

Nicht perfekt, aber belastbar – Tragfähigkeit genagelter Verbindungen im Bestand

Werner Seim
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Universität Kassel, Deutschland



Lars Völlmecke
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Universität Kassel, Deutschland



Nicht perfekt, aber belastbar – Tragfähigkeit genagelter Verbindungen im Bestand

1. Einführung

Die Verwendung von Nägeln für tragende Verbindungen im Holzbau beschränkt sich heutzutage hauptsächlich auf das Zusammenfügen von Holzwerkstoffplatten und Vollholz als Beplankung und Rippen zu Wand- und Deckentafeln. Dabei sind die Nägel großzügiger verteilt als bei fachwerkartigen Konstruktionen und in den meisten Fällen geringer ausgelastet.

Bis zur Einführung der Nagelplatten in den 1970er Jahren war der Nagel allerdings auch ein bevorzugtes Verbindungsmittel bei den sogenannten Brett- und Bohlenbindern, welche in unterschiedlichen Formen vor allem als materialsparende Tragelemente für Dachkonstruktionen zum Einsatz kamen. Aufgrund nicht verfügbarer Nagelplatten waren genagelte Brett- und Bohlenbinder in der DDR noch bis in die 1980er Jahre gebräuchlich. Bei dieser Bauart ergänzten sich die vergleichsweise dünnen Stahlstifte optimal mit den schmalen Holzquerschnitten. Die Nägel wurden bei Vollwandbindern flächig verteilt, bei Fachwerkknoten dagegen möglichst eng angeordnet. Unabhängig von der Trägerform wurde sehr darauf geachtet, das Material entsprechend der Belastung möglichst effizient einzusetzen. Die Tatsache, dass Nägel anders als Dübel nicht von Patenten geschützt waren und auch von ungelernten, billigeren Arbeitskräften verbaut werden konnten, begünstigte die Nagelbauweise weiter. Zwei beispielhafte Konstruktionen zeigt Abbildung 1. In den wichtigen zeitgenössischen Publikationen zum Holzbau wird die Nagelverbindung im Zusammenhang mit Hallentragwerken behandelt. So enthält die 1963 erschienene 7. Auflage des Holzbau-Taschenbuchs einen eigenen Abschnitt zu Fachwerken in Nagelbauweise [1]. Eine übersichtliche Darstellung zur Konstruktionsgeschichte genagelter Binder wurde von Engemann et al. vorgelegt [2].



(a)



(b)

Abbildung 1: (a) Fachwerkbinder System Kroher, Dresden-Hellerau (b) Vollwandbinder, Friedenskirche Dresden

Bei Fachwerken im Ingenieurholzbau wurden nach und nach Bohlen durch Brettschichtholz und Nägel durch andere Verbindungsmittel verdrängt. So werden Knotenpunkte heute überwiegend mit eingeschlitzten Blechen und Stabdübeln gefügt. Allerdings ergeben sich im Zusammenhang mit genagelten Konstruktionen auch aktuelle Fragestellungen. Beispielsweise dann, wenn bestehende Dächer für Fotovoltaikanlagen genutzt, oder rückgebaute Binder an anderer Stelle einer neuen Nutzung zugeführt werden sollen.

Die Neubewertung der Tragfähigkeit genagelter Verbindungen im Bestand stellt immer dann eine besondere Herausforderung dar, wenn die aktuellen Konstruktionsregeln nicht eingehalten sind und bzw. oder Risse vorhanden sind (siehe Abbildung 2a). Nicht selten führt die Unsicherheit dahingehend, wie man mit solchen nicht durch Normen erfassten Situationen umgehen soll, dazu, dass ganze Tragwerke abgebrochen und ersetzt oder unnötigerweise verstärkt bzw. saniert werden (siehe Abbildung 2b).



Abbildung 2: (a) Knoten mit zu geringen Randabständen und einzelnen Rissen
(b) Sanierung durch Austausch von Diagonalen

Im Folgenden werden nun zuerst die wichtigsten Meilensteine bei der Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsregeln für genagelte Verbindungen vorgestellt. Mit Bezug zu Unregelmäßigkeiten und Schäden, wie sie im Bestand typischerweise vorhanden sind, wird dann ein Bewertungsschema eingeführt mit dem einzelnen Knoten Zustandskategorien zugeordnet werden können. Die Sinnhaftigkeit der Kategorisierung wird anschließend durch die Auswertung der Ergebnisse von Tragfähigkeitsuntersuchungen an den entsprechend bewerteten Verbindungen überprüft. Der Ausblick enthält u.a. Hinweise dazu, wie die visuelle Bewertung zukünftig mit modernen Methoden automatisiert werden könnte.

2. Entwicklung der Konstruktions- und Bemessungsregeln

Die systematische Erforschung der Nagelverbindungen begann in Deutschland in den späten 1920er Jahren, wurde maßgeblich vorangebracht durch die Arbeiten von Gaber, Grabbe und Stoy (u.a. [3 - 7]) und führte schnell zur Akzeptanz der Nagelbauweise innerhalb des Bauwesens. Das spiegelt sich in der Aufnahme der Nagelverbindung in die Holzbaunorm DIN 1052:1933 [8] wider. Davor, in den «Vorläufigen Bestimmungen für Holztragwerke» der Deutschen Reichsbahn Gesellschaft [9; 10], war der Gebrauch von Nägeln in tragenden Konstruktionen noch untersagt. Sicherlich war der gestiegene Fokus auf den Nagel in Forschung und Praxis auch durch die politisch verordnete Materialrationierung durch das Dritte Reich begünstigt.

Wie sich die Erforschung und Reglementierung des Nagels in den letzten 100 Jahren gestaltet hat, darauf soll im Folgenden eingegangen werden. In der jüngeren Vergangenheit gab es verschiedene Auseinandersetzungen mit Forschung und Normung im Holzbau des letzten Jahrhunderts. Rug schilderte 2003 umfassend die allgemeine Entwicklung des Holzbaus in Deutschland von 1903 bis 2003 [11]. Aktuelle Beiträge zu der Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsregeln für genagelte Verbindungen stammen von Fischer et al. [12] und von Schwendner et al. [13].

2.1. Konstruktionsregeln

Konstruktionsregeln für Verbindungen im Holzbau stellen sicher, dass die experimentell abgesicherte Tragfähigkeit erreicht wird und kein vorzeitiges Versagen eintritt. Konstruktionsregeln werden vorrangig aus den Randbedingungen von Versuchen abgeleitet. Wesentliche Parameter sind die Mindestabstände der Nägel, die Mindestholzdicke und die

Mindesteindringtiefe des Nagels. Aber auch weitere Regeln wie das Versetzen in Faser-richtung oder das Vorbohren einer Verbindung spielen eine wichtige Rolle. In Abbildung 3 sind alle geometrischen Abmessungen im Zusammenhang mit den hier behandelten Konstruktionsregeln für einen typischen Brettbinderknoten dargestellt.

Die wichtigsten Konstruktionsregeln betreffen die Mindestabstände, die Mindestdicken der angeschlossenen Hölzer sowie die Mindesteindringtiefe. Weitere Angaben betreffen das Versetzen, die Übergreifungslängen und das Vorbohren. Im Folgenden wird beispielhaft auf die Regelung der Mindestabstände eingegangen. Hinsichtlich der weiteren konstruktiven Regeln wird auf den Beitrag von Fischer et al. [12] verwiesen.

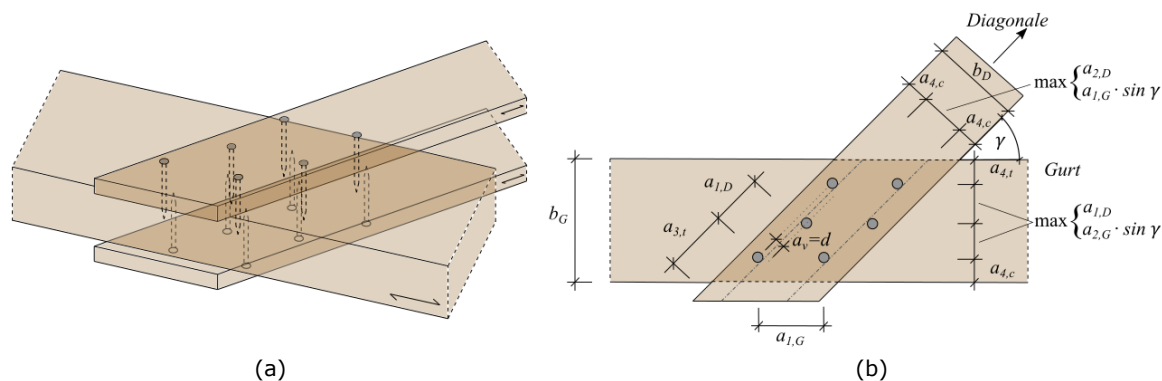


Abbildung 3: (a) Isometrie eines typischen Brettbinderknotens
(b) Ansicht mit der Definition der Mindestabstände

Ein wesentlicher Aspekt bei einer Holzverbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln ist die Einhaltung der Mindestabstände. Damit soll die Spaltgefahr bei der Herstellung und unter Last ausgeschlossen werden.

In DIN 1052:1933 waren noch keine konkreten Angaben zu Nagelabständen enthalten. Basierend auf den Forschungsergebnissen von Gaber [3; 4] und Stoy [6; 7] enthielt DIN 1052:1938 [14] erstmals konkrete Angaben zu den Mindestabständen, die nur vom Nageldurchmesser d abhingen und nicht vom Kraft-Faser-Winkel. Im Wesentlichen sind diese Werte bis heute unverändert, siehe Tabelle 1. Die einzige größere Anpassung betrifft den Abstand in Faserrichtung vom beanspruchten Hirnholzende $a_{3,t}$. Bei Untersuchungen von Fonrobert [15] fiel auf, dass der bis dahin gültige Abstand von $12d$ nicht ausreichend war, um ein Aufspalten des Holzes zu verhindern. Ohne konkret zu werden, empfahl er deshalb den Abstand zu erhöhen. Egner [16] lieferte eine Untersuchung für dicke Nägel ($d \geq 6$ mm), in der eine Erhöhung für $a_{3,t}$ von $12d$ auf $15d$ empfohlen wurde. 1963 bzw. 1969 wurden die Mindestabstände zuerst in der TGL, dann auch in den DIN angepasst. Ab 1969 findet außerdem eine Unterscheidung zwischen vorgebohrten und nicht vorgebohrten Nägeln statt. In der heutigen Fassung der Holzbaunorm ist bei allen Abständen mit Ausnahme des unbeanspruchten Randes der Kraft-Faser-Winkel zu berücksichtigen. Für a_1 und $a_{4,t}$ findet zudem eine Unterscheidung für Nägel mit $d \geq 5$ mm statt.

Tabelle 1: Regeln für Nagelabstände in Holzbaunormen von 1938 bis 2022

Regelwerk		DIN 1052	TGL 112-0730	DIN 1052 - Blatt 1	TGL 33135/01 ²	DIN 1052-2 ⁴	DIN EN 1995-1-1 ⁵	prEN 1995-1-1
Jahr		1938/1940/1947	1963	1969	1984	1988	2010	2022
a1	nvb	10d	10d	10d (d > 4,2 mm: 12d)	10d	10d (d > 4,2 mm: 12d)	d < 5 mm: (5 + 5 cosα) d d ≥ 5 mm: (5 + 7 cosα) d	d < 5 mm: 10d d ≥ 5 mm: 12d
	vb	-	-	5d	5d	5d	(4 + cosα) d	5d
a2	nvb	5d	3,5d ¹	5d	5d ³	5d	5d	5d
	vb	-	-	5d	3,5d	5d	(3 + sinα) d	4d
a3,c	nvb	5d	7d	7d (d > 4,2 mm: 10d)	7d	7d (d > 4,2 mm: 10d)	10d	10d
	vb	-	-	5d	5d	5d	7d	7d
a4,c	nvb	5d	5d	5d	5d	5d	5d	5d
	vb	-	-	3d	3,5d	3d	3d	3d
a3,t	nvb	12d	15d	15d	15d	15d	(10 + 5 cosα) d	15d
	vb	-	-	10d	10d	10d	(7 + 5 cosα) d	12d
a4,t	nvb	5d	7d	α ≥ 30°: 7d (d > 4,2 mm: 10d) α < 30°: 5d (d > 4,2 mm: 7d)	5d ⁶	α ≥ 30°: 7d (d > 4,2 mm: 10d) α < 30°: 5d (d > 4,2 mm: 7d)	d < 5 mm: (5 + 2 cosα) d d ≥ 5 mm: (5 + 5 cosα) d	d < 5 mm: 7d d ≥ 5 mm: 10d
	vb	-	-	5d	5d	5d	d < 5 mm: (3 + 2 cosα) d d ≥ 5 mm: (3 + 4 cosα) d	d < 5 mm: 5d d ≥ 5 mm: 7d
a1,max		-	-	40d	40d	40d	40d	40d
a2,max		-	-	20d	20d	20d	20d	20d

¹ bei Stabanschluss von 180°: 5d; bei versetzter Anordnung red. auf 3,5d² Abstände für u > 25% (bei Herstellung) um 1,5-fach erhöhen³ 3,5d (wenn um 5d längs versetzt)⁴ Douglasie: vb für d ≥ 3,1 mm⁵ Werte gelten für ρ_k ≤ 420 kg/m³ (≈ Nadelholz)⁶ bei Anschlusswinkel > 15°: 7d

2.2. Tragfähigkeit genagelter Verbindungen

Die ersten analytischen Ansätze zur Berechnung der genagelten Verbindungen bezogen sich auf das biegebeanspruchte Verbindungsmittel, somit zogen die Ingenieure zur Berechnung von Nageltragfähigkeiten anfänglich Parallelen zum Bolzen. Preuß [17] lieferte 1921 dazu eine Berechnungsgrundlage, welche von anderen Forschern übernommen oder weiterentwickelt wurde. Dieser Ansatz basiert auf einem reinen Spannungsnachweis unter Verwendung der Lochleibungsfestigkeit im Holz. Einen umfassenden Überblick über die Entwicklung der analytischen Berechnungsverfahren von Preuß bis zum heute in der DIN EN 1995-1-1:2010 [18] angewandten Verfahren liefert Linzner [19] in Kapitel 5 seiner Dissertation.

In der DIN 1052:1933 [8] erfolgte die Berechnung der zulässigen Belastung eines Nagels mit einer einfachen Formel, in die Werte für Lochleibungsfestigkeit, Holzdicke und Nageldurchmesser einzusetzen waren. Bei dicken Brettern ($a > 40$ mm) betrug die Lochleibungsfestigkeit 50 kg/cm^2 bei dünnen Brettern ($a \leq 40$ mm) 80 kg/cm^2 .

Die Vielzahl an Versuchen, die in den 1930er Jahren durchgeführt wurden, führte dazu, dass mit der Einführung der DIN 1052:1938 [17] Tabellen zur Verfügung standen, aus denen die Tragfähigkeiten ohne weitere Berechnungsschritte abgelesen werden konnten. Dort sind den Holzdicken bestimmte Nagelabmessungen zugeordnet und umgekehrt. Die Entwicklung der zulässigen Belastung einer einschnittigen Nagelverbindung zeigt Abbildung 4. Der Beiwert zur Umrechnung von charakteristischen Werten wurde mit $\alpha=2,18$ angesetzt (siehe [13]).

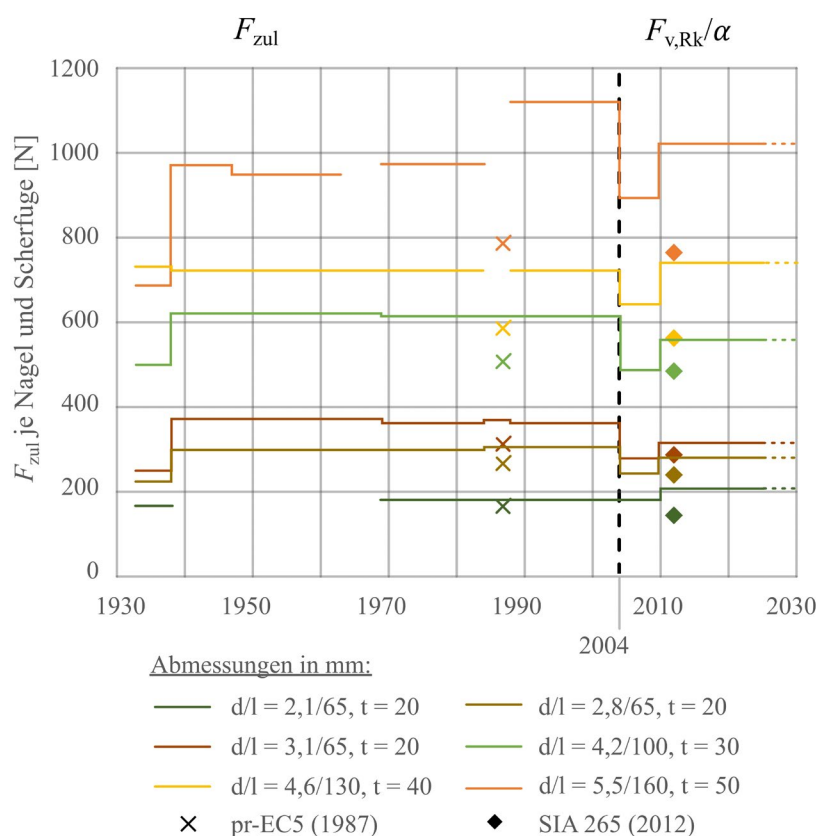


Abbildung 4: Entwicklung der zulässigen Belastung einer einschnittigen Nagelverbindung aus [13]

Die aktuellen Regelungen berücksichtigen neben der Lochleibungsfestigkeit auch plastische Fließgelenke in dem Verbindungsmittel und basieren auf dem oberen Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie.

Mit der Weiterentwicklung der Formulierungen von Johansen beschäftigte sich zuerst Möller [20], und später Meyer [21]. Meyer lieferte einen ersten Ansatz zu einem Phänomen, das früher bereits beobachtet, aber erst durch ihn quantifizierbar wurde: dem sogenannten Seileffekt. Weitere Untersuchungen von Kuipers & de Put [22] führten dann dazu, dass der Seileffekt normativ verankert wurde. Zunächst war in der DIN 1052:2004 [23] eine Erhöhung um den Seileffekt nur bei profilierten Nägeln in Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen oder Stahlblech-Holz-Verbindungen zulässig, ab Einführung der DIN EN 1995-1:2010 [18] durfte der Seileffekt auch bei Holz-Holz-Verbindungen mit glattschaftigen Nägeln berücksichtigt werden.

3. Bewertungsschema für genagelte Verbindungen im Bestand

Die im folgenden vorgestellte Einstufung in verschiedene Kategorien basiert auf dem äußeren Erscheinungsbild der Nagelverbindungen. Aus diesem Grund wurden Kriterien festgelegt, um die Kategorisierung der einzelnen Knoten zu ermöglichen. Diese Kriterien sind in Abbildung 5 dargestellt und beziehen sich auf Seiten- und Unteransichten mit Berücksichtigung der Beanspruchungsrichtung.

Kategorie	Beschreibung		Ansichten		
			Seite	Unten	
				Typ-I	Typ-II
1	➤ Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe und Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm eingehalten ➤ > 90 % der Nägel bündig mit Anschlussholz sonst in Zustand 2 einordnen ➤ Keine Schäden am Holz visuell ersichtlich				
2	➤ Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe oder Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm nicht eingehalten ➤ Keine Schäden am Holz visuell ersichtlich				
3	➤ Kleine Risse $b_{\text{Riss}} < 1 \text{ mm}$ ➤ < 90 % der Nägel bündig mit Anschlussholz ➤ Hinweise auf Feuchtigkeitseintritt vorhanden	Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe und Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm eingehalten			
		Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe oder Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm nicht eingehalten			
4	➤ Risse $b_{\text{Riss}} > 1 \text{ mm}$ ➤ Auf- & Abspaltungen ➤ Feuchtigkeit ➤ Fehlstellen	Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe und Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm eingehalten			
		Vorgaben für Randabstand, Eindringtiefe oder Abstand untereinander nach jeweils geltender Norm nicht eingehalten			

Abbildung 5: Bewertungsschema für Nagelverbindungen im Bestand

Die Kategorie 1 wird erreicht, wenn die Eindringtiefe, der Randabstand und die Abstände untereinander den aktuellen Vorschriften entsprechen. Darüber hinaus müssen mindestens 90% der Nägel bündig mit dem Seitenholz eingeschlagen sein, da andernfalls die Verbindung direkt in Kategorie 2 fällt. In der Regel sollte Kategorie 1 keine sichtbaren Schäden aufweisen. Eine Verbindung wird in Kategorie 2 eingestuft, wenn entweder die Eindringtiefe, der Randabstand oder der Abstand untereinander nicht den geltenden Vorschriften entsprechen. Auch in Kategorie 2 sollten keine sichtbaren Schäden erkennbar sein. Die Kategorie 3 ist in Unterkategorien unterteilt: 3a und 3b. In 3a erfüllt die Verbindung die Anforderungen gemäß den geltenden Vorschriften. Die Verbindung wird als 3b eingestuft, sobald eine dieser Vorschriften aus 3a nicht erfüllt ist. Grundsätzlich wird eine Verbindung in Kategorie 3 eingestuft, wenn sie Risse kleiner als 1 mm aufweist, weniger als 90% der Nägel bündig mit dem Seitenholz eingeschlagen sind oder erste Anzeichen für ein schadhaftes Holz vorhanden sind. Kategorie 4 wird erneut in Unterkategorien unterteilt: 4a und 4b, wobei die Abgrenzung wie bei Kategorie 3 erfolgt. Die Einstufung in Kategorie 4 erfolgt bei allen sichtbaren Mängeln, einschließlich Rissen von mehr als 1 mm Breite, Aufspaltungen und lokalen Feuchtigkeitsschäden. Holzfäule oder Insektenbefall werden als schwerer Schaden eingestuft. Die entsprechenden Bereiche müssen ausgetauscht werden.

Das Schema wurde auf die Anschlüsse von drei Konstruktionstypen angewendet. Alle Anschlüsse stammen von Pultdachträgern. Die Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Anwendung des Bewertungsschemas für zwei Knoten Typ I und Typ II. Bei Typ I waren Pfosten und Diagonalen seitlich aufgenagelt, siehe Abbildung 6a,b. Bei Typ II laufen die Gurte paarweise außen durch, siehe Abbildung 6c.



Abbildung 6: Beispielhafte Anwendung des Bewertungsschemas

4. Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen teilen sich in zwei Phasen auf. In der ersten Phase wurden zur Bestimmung der maßgebenden Parameter, für die Tragfähigkeit einer scherbeanspruchte Holz-Nagel-Verbindung, Nebenversuche durchgeführt. In diesen Nebenversuchen wurden für das Holz die Rohdichte, für die Nägel die Zugfestigkeit und das Fließmoment und für beide Werkstoffe die Lochleibungsfestigkeit und die Auszugfestigkeit bestimmt. In der zweiten Phase wurden Scherversuche an einzelnen Knoten durchgeführt.

4.1. Nebenversuche

Die Prüfmethoden und die Ergebnisse für die Nebenversuche sind in Schwendner et al. [24] ausführlich dokumentiert. Nicht alle Vorgaben der einschlägigen Normen konnten direkt übernommen werden. Um die Zugfestigkeit zu prüfen, mussten die Nagelköpfe abgetrennt werden. Die Einspannlänge nach Norm konnte aufgrund der vorhandenen Nagellänge nicht eingehalten werden. Dies hatte keinen Einfluss auf das Versagensbild der Nägel. Die Ergebnisse der Nebenversuche für Typ I sind in Tabelle 2 aufgelistet. Bei der Auszugfestigkeit streuten die Ergebnisse so stark, dass es nicht möglich war, einen charakteristischen Wert zu bestimmen. Daher wurde der kleinste Versuchswert verwendet.

Tabelle 2: Ergebnisse der Nebenversuche - Bindertyp I

Parameter		Mittelwerte	n [-]	COV [%]	char. Wert
Rohdichte ρ	Gurt	447	15	3,5	403
[kg/m ³]	Streben	473	16	10,9	372
Lochleibungsfestigkeit f_h	Gurt	24,3	16	4,0	22,1
[N/mm ²]	Streben	26,5	16	20,6	21,0
Zugfestigkeit f_u	Nägel $\varnothing = 3,4$ mm	716	10	9,05	581
[N/mm ²]					
Auszugfestigkeit f_{ax}	Nägel $\varnothing = 3,4$ mm	6,57	8	50,2	2,39*
[N/mm ²]					

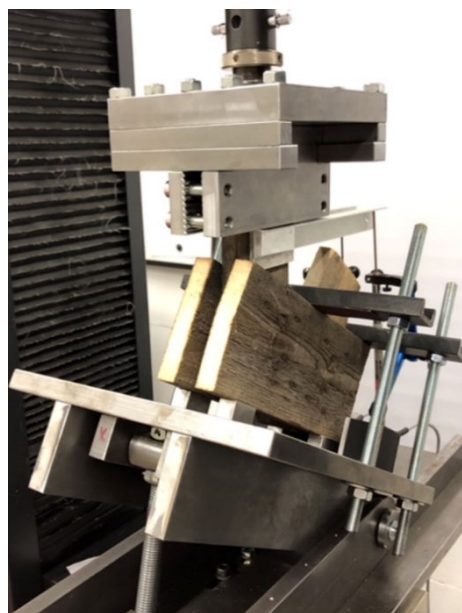
* *kleinster Wert*

4.2. Scherversuche

In der zweiten Phase wurden Scherversuche an den aus den Fachwerkbindern herausgeschnittenen Verbindungen durchgeführt. Hierfür wurde ein spezieller Prüfaufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Verbindung von Pfosten und Streben, separat nacheinander auf Zug bzw. Druck zu überprüfen, siehe Abbildung 7. Der Aufbau wurde so gestaltet, dass die Belastungsrichtung flexibel an die unterschiedliche Neigung der Pfosten und der Streben angepasst werden konnte, und dass in allen Fällen eine Relativverschiebung von mindestens 15 mm aufgebracht werden konnte.



(a)



(b)

Abbildung 7: Versuchsaufbau – Scherversuch: (a) Druckversuch (b) Zugversuch

Die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse der Scherversuche sind in Völlmecke et al. [25] beschrieben. Die Tabelle 3 und die Tabelle 4 zeigen die Ergebnisse des Bewertungsschemas sowie den Vergleich der charakteristischen und der in den Versuchen erreichten Werte der Tragfähigkeiten pro Pfosten und Strebe für die Serien A und B des Bindertyps I.

Tabelle 3: Typ I, Serie AH-PD-ST (ST = Strebe)

Knoten	α [°]	Kategorie	$n_{2,8}$ [-]	$n_{3,4}$ [-]	$F_{v,Rk}$ [kN]	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{v,Rk}$ [-]
A02-ST	27	3	7	8	11,31	24,62	1,4
A04-ST	32	2	9	6	10,96	26,75	1,9
A05-ST	25	2	9	6	10,96	30,09	1,9
A06-ST	37	2	7	6	9,64	27,72	2,2
A08-ST	42	3,5	0	14	11,70	26,33	2,5
A09-ST	35	3	7	6	9,64	20,20	2,0
A10-ST	46	2,5	11	6	12,28	23,90	1,8
A11-ST	39	4	7	7	10,47	22,71	2,7
Mittelwert-A-ST		2,8			10,87	25,29	2,0
B04-ST	32	3	0	13	10,87	30,70	2,6
B06-ST	37	3	0	13	10,87	26,93	2,6
B07-ST	30	2,5	0	12	10,03	21,79	1,9
B08-ST	42	2,5	0	13	10,87	29,10	1,9
B09-ST	35	2,5	0	12	10,03	27,21	1,7
B10-ST	47	4	0	14	11,70	20,09	2,5
B11-ST	39	3	0	12	10,03	22,94	1,8
B12-ST	60	4	0	12	10,03	15,70	1,5
Mittelwert-B-ST		3,1			10,55	24,31	2,1

Tabelle 4: Typ I, Serie AH-PD-PF (PF = Pfosten)

Knoten	α [°]	Kategorie	$n_{2,8}$ [-]	$n_{3,4}$ [-]	$F_{v,Rk}$ [kN]	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{v,Rk}$ [-]
A02-PF	90	4	9	6	10,96	15,64	1,4
A04-PF	90	2,5	9	6	10,96	21,09	1,9
A05-PF	83	3	9	6	10,96	20,94	1,9
A06-PF	90	2	4	11	11,84	25,86	2,2
A08-PF	90	3,5	0	12	10,03	25,56	2,5
A09-PF	83	3	9	6	10,96	21,54	2,0
A10-PF	90	3	11	6	12,28	21,70	1,8
A11-PF	83	3	8	6	10,30	27,48	2,7
Mittelwert-A-PF		3,0			11,03	22,48	2,3
B04-PF	90	2,5	0	12	10,03	26,22	2,6
B06-PF	90	2,5	0	12	10,03	25,77	2,6
B07-PF	83	2,5	0	12	10,03	18,59	1,9
B08-PF	90	2,5	0	12	10,03	19,10	1,9
B09-PF	83	2,5	0	12	10,03	16,77	1,7
B10-PF	90	2,5	0	11	9,20	23,34	2,5
B11-PF	83	3	0	12	10,03	18,43	1,8
B12-PF	90	4	0	11	9,20	13,92	1,5
Mittelwert-B-PF		2,8			9,82	20,27	2,3

5. Überprüfung des Bewertungsschemas

Die Überprüfung des Bewertungsschemas erfolgt in einem ersten Schritt durch einen Vergleich der rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeit mit den in den Versuchen erzielten Tragfähigkeiten.

Die charakteristischen Tragfähigkeiten werden nach den Regelungen des EC5 für eine einschnittige Holz-Holz-Verbindungen berechnet. Maßgebend ist in allen Fällen der Versagensmechanismus d mit Lochleibungsversagen im Seitenholz und einem Fließgelenk im Mittelholz. Es gilt:

$$F_{v,Rk,lat} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] \quad (1)$$

mit

$$M_{y,Rk} = 0.30 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2.6} \quad (2)$$

$$f_{h,k} = 0.082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0.3} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = 1 \quad (4)$$

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (5)$$

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (6)$$

Unter Berücksichtigung des Seileffekts folgt:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_2 \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t_1 + f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\Delta F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.25 \cdot F_{ax,Rk} \\ 0.15 \cdot F_{v,Rk} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$F_{v,Rk} = F_{v,Rk,lat} + \Delta F_{v,Rk} \quad (9)$$

Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 5 dokumentiert. Die berechneten Tragfähigkeit nach EC5 sind in den Tabellen 3 und 4 angegeben.

Tabelle 5: Parameter und Tragfähigkeit pro Nagel – Typ 1

d [mm]	d_h [mm]	t_m [mm]	ρ_k [kg/m ³]	$f_{u,k}$ [N/mm ²]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	$F_{v,Rk,lat}$ [N]	$F_{ax,Rk}$ [N]	$F_{v,Rk}$ [N]
2,8	6	80	350	600	23	42	588	288	660
3,4	7					57	727	475	836

Die grafische Darstellung in Abbildung 8 zeigt sehr anschaulich, dass mit den vier Bewertungskategorien der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad und nachgewiesener Tragfähigkeit gut erfasst wird. Darüber hinaus zeigt sich, dass selbst Knoten, die der Kategorie 4 zugeordnet wurden, noch eine verlässliche Tragfähigkeit aufweisen.

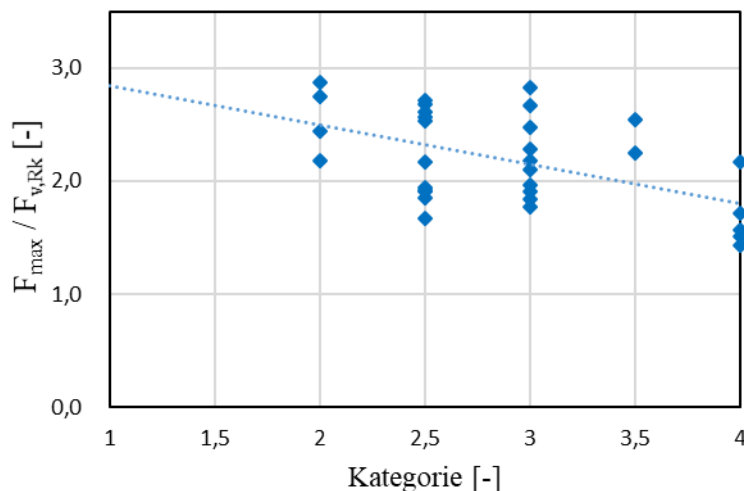


Abbildung 8: Ergebnis Typ I – Tragfähigkeitsfaktor $F_{max}/F_{v,R,k}$ in Abhängigkeit von der Kategorie

6. Ausblick

Die aktuellen und weiterführenden Untersuchungen zielen darauf ab, eine umfassende Sicherheitsbewertung für Holz-Nagel-Verbindungen im Bestand zu ermöglichen. Dazu wird das in diesem Beitrag vorgestellte Bewertungsschema verfeinert und erweitert. So, dass zukünftig der Zustand für jeden einzelnen Nagel erfasst und bewertet wird. Darüber hinaus werden die einzelnen Kriterien hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Tragfähigkeit gewichtet. So sind zum Beispiel Risse besonders kritisch zu betrachten, und die Unterschreitung von Mindestabständen kann gestuft bewertet werden.

Praktisch umsetzbar ist ein solches erweitertes Bewertungsverfahren nur dann, wenn dazu die Möglichkeiten der automatischen Bildauswertung unter Verwendung von KI-Verfahren genutzt werden. Erste Erfahrungen auf diesem Gebiet sind vielversprechend. Ein von der Universität Würzburg für diese Anwendung «trainiertes» Programm ist in der Lage, Nägel und Risse zu erkennen. Derzeit wird dieses Programm durch die Erfassung aller geometrischer Größen ergänzt. In Zukunft sollen Objekte mit einer Drohne, vollständig photogrammetrisch erfasst werden. Anschließend soll die Bewertung jeder Verbindung voll automatisiert erfolgen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Halasz v., R.; Holzbau-Taschenbuch. 6. Aufl., 1963
- [2] Engelmann I.; Schwendner S.; Seim W.; Materialsparende Nagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte von 1930 bis 1990. Bautechnik, 2023
- [3] Gaber E.; Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen. Versuchsanstalt für Holz, Stein und Eisen, 1935
- [4] Gaber E.; Untersuchungen über Nägel und genagelte Bohlenträger. In: Bericht über die Sitzungen der Holztagung, 1933
- [5] Grabbe H.; Die Festigkeit der zweischnittig genagelten Holzverbindungen bei gleicher und ungleicher Holzstärke. Dissertation, Braunschweig, 1935
- [6] Stoy W.; Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmittel. Konstruktion und Ausführung, 1930
- [7] Stoy W.; Tragfähigkeit von Nagelverbindungen im Holzbau. Schweizerische Bauzeitung, 1935
- [8] DIN 1052:1933-07: Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1933
- [9] Vorläufige Bestimmungen für Holztragwerke. Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft, Berlin: Ernst & Sohn, 1926
- [10] Vorläufige Bestimmungen für Holztragwerke. (DRG:1926-12, 3. berichtigte Ausgabe). Berlin: Ernst & Sohn, 1931
- [11] Rug W.; 100 Jahre Holzbau- und Holzbauforschung. Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ), 2003
- [12] Fischer J.; Schwendner S.; Seim W.; Engelmann I.; Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – Die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln. Bautechnik, 2023
- [13] Schwendner S.; Fischer J.; Seim W.; Engelmann I.; Nägel im Holzbau – die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens. Bautechnik, 2023
- [14] DIN 1052:1938-05: Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1938
- [15] Fonrobert, F.; Regeln und Erläuterungen für die Verwendung von Nägeln bei Nagelverbindungen im Holzbau nach DIN 1052:1938. Fachausschuß für Holzfragen, 1940
- [16] Egner K.; Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit von Nagelverbindungen mit dicken Drahtstiften. Deutscher Zimmermeister, 1951
- [17] Preuß M.; Eiserne Bolzen im Holzbau. Der Holzbau, 1921

- [18] DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. 2010
- [19] Linzner P.; Neue Aspekte zum Trag- und Verformungsverhalten von Nägeln in Hirn- und Seitenholz. Dissertation, Bochum, 1993
- [20] Möller T.; En ny metod för beräkning av spikförband. 1950
- [21] Meyer A.; Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. Holz als Roh- und Werkstoff, 1957
- [22] Kuipers J.; van der Put T.; Betrachtung zum Bruchmechanismus von Nagelverbindungen. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, 1982
- [23] DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken: Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2004
- [24] Schwendner S.; Völlmecke L.; Ho P.; Fischer J.; Seim W.; Testing of connections taken from old nailed roof trusses. WCTE Oslo, 2023
- [25] Völlmecke L.; Schwendner S.; Ho P.; Fischer J.; Seim W.; Assessment of nailed connections in existing structures. WCTE Oslo; 2023

In den Abschnitten 1 und 2 dieses Beitrags wird teilweise auf Texte aus den Veröffentlichungen von Engelmann et al. [2], Fischer et al. [12] und Schwendner et al. [13] zurückgegriffen. Auf eine Kennzeichnung einzelner Zitate wurde im Sinne einer besseren Lesbarkeit verzichtet.