreuzkämme .....	334

9	Anhang B: Abschätzung der Tragfähigkeiten der Verbindungen .....	335
9.1	Ermittlung der Materialkennwerte .....	335
9.2	Ermittlung der zu erwartenden Tragfähigkeit der zu prüfenden Verbindungen .....	336
9.2.1	Weißschwanzverbindung: .....	336
9.2.2	Überblattung: .....	341
9.2.3	Kammverbindungen .....	344
9.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	346
9.2.5	Weißschwanzverbindung .....	346
9.2.6	Überblattung .....	347
9.2.7	Kammverbindungen .....	348
10	Anhang C: FE-Modellierung zu Kapitel 4 .....	349
11	Anhang D: FE-Simulation zu Kapitel 6 .....	363
11.1	Variante 1 - Ausgangsgeometrie .....	363
11.1.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	363
11.1.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	365
11.2	Variante 2 - bogenförmige Flanken .....	367
11.2.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	367
11.2.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	369
11.3	Variante 3 - Abstufung .....	371
11.3.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	371
11.3.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	373
11.4	Variante 4 - stärkere Neigung der Flanken .....	375
11.4.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	375
11.4.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	377
11.5	Variante 5 - zwei Abstufungen .....	379
11.5.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	379
11.5.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	381
11.6	Variante 6 - Abstufung aus der Ebene .....	383
11.6.1	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,2$ .....	383
11.6.2	FE-Simulation mit Reibbeiwert $\mu=0,6$ .....	385
12	Anhang E: Dokumentation der RSTAB 7.04 - Modelle .....	387
12.1	Lastaufstellung .....	387
12.2	Lastfallüberlagerungen .....	391
12.3	Modell M1 – 2D .....	391
12.4	Modell M2 – 3D .....	406
12.5	Modell M3 – 3D mit Federn – nS: .....	423

12.6	Modell M3 – 3D mit Federn – hS:	440
12.7	Modell M3 – 3D mit Federn – hS10:	457
12.8	Vergleich der Ergebnisse der Stabwerksberechnung	474
12.8.1	Vergleich der Ausnutzungsgrade ausgewählter Bauteile:	474
12.8.2	Vergleich der Ausnutzungsgrade ausgewählter Verbindungen	491
	Literaturverzeichnis	521