



- Materialsparende Nagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte
- Nägel im Holzbau – Trag- und Verformungsverhalten
- Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – Konstruktionsregeln
- Ingenieurskunst im Experiment: Die Multihalle Mannheim



Bautechnik Inhalt Sonderheft

Zum Titelbild: Brettspertholz – Neue Horizonte in der Fertigungstiefe

Die Künstlerstadt Gmünd in Kärnten/Österreich setzte auf Initiative der HASSLACHER Gruppe mit dem architektonisch innovativen und spektakulären Holzfaltatelier für Bildhauer dem Gründungsvater der Kulturinitiative Gmünd, Heinz Miklautz, ein wunderbares Andenken im öffentlichen Raum.
(Foto: Albert Wilts)

HOLZBAU

AUFSÄTZE

- 53 Iris Engelmann, Sascha Schwendner, Werner Seim
Materialsparende Nagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte von 1930 bis 1990
- 64 Sascha Schwendner, Jens Fischer, Werner Seim, Iris Engelmann
Nägeln im Holzbau – Die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens
- 73 Jens Fischer, Sascha Schwendner, Werner Seim, Iris Engelmann
Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – Die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln

BERICHT

- 85 Jochen Stahl, Christian Rosenkranz
Ingenieurskunst im Experiment: Die Multihalle Mannheim

93 BAUTECHNIK aktuell 95 VERANSTALTUNGSKALENDER

Produkte & Objekte

- A4 Holzbau

November 2023, Sonderheft Holzbau – Ausgabe 2
ISSN 0932-8351 (print)
ISSN 1437-0999 (online)

Peer-reviewed journal

Die Bautechnik ist im Journal Citation Report von Clarivate Analytics (vormals Thomson Reuters) sowie bei Scopus von Elsevier gelistet.

Impact Factor 2022: 0,7
CiteScore 2022: 1,1

Wiley Online Library

<http://wileyonlinelibrary.com/journal/bate>

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

www.ernst-und-sohn.de/bautechnik

Materialsparende Nagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte von 1930 bis 1990

Materialsparende Holzkonstruktionen, die insbesondere während der Kriegs- und Nachkriegszeit im 20. Jahrhundert entwickelt und optimiert wurden, erlangen aktuell aus konstruktionshistorischer, aber auch aus ökonomischer Sicht erneut Interesse. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick angefangen von den ersten Konstruktionen Ende der 1920er-Jahre bis hin zu Typenbindern der DDR, die noch bis 1990 über Landwirtschaftsbauten errichtet wurden und heute oft als Tragkonstruktionen für Photovoltaikanlagen weiterverwendet werden. Der Fokus liegt auf der chronologischen Vorstellung ausgewählter Konstruktionsweisen für Hallen- und Hausdächer, unterschieden nach Fachwerk- und Vollwandbindern. Sowohl die verantwortlichen Ingenieure und deren Herkunft als auch wesentliche Anwendungsfelder und Beispielbauten kommen in der Überblicksdarstellung zur Sprache. Eine wesentliche Erkenntnis ist die im Betrachtungszeitraum 1930–1990 zu verzeichnende Reduzierung einer Vielzahl genagelter Spar- hin zu Typenkonstruktionen, die hauptsächlich äußerst materialeffiziente Fachwerkbinder für Satteldächer hervorbrachte.

Stichworte Nagelbrettbinder; Kantholzbinder; Vollwandbinder; Fachwerkbinder; Sparkonstruktionen; BRD; DDR; Typenkonstruktionen

1 Einführung – Grundlagen – Anfänge

Mit der Erforschung der Nagelverbindungen seit Ende der 1920er-Jahre und der Aufnahme der Ergebnisse in die Regelwerke [1,2] setzte ein Boom an Neuerfindungen von Sparkonstruktionen für Hausdächer ein. Gleichzeitig versuchten Ingenieure auch im Hallenbau, die bis dahin üblichen ingenieurmäßigen Verbindungsmittel wie Dübel und Bolzen durch den leicht erhältlichen Nagel zu ersetzen.

Ausgehend von äußeren Sparzwängen durch die Kriegswirtschaft wurden sparsame Ingenieurholzkonstruktionen seit dem Ersten Weltkrieg besonders gefordert und nachgefragt. Dem Nagel kam dabei eine besondere Rolle zu, denn allein durch die Wahl des Verbindungsmittels konnten dünnere Holzquerschnitte gewählt werden. Zudem ermöglichte die Nagelbauweise, kürzere und schmalere Hölzer, zum Teil auch in geringerer Qualität zu verbauen, wodurch besondere Anforderungen an Stammlängen und -querschnitte reduziert wurden. Während für das Einbringen von Dübeln und Bolzen mehrere Arbeitsschritte erfahrener Handwerker notwendig waren, konnten Nagelverbindungen, insbesondere mit einer Nagel-schablone, auch von ungelernten Handwerkern in kurzer Zeit hergestellt werden. Wiederholt berichten die zeitgenössischen Publikationen von diesen Vorteilen der Nagelbauweise, insbesondere von den kurzen Aufstellzeiten. So vergingen bspw. bei

Material-saving nail trusses – aspects of construction history from 1930 to 1990

Material-saving wooden constructions, which were developed and optimized in particular during the war and post-war period in the 20th century, are currently attracting renewed interest from the point of view of construction history, but also from an economic point of view. The article gives an overview starting with the first constructions at the end of the 1920s up to the type trusses of the GDR, which were built over agricultural buildings until 1990 and are often used today as supporting structures for photovoltaic systems and are therefore experiencing a renaissance. The focus of the article is on the chronological presentation of selected construction methods for hall and house roofs, differentiated between timbered and solid wall trusses. Both the responsible engineers and their origin, as well as essential fields of application and example buildings are discussed in the overview. A significant finding is the reduction in the period from 1930 to 1990 from a large number of nailed savings to type constructions, which essentially produced extremely material-efficient timber trusses for gable roofs.

Keywords nailed trusses; square timber truss; solid wall binder; timber trusses; saving constructions; FRG; GDR; type constructions

der Errichtung der Olympia-Festhalle in Garmisch-Partenkirchen 1936 nur 8 d vom Aufstellen des ersten Binders bis zur Übergabe der fertigen Halle [3,4]. Dies war nicht nur möglich aufgrund der 80–100 Zimmerleute, die in drei Schichten arbeiteten, sondern auch deshalb, weil die genagelten Verbindungen schnell und einfach auszuführen waren.

Genagelte Brettbinder und deren Konstruktionsarten sowie einige Protagonisten dieser Bauweise waren bereits Teilaspekte einiger Publikationen zum Ingenieurholzbau im 20. Jahrhundert [5–9]. Während dabei jedoch Nagelbinder nur als eine mögliche Sparkonstruktion neben anderen thematisiert werden bzw. nur auf bestimmte Zeitabschnitte, wie DDR-Konstruktionen, eingegangen wird, versucht dieser Aufsatz eine Chronologie allein für die Nagelkonstruktionen abzubilden. Dies ermöglicht einen vertiefenden Einblick in die Konstruktionsgeschichte und somit einen strukturierten Überblick über die Konstruktionsweisen im Hallen- und Hausbau von 1930 bis 1990.

1.1 Wilhelm Stoy – Pionier auf dem Gebiet der Nagelverbindungen

Bei der konstruktionshistorischen Erforschung genagelter Verbindungen ist Wilhelm Stoy als einer der wesentlichen

Protagonisten zu erwähnen. Er hatte sich in seiner Promotion 1926 bereits mit Lehrgerüsten in Deutschland, aber auch in Frankreich beschäftigt und ist vermutlich bereits in diesem Zusammenhang auf die Leistungsfähigkeit der Nagelverbindungen gestoßen [10]. Die von ihm zitierten französischen Beispiele genagelter Lehrgerüste für die Brücken über den Elorn, Bauzeit 1926–1930, und die Pont Caquot über den Fluss Les Ussets, Bauzeit 1924–1928, wurden in der Fachpresse ausführlich publiziert [11, 12]. Er kritisierte in seiner Promotion die von ihm in Deutschland untersuchten Lehrgerüste aufgrund der enormen Verschwendung an Baumaterial – hier insbesondere Holz [10]. Mit Blick auf die Bautätigkeiten im Ausland und die seit den Kriegsjahren in Deutschland verstärkten Bestrebungen Holz zu sparen, wuchs vermutlich sein Ansporn, für die Nagelverbindung in Deutschland eine baupolizeiliche Genehmigung zu erwirken und diese in die allgemeingültigen Regelwerke aufzunehmen. Ein erster Auftrag zu einem Nagelbrettbinder in Adorf 1928 war der Auslöser für zahlreiche Versuche [2] und im Ergebnis für die Aufnahme der Erkenntnisse aus diesen Forschungen in die Normung (Bild 1).

1.2 Die Normung der Nagelverbindungen in der DIN 1052

In der DIN 1052:1933 [13] wurden Nagelverbindungen erstmals geregelt und bis heute sukzessive angepasst, um wiederholt die neuesten Forschungsergebnisse für die Praxis zur Verfügung zu stellen. Grundlegend sind hierbei zwei Aspekte zu betrachten, die normativ geregelt werden müssen. Dies ist zum einen die Tragfähigkeit der einzelnen Nägel in den Verbindungen und zum anderen die konstruktive Ausbildung der Verbindungen.

Schnell war den Ingenieurinnen und Ingenieuren bewusst, dass bei Anschlüssen mit Nägeln die Konstruktion eine entscheidende Rolle spielt, um die vollständige Tragfähigkeit der Verbindung zu erreichen. Dabei sind neben Mindestholzdicken auch ausreichende Abstände der Nägel untereinander und zum Rand erforderlich, um Risse in den Holzbauteilen zu vermeiden und die volle Tragfähigkeit jedes einzelnen Verbindungs-



Bild 1 Adorf, Turn- und Festhalle auf dem Dansenberg, Entwurf W. Stoy, Bj. 1928, Foto: 1978 während des Abrisses (Quelle: Privatarchiv E. Brüne, Rhoden/Fotograf: Ostermann, Adorf)
Adorf, festival hall at Dansenberg, project W. Stoy, constr. year 1928, photo: 1978 while demolition

ungsmittels zu erreichen. In Lastrichtung sind deutlich größere Abstände als zu einem unbelasteten Rand einzuhalten. Zudem spielt die Anisotropie des Holzes eine entscheidende Rolle: in Faserrichtung ist ein Aufspalten des Holzes kritischer als quer zur Faserrichtung. Die Konstruktionsregeln von Verbindungen mit Nägeln haben sich in der Entwicklung der Normung von 1933 bis heute nur unwesentlich verändert, da sich diese schon früh bewährten [1]. Für neue Verbindungsmittel wie Schrauben erfolgen sukzessive Ergänzungen zu den bestehenden Regelungen.

Verbindungen mit Nägeln im Holzbau sind seit ca. 100 Jahren normativ geregelt. Zuvor war es nicht zulässig, Nägel für primär tragende Zwecke in Holztragwerken einzusetzen. Die in den 1930er-Jahren durchgeführten experimentellen Untersuchungen an Nagelverbindungen waren lange Zeit Bestandteil der deutschen Normung und wurden erst 2004 durch mechanische Modelle ersetzt. Dadurch kann die Tragfähigkeit von Nägeln in individuellen Verbindungen auch mit neuen Holzwerkstoffen berechnet werden, wobei bis heute nicht alle Phänomene innerhalb von Nagelverbindungen vollständig erforscht worden sind. Eine übersichtliche Darstellung der Entwicklung der Bemessungsregeln findet sich bei Schwendner et al. [2].

2 Hallendächer 1930–1950

Auf Grundlage der normierten Nagelverbindung und mit dem über Jahrzehnte anhaltenden Ziel Holzkonstruktionen materialsparend zu errichten, kamen mit den 1930er-Jahren zahlreiche genagelte Konstruktionsweisen auf, die im Folgenden beleuchtet werden. Zu unterscheiden sind freitragende Binder für Hallen unterschiedlichster Nutzung einerseits und Dachstühle für den Hausbau andererseits.

2.1 Fachwerkbinder im Hallenbau 1930–1950

Für den Hallenbau in Fachwerkbauweise waren lt. Stoy und Felix Fonrobert [14] Ende der 1930er-Jahre Dreiecks-, Mansard-, Pultdach- und Parabelbinder möglich. Mit der Normierung im Industriehallenbau kamen ab 1940 zusätzliche Dachformen hinzu, die Stoy/Fonrobert als Dreiecksbinder mit angehobener Traufe beschrieben [4, 15]. Zudem ergänzten Stoy/Fonrobert ab 1941 den Parallelträger und den Sägedachbinder als Sonderform des Dreiecksbinders; die Spannweiten variierten zwischen 8 und 32 m für einen Mansardbinder. Diese unterschiedlichen Binderformen konnten als Brettbinder, bei denen für die Gurte, Pfosten und Streben ausschließlich Bretter verwendet wurden, oder als Kantholzbinder, bei denen Ober- und Untergurte aus Kanthölzern und nur die Streben aus Brettern bestanden, ausgeführt werden.

2.1.1 Brettbinder

Den ersten Nagelbrettbinder in Deutschland entwarf Stoy 1928 für eine Turn- und Festhalle in Adorf (Hessen) mit 16 m Spannweite als Mansardbinder (Bild 1). Neben Parabelbindern

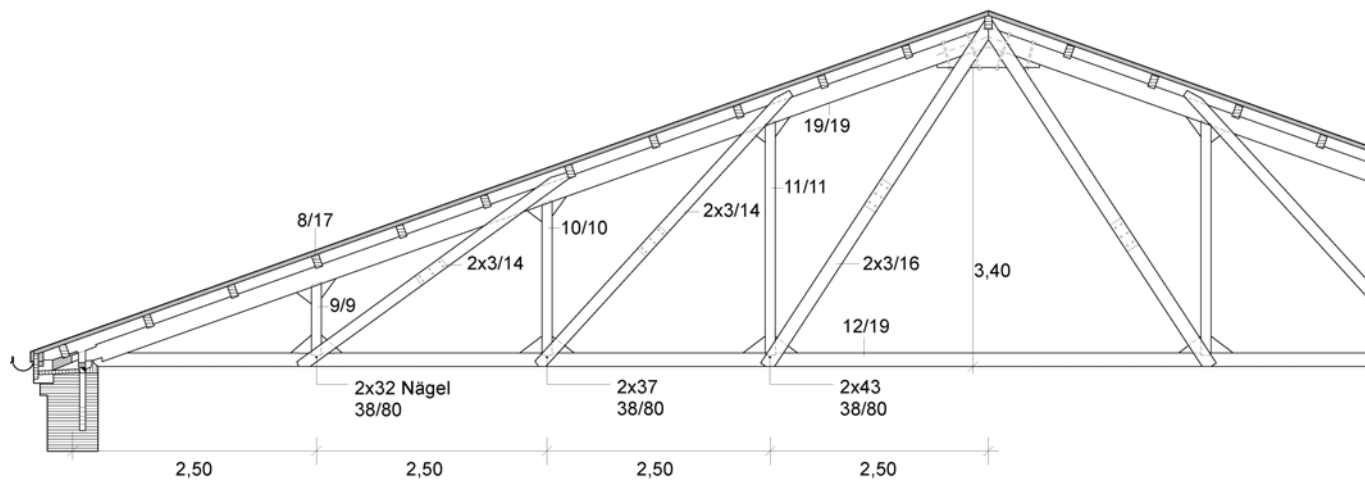


Bild 2 Kantholzbinder mit 20m Spannweite, Frühjahrsmesse in Leipzig 1933, Stand der Arbeitsgemeinschaft Holz, Entwurf E. Seidel (nach [16], Abb. 19)
Timber beam truss of 20m span, Spring Building Fair Leipzig 1933, Stand Arbeitsgemeinschaft Holz, design E. Seidel (acc. to [16], Fig. 19)

mit 19,50m Spannweite für die Weser-Sparrholzwerke in Holzminden [16] und einem Sägedach für eine Markthalle 1932 von Ernst Gaber, Karlsruhe [17], lassen sich jedoch in den zeitgenössischen Publikationen keine weiteren Dachbinderformen für ausgesprochene Fachwerk-Brettbinder finden. Zudem wiederholen sich die beispielhaft publizierten Objekte über die Jahre hinweg, ohne dass Neues hinzukommt. Dies lag vielleicht an dem von Erich Seidel aufgestellten wirtschaftlichen Vergleich zwischen Brett- und Kantholzbindern. Er vertrat seit der 1. Auflage des „Holz-Nagelbaus“ die These, dass genagelte Brettbinder aufgrund des höheren Arbeitsaufwands teurer seien als genagelte Kantholzbinder [16].

2.1.2 Kantholzbinder

Erich Seidel, Bauingenieur aus Leipzig, stellte 1933 auf der Leipziger Frühjahrsmesse einen ersten Kantholzbinder für den Stand der Arbeitsgemeinschaft Holz als Ausstellungstück in Form eines Dreiecksbinders vor [16]. Bei 20m Spannweite maßen der Obergurt 19/19cm, der Untergurt 12/19cm und die angenagelten Schräghölzer 3/14 und 3/16cm [16] (Bild 2). Seidel resümiert 1943, dass er zusammen mit Stoy 1933 die Möglichkeit gehabt hätte, die Nagelverbindung zumindest für Kantholzbinder gesetzlich schützen zu lassen [18]. Die bewusste Entscheidung dagegen ermöglichte jedoch die zügige Einführung der Holz-nagelbauweise in den deutschen Holzbau.

Kantholzbinder mit Bretterstreben, die Seidel ebenfalls 1933 für eine Lagerhalle einer Buntweberei in Seiffhennersdorf entwarf, sind heute noch erhalten [19]. Martin Tasche vermutet, dass diese Mansardbinder mit rd. 16m Spannweite die wohl noch ältesten existierenden in Deutschland sind [8]. Zugleich bleibt die Form als Mansardbinder unter den Kantholzbindern singulär. Dreiecksbinder mit und ohne angehobener Traufe bilden die Mehrzahl der publizierten Kantholzbinder in zeitgenössischen Fachartikeln. Die Dreiecksbinder der im „Holz-Nagelbau“ beschriebenen Beispiele erreichen Spannweiten bis zu 23,00m. Typischerweise müssen dann die Streben in den am höchsten beanspruchten Bereichen mehrteilig ausgeführt wer-

den, damit die Nägel regelkonform untergebracht werden können [4].

2.2 Vollwandbinder im Hallenbau 1930–1950

Um Holz zu sparen, war man bestrebt, aus schwachen Holzquerschnitten tragfähige Elemente zusammensetzen. Eine Möglichkeit war das Nachbilden der aus dem Stahlbau bekannten Doppel-T-Querschnitte bzw. Kastenprofilen. Für geringere Spannweiten, die v. a. für Wohn- und Geschäftshäuser üblich waren, konnten diese Profile aus Kanthölzern und Leisten zusammengesetzt werden (Abschn. 3 – Hausdächer). Für größere Spannweiten, bei denen die Höhe der Querschnitte unwirtschaftliche Brettbreiten verursacht hätte, war das Zusammennageln von Vollwandbindern aus schrägen Brettern auf Kanthölzern als Hohlprofil, als Doppel-T-Profil mit Gurtflanschen oder als Doppel-T-Hohlprofil mit innenliegenden Kanthölzern und außen aufliegenden Gurtflanschen eine wirtschaftlichere Alternative. Die Vielzahl an konstruktiven Möglichkeiten für die Balken- bzw. Trägerquerschnitte zeigt Bild 3. Gegenüber Fachwerkbindern ermöglichten Vollwandbinder

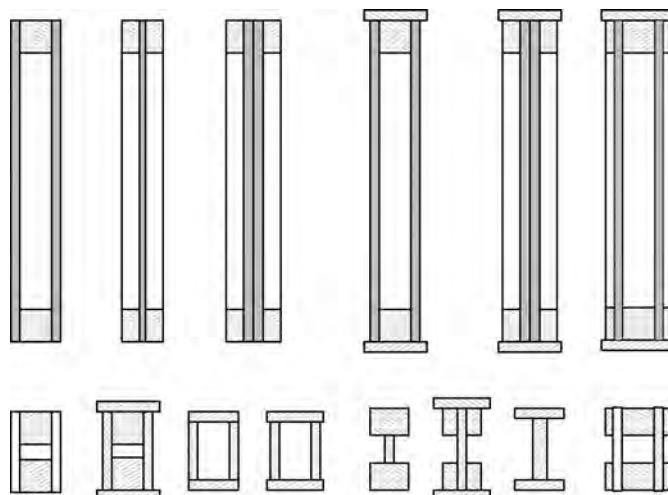


Bild 3 Querschnittsformen vollwandiger Träger und Balken (nach [15], Abb. 8)
Cross section types solid-walled beams (acc. to [15], Fig. 8)

ein einfacheres Unterbringen der erforderlichen Nägel bei größeren Spannweiten, der Holzbedarf war jedoch gegenüber den Fachwerkbindern höher. Dabei wäre jedoch zu berücksichtigen, dass in Vollwandbindern auch Holz geringerer Güte verbaut werden konnte. Der mengenmäßige Mehrbedarf wandelt sich daher lt. Stoy/Fonrobert [15] in einen gütemäßigen Minderbedarf. Vorteilhaft war zudem ausgehend von der Binderhöhe bei Fachwerkbindern die um ein Drittel bis um die Hälfte verringerte Binderhöhe bei Vollwandträgern. Außerdem war mit weniger Durchbiegung zu rechnen, die durch das Quellen und Schwinden sowie die Ungenauigkeit der handwerklichen Arbeit auftreten würde. Schlussendlich ergab der Vollwandträger ein ruhigeres Aussehen gegenüber dem unruhig wirkenden Fachwerkträger mit der Vielzahl an Diagonalen und Pfosten [15].

Erste Versuche zu Vollwandbindern fanden in der Versuchsanstalt Holz, Stein und Eisen an der Technischen Hochschule in Karlsruhe durch Ernst Gaber ab 1935 statt. Das Heereswaffenamt hatte ihn beauftragt, genagelte Vollwandträger auf ihre Brauchbarkeit für den Kriegsbrückenbau zu untersuchen [20]. Er kam u. a. zu dem Ergebnis, dass sich Nagelverbindungen eher für Bretter und Bohlen, weniger für Kanthölzer eignen, weil bei größeren Holzquerschnitten entsprechend dickere Nägel notwendig werden, die zu einer erhöhten Spaltgefahr des Holzes führen und sich zudem schwerer einschlagen lassen. Gaber berichtete aus seinen Versuchen zusammenfassend, dass mit 15–20 m etwa die Grenze erreicht wird, bei welcher sich frei aufliegende Träger mit schweren Lasten als vollwandige Doppel-T-Träger aus Brettern und Bohlen zweckmäßigerweise bilden lassen. Bei größeren Stützweiten würde die Trägerhöhe vergrößert werden und der vollwandige Steg in einzelne Wandstäbe aufzulösen sein [21].

2.2.1 Genagelte T- und Doppel-T-Träger

Bevor Stoy und seine Weggefährten Fonrobert und Seidel ab 1941 ausgeführte Vollwandträger in Deutschland präsentieren konnten, verwiesen sie noch auf die Binder nach sowjetischer Norm mit sowohl T- als auch Doppel-T-Trägern aus Brettern mit Spannweiten bis 17 m. Die ersten, 1943 publizierten Vollwandbinder mit einem Doppel-T-Profil, jedoch als Hohlprofil entwarf Fonrobert mit rd. 12 m Spannweite bei einem Binderabstand von 4,10 m bzw. 5 m [4].

2.2.2 Genagelte Hohlkastenträger

Erste Versuchsanordnungen mit 10 m spannenden Parallelträgern für den Brückenbau als genagelten Hohlkasten wurden 1935 von Stoy gebaut und wie oben erwähnt von Ernst Gaber tiefgehend erforscht [18,20]. In der zweiten Hälfte der 1930er-Jahre häuften sich ausgeführte Beispiele im Hallenbau, so wurde in Flensburg von der Fa. Seidel, Leipzig, eine 12 m weit spannende Halle mit Vollwandbindern errichtet [15]. Zudem sind von Stoy zwei ähnliche Hallen mit 21 m bzw. 24 m Spannweite, die als Dreigelenkrahmen entworfen wurden, bekannt (Reithalle in Bernburg a. d. Saale [3,22] und eine Sägewerkshalle [4]). Zur Berechnung der Binder führte Stoy ein Er-

satzfachwerk ein, dessen Schrägen als sich berührende breite Bretterschrägen angeordnet waren [4].

Otto Bartning entwarf in den Nachkriegsjahren Notkirchen, deren Innenraum wesentlich durch die 11,50 m spannenden Vollwandbinder geprägt war. Statt unruhig wirkende Fachwerkbinder verwendete er Kantholzbinder, die mit aufgenagelten, gegenläufig schräg verlaufenden Brettern einen kastenförmigen Hohlquerschnitt bildeten. 41 der 43 zwischen 1948 und 1951 errichteten Kirchen sind heute noch erhalten und haben nichts von ihrer erhabenen Ausstrahlung – beeinflusst durch die abgeflamte und dadurch dunkel erscheinende Holzkonstruktion – verloren (Bild 4).

Während für die freitragenden Hallenbinder kein Patentschutz für bestimmte Konstruktionssysteme angemeldet wurde, unterlagen die Verbindungsmittel selbst, wie Dübel, Bolzen oder Stahlstifte bzw. Krallenplatten, einem Patentschutz. Der Nagel war hingegen immer frei verfügbar und nicht patentrechtlich geschützt. Für Spannweiten bis etwa 20 m wurden Nagelverbindungen als besonders stahl- und holzsparend bevorzugt. Bei größeren Spannweiten zeigten sich wiederum Dübelverbindungen vorteilhafter, da sie weniger Anschlussfläche benötigten und auch größere Holzquerschnitte zuließen [23].



Bild 4 Dresden-Löbtau, Friedenskirche, Bj. 1949, Dreigelenk-Vollwandbinder, Foto 2021 (Quelle: Iris Engelmann/VG Bild)
Dresden-Löbtau, Friedenskirche, constr. year 1949, three-hinged frame, solid-walled trusses

Im Hausbau mit Spannweiten bis max. 16 m spielten hingegen Dübel besonderer Bauweise weniger eine Rolle, stattdessen Nagel- und Leimverbindungen. Anders als beim Hallenbau unterlagen jedoch bestimmte Bauweisen der Binder einem Patent- oder Gebrauchsmusterschutz, wie die Ausführungen im folgenden Abschnitt aufzeigen.

3 Hausdächer 1930–1950

Bis zu einer Spannweite von 9 m ist das stützenlose Kehlbal-kendach in traditionell zimmermannsmäßigem Abbund bereits äußerst wirtschaftlich. Bei einer einseitigen Belastung durch Schnee- und Windlasten ergeben sich jedoch bei größeren Spannweiten unwirtschaftliche Holzquerschnitte, weshalb in den Jahren ab 1935 bei der Entwicklung von Sparkonstruktionen für Hausdächer als Sparren- und Kehlbalkendächer der Fokus auf Stützweiten ab 9 m lag. Nach der Art der Tragelemente lassen sie sich wie bei den Hallendächern in Vollwand- und Fachwerkbinder unterteilen (Bild 5).

3.1 Vollwandbinder im Hausbau 1930–1950

Vollwandbinder können aus stehenden Bohlen, aber auch aus zusammengesetzten Profilen bestehen, die bei geringer Binder- bzw. Balkenhöhe aus Bohlen in Kastenform oder auch Doppel-T-Form zusammengesetzt werden. Bei größeren Spannweiten mit größeren notwendigen Binderhöhen werden die Gurte der Vollwandbinder aus Kanthölzern oder Brettern gebildet, die Stege bilden gegenläufig vernagelte Brettscharen (Abschn. 2.2).

Vertreter der ersten Gruppe mit geringer Spannweite sind u. a. der Gagfah- und der Vollmar-Binder, die auch für Hausbreiten unter 9 m eingesetzt werden konnten [24, 25]. Beiden gemeinsam ist die Verwendung von stehenden Bohlen für die Sparren, die durch Beihölzer verbunden bzw. ausgesteift wurden. Der Gagfah-Binder (auch Gagfah-Normalbinder) vermied jegliche Querschnittsschwächung der Hölzer durch Zapfung. Stattdessen wurden die Holzverbindungen stumpf gestoßen und durch beidseitig aufgenagelte Brettlaschen gesichert. Der durch die Gemeinnützige Aktien-Gesellschaft für Angestellten-Heimstätten (Gagfah) entwickelte und 1935 in der Materialprüfanstalt Stuttgart getestete Binder wurde vorrangig für Wohnhäuser verwendet [24].

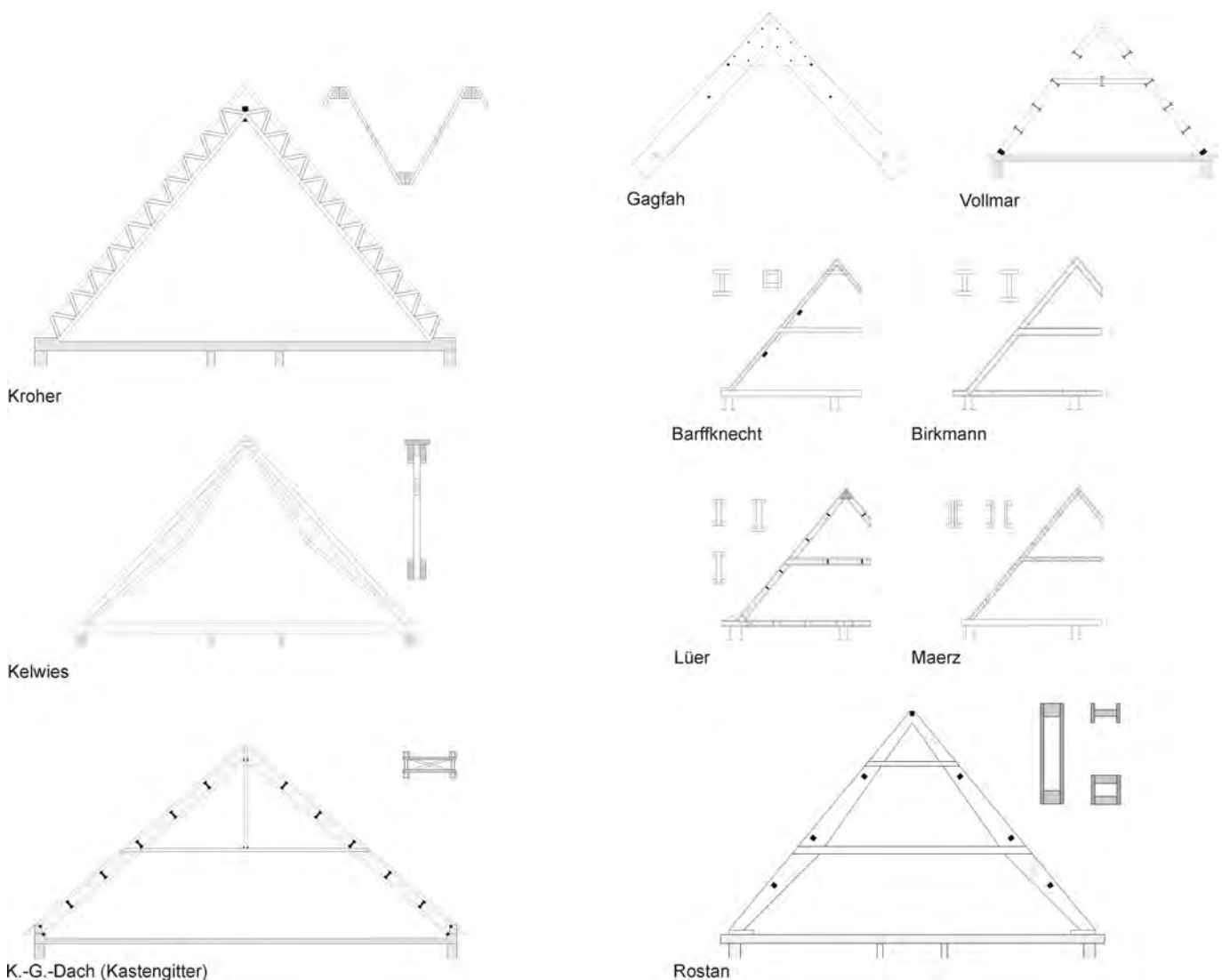


Bild 5 Typologie der Nagelbinder für Hausdächer als Fachwerk- und Vollwandbinder
Typology of nailed roof trusses for houses as timber frame and solid wall trusses

Der Vollmar-Binder weist unterschiedliche Varianten auf, so wurden 1938 das Bohlen-Lamellen-Dach [26] und 1940 der Vollmar-Bohlen-Sparbinder [27] vorgestellt und gleichzeitig zum Gebrauchsmuster angemeldet. Die Grundidee des aus Köln-Mühlheim stammenden Architekten Hans Vollmar war es, das Ausknicken der Bohlensparren (4/14–4/24 cm) durch einen fest mit den Sparren verbundenen Querverband zu verhindern. Er verspannte die Sparren durch ober- und unterhalb aufgenagelte Latten 2,4/7 cm, durch die er beiderseits der Bohlen Lattenstücke steckte, die durch Keile mit den Sparren verspannt waren [25].

Die Bauweisen Barffknecht, Maerz, Lüer und Birkmann vermieden den Einsatz größerer Kantholzquerschnitte, indem sie statt Vollholzquerschnitten mehrteilig zusammengesetzte Querschnitte in Form von Doppel-T-Profilen oder als Kastenform vorschlugen. Die Profile für Sparren- und Kehlbalckenquerschnitte wurden aus Brettern, Latten oder Holzwerkstoffelementen zusammengesetzt, wobei Nagel- und Leimverbindungen Anwendung fanden.

Vermutlich das einzige Pfettendach in einer holzsparenden Bauweise aus Brettern und Nägeln entwickelte Louis Rostan aus Friedrichshafen am Bodensee [28]. 1939 wurde diese Konstruktionsweise bestehend aus genagelten Hohlprofilen auf drei Baustellen realisiert und 1940 publizierte die Bauwelt Konstruktionsdetails [29], gleichzeitig wurde das System zum Patent und Gebrauchsmuster angemeldet. Das Dach bestand aus genagelten Vollwandbindern, Bohlensparren und -pfetten. Die Brettbinder wurden durch zwei Kanthölzer (10/12 cm) für Ober- und Untergurt und eine aufgenagelte, 20 mm starke Schalung in wechselnden Richtungen gefügt. Durch den Steg der Binder wurden die Pfetten derart durchgesteckt, dass die Binder- und Sparrenoberkanten der Leergespärre in einer Ebene lagen.

Statt einem Hohlprofil verwendete die Bauweise nach dem Kassler Ingenieur Franz Trysna genagelte Doppel-T-Profile, die bspw. bei einer Spannweite von 15,50 m eine Höhe von 40 cm bei 35° Dachneigung und 50 cm bei 50° Dachneigung aufwiesen [25]. Nachteilig war das Aufnageln der dickeren Gurthölzer auf die dünneren Stegbretter, da durch die Verwendung dickerer Nägel die Gefahr des Aufspaltens der Stegbretter bestand [25].

3.2 Fachwerkbinder im Hausbau 1930–1950

Für größere Spannweiten wurden auch im Hausbau Fachwerkbinder wirtschaftlich. Während der Kelwies-Binder eine ebene Fachwerkkonstruktion darstellt, bilden das Kroher- und das Kastengitterdach durch die Kombination zweier ebener Fachwerkträger räumliche Gitterträger aus.

Der Kelwies-Sparbinder wurde 1939 von Josef Keldenich, aus Düren im Rheinland, und Carl Wiesner entworfen [30–32], die jedoch kein Patent für ihre Erfindung anmeldeten. Er bestand aus zwei Sparren, die jeweils aus Dreiecksfachwerkträgern gebildet wurden. Die Obergurte spannten zwischen Auflager und First und wurden durch die dreieckige Fachwerkkon-

struktion unterspannt. Ober- und Untergurt waren zweiteilig, alle Füllstäbe einteilig. Mit dem Gedanken der Materialeinsparung sollte sich die Trägerform dem Momentenverlauf innerhalb der Sparren anpassen, weshalb die größte Trägerhöhe in der Mitte der Träger – wo das größte Moment wirkt – nötig war. Zusammen mit einem Deckenbalken oder einer Stahlbetondecke entstand ein Dreigelenkbinder. Die genagelten Brettbinder standen im Dach in einem Abstand von 1 m einer neben dem anderen [25].

Das Kastengitterdach, auch K.-G.-Dach genannt, wurde im gleichen Jahr, 1939, in Kassel von Erich Eisfeld, Ingenieur, und Egon Bode, Zimmermann, entworfen und eingeführt [33]. Deren wesentliche Idee war es, genagelte Brettbinder mit etwa 500 mm Höhe und nur 70 mm Breite durch Ausstrebungen zu einem Kasten zu vereinigen, wobei die Oberseite des Kastens durch die Dachhaut selbst gebildet wurde. Zwischen zwei solcher Kästen verblieb ein strebenloses Feld, das sich für jegliche Art von Ausbau wie Schornsteinführung oder Dachfenster eignete. Ober- und Untergurt der großmaschigen Gittersparren waren zweiteilig, Diagonal- und Vertikalstäbe einteilig. Die Einzelstäbe wiesen die gleiche Stärke auf, wohingegen die Breite in Abhängigkeit von den Kräften variierte. Alle Stabanschlüsse sind mit zweiseitigen Nagelverbindungen gesichert.

Das Kroher-Dach geht auf den Münchner Zimmermeister und Architekten Ludwig Kroher zurück, der 1938 sein System patentieren ließ [34]. Er vereinigte zwei ebene Gitterträger durch Schrägstellung zu einer V-förmigen Rippe, wobei die Ober- und Untergurte aus trapezförmigen Kanthölzern bestanden. Alle Anschlüsse waren genagelt. Die Dimension der Diagonalen, aber auch die Anzahl der Nägel orientierte sich an dem Momentenverlauf in dem obergurtgelagerten Fachwerkträger. Das heißt, am First und am Auflager waren die Streben breiter und die Anzahl der Nägel an den Knotenpunkten größer als in der Mitte des Gitterträgers. Erhaltene Bauten finden sich vorrangig in München, wie bspw. über dem Bayerischen Landesamt für Steuern in der Sophienstraße 6 und über zwei Gebäuden der Autobahnmeisterei West in München-Obermenzing. Weitere öffentliche Gebäude, wie die damaligen Polizeikaserne in Dresden-Hellerau, weisen heute ebenfalls noch das Kroher-System im Dachwerk auf [35]. Eine Auswahl der in den Jahren 1930–1955 publizierten neueren Sparkonstruktionen für Hausdächer, für deren Verbindungen hauptsächlich Nägel verwendet wurden, fasst Tab. 1 zusammen.

4 System- und Typenkonstruktionen bis 1990

4.1 Anfänge der Typisierung 1943–1953

Die Materialknappheit der Kriegsjahre setzte sich in den unmittelbaren Nachkriegsjahren fort, sodass durchgehend Holz als Baumaterial zwar knapp war, aber immer noch eher verfügbar als Stahl und Beton, für deren Herstellung wiederum große Mengen an Kohle nötig waren. So blieb der Holzbau im Wiederaufbau eine wichtige Konstruktionsweise im Bauwesen [36]. Doch wie ging man mit der Vielzahl an Systemen um, die

Tab. 1 Neue Sparkonstruktionen für Hausdächer mit Nagelverbindungen 1930–1955
New materialsaving constructions for roofs with nail connection 1930–1955

Bezeichnung	Erfinder/Ort	Kurzcharakteristik	bekannt seit
Vollwandbinder			
Verstärkung durch additive Holzelemente			
Gagfah-Binder	Gemeinnützige Aktien-Gesellschaft für Angestellten-Heimstätten, Berlin	stehende Bohlen, stumpf gestoßen, durch aufgenagelte Laschen verbunden	1935 [24]
Vollmar-Lamellendach	Hans Vollmar, Köln	Bohlensparren ausgesteift durch Spreizenplatten	1938 [26]
Vollmar-Bohlensparbinder	Hans Vollmar, Köln	Verbund-Spreizleisten von oben und unten an die Bohllensparren genagelt	1940 [27]
mehrteilige Balkenquerschnitte			
Maerz	Architekt G. Maerz, Braunschweig	Sparren und Kehlbalken als Doppel-T-Profil, Flansche aus Holzlatten genagelt und geleimt, Stege aus Hartfaserplatten	1940 [28]
Barffknecht	Barffknecht	Kehlbalken als Kastenhohlprofil und alle Anschlüsse genagelt, Sparren geleimt (Doppel-T-Profil)	1943 [25]
Lüer	Otto Lüer, Kassel	genagelte Doppel-T-förmige Sparren und Balken, Stegbretter auf voller Höhe durchgehend	1942 [25]
Birkmann	Birkmann	geleimte Sparren- und Balkenquerschnitte (Doppel-T), Verbindungen genagelt	1943 [25]
Rostan-Dach	Louis Rostan, Friedrichshafen/Bodensee	Vollwandbinder als Doppel-T-Profil, Pfettendach	1940 [29]
Trysna-Doppel-T-Profil	Franz Trysna, Kassel	genagelter Vollwandbinder mit Doppel-T-Profil	1943 [25]
Heyer-Dach	Dr.-Ing. Heyer	Sparren und Pfetten als genageltes Doppel-T-Profil, Aussteifung durch Windlatten in Aussparungen der Stege	1954 [39]
Fachwerkträger			
Kroher-Dach	Ludwig Kroher, München	V-förmige Rippen	1938 [34]
Kelwies-Binder	Josef Keldenich, Carl Wiesner, Karlsruhe	Sparren als Dreiecksbinder, Fischbauchbinder	1939 [30–32]
Kastengitterdach	Erich Eisfeld & Egon Bode, Kassel	je zwei Gittersparren durch Pfetten und Streben zu einem Kasten verbunden	1939 [33]

vorrangig in den Jahren 1935–1943 entwickelt wurden? Welche Systeme setzten sich im Wiederaufbau durch?

Eine objektive Vergleichsdarstellung war unumgänglich. 1943 publizierte die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung eine Untersuchung zu hölzernen Hausdächern, die anhand des Materialaufwands für Holz und Stahl sowie der notwendigen Arbeitszeit eine Auswahl der neuartigen Konstruktionsweisen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit getrennt nach vier typischen Spannweiten und zwei Dachneigungen verglich [25]. Bis 1968 erschienen acht Auflagen dieser Publikation, anhand derer eine deutliche Einschränkung der Konstruktionsvielfalt nachvollzogen werden kann. Das wird insbesondere daran deutlich, dass die Fachwerkträger nach den Bauweisen Kelwies, Kroher und das K.-G.-Dach seit den 1960er-Jahren für den Hausbau keine Erwähnung mehr fanden. Zum einen erforderten die Fachwerksparrn und -binder meist größere Bauhöhen und verringerten dadurch den frei nutzbaren Dachraum, zum anderen wiesen diese Konstruktionsweisen einen hohen Arbeitsaufwand gegenüber einer nur geringen Holzersparnis auf, sodass steigende Lohnkosten zur Unwirtschaftlichkeit der Bauweisen führten.

Für den Hallenbau mit genagelten Holzdächern wurden erste Normgrößen und baureife Konstruktionszeichnungen von Ernst Neufert in seiner 1943 erstmals erschienenen Bauordnungslehre publiziert [37]. Dabei handelte es sich ausschließlich um genagelte Brettbinder. Nicht dargestellt waren Kantholz binder, räumliche Gitterträger und Vollholzbinder. Deut-

lich waren seine Bestrebungen zur Systematisierung der Bindergrößen, so wurden von ihm Spannweiten, Trauf- und Firsthöhen in Abhängigkeit von der üblichen Systemgröße von 2,50 m angegeben.

Bis in die 1950er-Jahre hinein wurden zunächst Entwicklungen aus den 1930er- und 1940er-Jahren in Lehrbüchern weiterhin beispielhaft publiziert [38, 39]. Dazu zählten die Fachwerkträger der Systeme Kelwies und Kroher sowie das Kastengitterdach, aber auch die Vollwandbinder nach Rostan oder Trysna. Des Weiteren wurden Systeme weiterentwickelt, wie das K.-G.- und das Kroher-Dach. Zudem kamen neue Sparkonstruktionen hinzu, wie bspw. die Dachwerke mit Gelenksparrn, die im Wesentlichen versuchten, schwer zu beschaffende größere Holzlängen insbesondere der Sparren durch unterstützte Stöße zu vermeiden [40].

Zum anderen versuchten Ingenieure Typenkonstruktionen zu entwickeln, die für mehrere Projekte immer wieder verwendet werden konnten und somit nicht nur die sich wiederholende zeitaufwendige statisch-rechnerische Prüfung der Nagelbrettbinder einsparte, sondern auch gezielt eine Überdimensionierung der Holzkonstruktionen verhindern sollte [41]. Außerdem wollten die Bauschaffenden unabhängig von patentgeschützten Konstruktionen sein. Der Fokus lag somit auf beispielhaft durchgerechneten Konstruktionen. Diese statisch geprüften Binder waren für bestimmte Stützweiten und Dachneigungen ausgelegt und konnten zusammen mit den Konstruktionszeichnungen samt Details für die Knotenausbildung,

das Nagelbild usw. beim Verlag erworben werden. Ein sehr frühes Beispiel ist der in Schleswig-Holstein entwickelte Typendachbinder mit Bindeklotzern, bei dem die Sparren aus zwei durch Futterhölzer auf Abstand gehaltene Bretter bestanden [5,42].

Gerhard Hempel publizierte 1952 zusammen mit Seidel und Jäger im Bruderverlag, Karlsruhe, 20 Fachwerkbinder, die für 5–15 m Spannweite ausgelegt waren [43]. Die zwei Mappen enthielten Dreiecksbinder für Dacheindeckungen mit Pappe auf Schalung mit 14° Dachneigung, steile Dreiecksbinder für eine Dacheindeckung mit Ziegeln bei einer Dachneigung von 30°, Trapezbinder mit 4,7° Dachneigung bzw. Dreiecksbinder mit tiefliegendem Untergurt bei 4,4° Dachneigung und Pultdachbinder mit 14° Dachneigung.

In der DDR publizierte 1953 Schley aus Halle in Ernst Bergs 2. Auflage „Tafeln für Ingenieur-Holzbau“ ebenfalls eine Übersicht mit neun Brettsparrbindern [41]. Enthalten sind Dreiecksbinder von 5 m bis 11 m Spannweite und Pultdächer bis 8 m Spannweite. Seine Ausführungen enthalten neben einer Übersicht zu Holz- und Nagelbedarf sowie Angaben zu Materialersparnissen gegenüber überlieferten Zimmermannskonstruktionen Ausführungszeichnungen und Holzlisten. Schley kommt zu dem Schluss, dass bei rd. 11 m Spannweite für einen Dreiecksbinder die Grenze der Wirtschaftlichkeit erreicht ist und dass Spannweiten für Pultdächer über 8 m inakzeptable Belichtungsverhältnisse verursachen, weshalb seine Ausführungen auf diese Maße beschränkt waren [41].

4.2 Typenkonstruktionen in der DDR

Noch bevor die zentral gelenkte Rationalisierung und Typisierung im Bauwesen ab den 1960er-Jahren in der DDR alle Bereiche erfasste, wurden typisierte Brettbinderkonstruktionen bspw. für Eigenheime ab 1954 projektiert.

Die Autorenschaft dieser Typenbinder lag beim Entwicklungs- und Konstruktionsbüro des VVB, später VEB Bauelemente und Faserbaustoffe Leipzig, zeitweise VEB ZEKB – Zentrales Entwicklungs- und Konstruktionsbüro Ausbauelemente Leip-

zig. Der oben erwähnte Franz Trysna, Kassel, zeichnete hier in den Anfangsjahren für die Gütekontrolle verantwortlich. Bis 1991 erschienen in regelmäßigen Abständen aus dieser Leipziger Forschungsabteilung jeweils entsprechend der geltenden TGL aktualisierte Typenkataloge (Bild 6). 1960 waren ebene Fachwerkbinder u. a. für folgende Spannweiten als genagelte Brettbinder verfügbar [44]:

- Flachdachbinder mit 25 % DN für 4,375–15,00 m
- Pultdachbinder mit 25 % DN für 5,00–10,00 m
- Steildachnagelbinder mit 75 % DN für 4,375–12,50 m
- Gittersparrennagelbinder mit 75 % DN für 10,00–12,50 m

Die Binder wurden für unterschiedliche Schneelastgebiete, unterschiedliche Dachdeckungen sowie für geschlossene Warmbauten mit oder ohne Decke und für offene bzw. teiloffene Kaltbauten ohne Decke projektiert. Entsprechend konnten aus den Tabellen Binderabstände und Bauteilabmessungen abgelesen werden. Das Elementesortiment der Dachbinder war für die Stahlbetonskelett-Montagebauweise in der Laststufe 0,8Mp, womit das maximale Gewicht eines Bauteils auf 0,8t begrenzt war, sowie für die traditionelle Ziegelbauweise und für leichte Bauten (Unterkünfte, Lagerhallen, Fertighäuser, Bungalows, Erholungsbauten) in der Landwirtschaft, Industrie und im Gesellschaftsbau bestimmt [45].

Der freie Entwurf für vier Ausstellungshallen auf der 1961 eröffneten Internationalen Gartenausstellung in Erfurt des Architekten und Künstlers Charly Hähnel sowie des Ingenieurs W. Penther, beide aus Berlin, war vermutlich einer der letzten nicht typisierten Binderkonstruktionen für derartig repräsentative öffentliche Bauaufgaben (Bild 7). Die bis 1959 hier errichteten Holzhallen waren in dem Fall nur eine Notlösung, denn der ursprüngliche Plan sah Stahlhallen vor. Dieser konnte erst mit der verbesserten Baustoffsituation ab 1960 für weitere Ausstellungshallen umgesetzt werden [46].

Sämtliche typisierte Nagelbrettbinderprojekte waren ebene Fachwerkbinder für Pult- oder Satteldächer in Trapez- oder Dreiecksform. Andere Dachformen, wie Walmdächer, konnten mit den Bindern planmäßig nicht ausgeführt werden. Für die Herstellung von Nagelplatten fehlten in der DDR die Devisen,

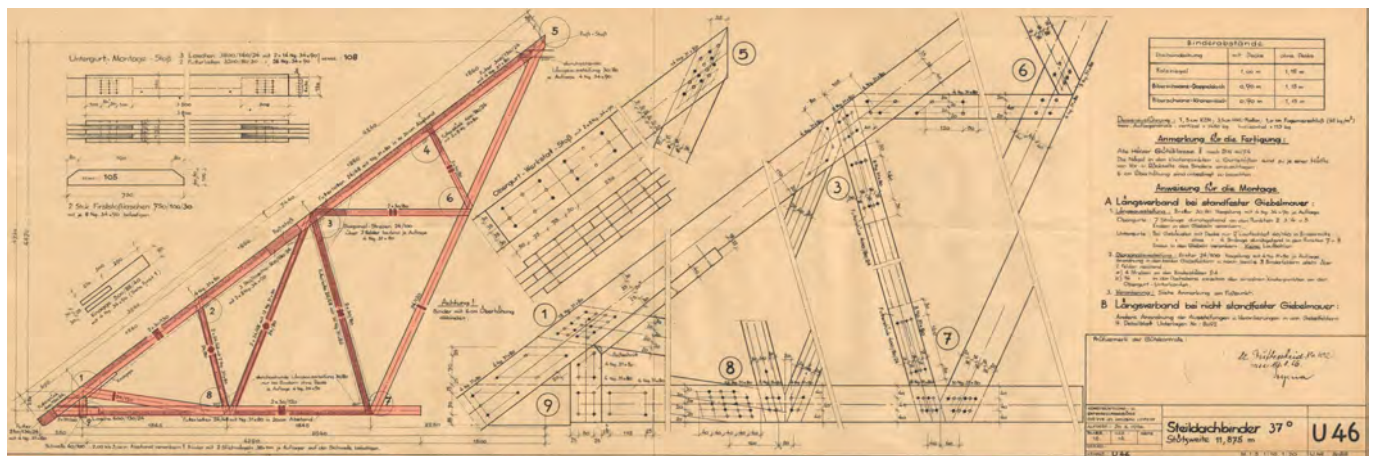


Bild 6 Steildachbinder Typ U46, 37° Dachneigung, Stützweite 11,875 m, Bj. 1956, Konstruktions- und Entwicklungsbüro der VVB IZL Holzbau Leipzig (Quelle: Archiv Ingenieurbüro Bauen, Weimar)
Steep roof girder typ U46, pitch 37°, 11.875 m span., constr. year 1956, engineering and research office VVB IZL Holzbau Leipzig



Bild 7 Erfurt, Fischbauträger der ega-Ausstellungshallen, Bj. 1959, Foto 2011 (Quelle: Mark Escherich, Erfurt)
Erfurt, fish-bellied beam at ega-exhibition hall, constr. year 1959, photo 2011

und Leimbinder waren ebenfalls aufgrund ihrer aufwendigeren Herstellung wenig verbreitet, weshalb die Nagelbinder bis 1990 in der DDR erste Wahl für Hallendachkonstruktionen in Holzbauweise blieben [47].

4.3 Nagelbindersysteme in der BRD

Im Gegensatz zu den zentral entwickelten Typenkonstruktionen für Nagelbinder in der DDR gab es in der BRD aufgrund der liberalen Wirtschaftsform keine derartige Bestrebung. Seriell gefertigte Binder, wie die für die Notkirchen Otto Bartnings, blieben zahlenmäßig begrenzt. Es kann vermutet werden, dass Zimmereien und Holzbaufirmen firmeneigene Systeme vermarktetten, die eher regionale Verbreitung fanden. Neufert listet um 1965 [48] in seiner Analyse „Welche Hallen für die Industrie – Bedarfsuntersuchung und Marktangebot für vorgefertigte Hallen“ vier Firmen aus Koblenz, Göppingen, Gahlen/Niederrhein und Winnenden auf, die Nagelkonstruktionen in Serienfertigung anboten. Diese firmeneigenen Systeme der Jahre 1950–1970 sind Bestandteil künftiger Forschungsvorhaben der Autoren.

Gerhard Hempel publizierte in regelmäßigen Abständen in der Reihe „Bau-Fachschriften“ seit 1947 immer wieder aktualisierte und ergänzte Konstruktions- und Berechnungsgrundlagen in seinem Band „Freigespannte Holzbinde“ [49]. Zuletzt erschien 1973 die 10. Auflage. Die veröffentlichten Binder sind ausgewählte Beispielkonstruktionen. Die tatsächlich realisier-

ten Projekte stellte Hempel mit den kompletten statischen Berechnungen und Ausführungszeichnungen dar. 1963, in der 7. Auflage, waren noch sieben von 21 vorgestellten Holzbindern allein mit Nägeln gefügt. Bemerkenswert ist dabei die Vielfalt an Konstruktionsweisen. So stellte er Binder in Form von Dreiecksbindern mit und ohne tiefliegendem Untergurt als Nagelbrettbinder oder als Kantholz-Fachwerkbinder vor, des Weiteren beschreibt er Parallel-Vollwandbinder mit Doppel-T-Profil und Hohlprofil und einen Dreigelenkrahmen als Vollwandnagelbinder. 1971, in der 9. Auflage „Freigespannte Holzbinde“, wählte Hempel nur noch vier genagelte Holzbinde für seine Beispielsammlung aus.

Der Anteil der vorgestellten Leimbinder stieg kontinuierlich an. Die Gründe dafür und die Veränderungen an den Konstruktionen nennt Hempel im einleitenden Vorwort selbst: Die erhöhten Lohnkosten führten dazu, dass Nagelbrettbinder möglichst weitmaschig konstruiert wurden, um weniger Knotenpunkte zu erzeugen, denn jeder Knotenpunkt bedeutete höhere Lohnkosten [49].

Als Vorlage für Neubauprojekte lagen aus dem Bruderverlag die 1952 erstmals veröffentlichten und oben erwähnten zwei Mappen von Gerhard Hempel vor, die 1970 nochmal neu aufgelegt wurden [50,51]. Die jeweils zehn Brettbinderkonstruktionen samt statischer Berechnung und Ausführungszeichnung enthielt [43]. Diese Konstruktionen zeigten ausschließlich Fachwerkbinder als Satteldachbinder mit und ohne angehobene Traufe sowie Pultdachbinder.

Der Abbruch der Publikationstätigkeit von Forschungsergebnissen und Referenzbauten sowie Berechnungsbeispielen zu Nagelbrettbindern zu Beginn der 1970er-Jahre ist vor dem Hintergrund der deutschen Zulassung von Nagelplatten zunächst in Baden-Württemberg und dann in der gesamten BRD zu sehen [7,9]. Nagelbrettbinder waren in der Folge zu unwirtschaftlich aufgrund der hohen Arbeitslohnkosten, die für das Nageln vieler Hunderter Nägel entstanden.

5 Fazit

Die Forschungen zu Nagelverbindungen brachten zunächst im Hallenbau Brettbinder als Parabel- und Mansarddächer sowie Kantholzbinder insbesondere als Dreiecksbinder mit und ohne angehobene Traufe sowie Sägedachformen hervor. Kantholzbinder waren aufgrund des geringeren Arbeitsaufwands zunächst wirtschaftlicher. Mit dem anhaltenden Mangel an Baustoffen und der weiterführenden Forschung zu den Verbindungen kamen mehr Brettbinder auf, wie die Publikationen von Neufert 1943 zeigen. Durch weitere Optimierung und einen anhaltenden Holz-mangel in der DDR waren dort nur noch Brettbinder vorgesehen, während Hempel in der BRD sowohl Kantholz- als auch Brettbinder für Neubauten projektier-te.

Der chronologische Überblick zu den genagelten Konstruktionsweisen verdeutlicht die enorme Vielfalt an zunächst einzeln patentierten Systemen insbesondere für den Bau von Hausdächern. Diese Sparkonstruktionen versprachen eine besonders

hohe Holzeinsparung, die man sich jedoch durch einen hohen Arbeitsaufwand erkaufte [25]. Um Arbeits- und Materialaufwand möglichst gering zu halten, waren die Ingenieure seit den 1940er-Jahren bestrebt, mithilfe von Typenkonstruktionen äußerst optimierte Konstruktionspläne zur Verfügung zu stellen. Während in der BRD eine größere Vielfalt der Systeme mit höherem Materialeinsatz noch bis 1970 verbaut wurde, entwickelte die DDR äußerst materialsparende typisierte Binderkonstruktionen vorrangig für Pult- und Satteldächer, wie sie noch bis 1990 verwendet und publiziert wurden. Weitere Forschungen werden die vertiefte Analyse zu den Systemen und deren Anpassungsfähigkeit an die jeweils geltende DIN bzw. TGL sowie personelle Kontinuitäten und Brüche der Ingenieurbiografien und deren Netzwerk auf dem Gebiet der Nagelbinder thematisieren.

Literatur

- [1] Fischer, J.; Schwendner, S.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – Die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln*. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen).
- [2] Schwendner, S.; Fischer, J.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Nägel im Holzbau – Die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens*. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen).
- [3] Stoy, W. (1942) *Der Holzbau*. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- [4] Stoy, W.; Fonrobert, F. (1943) *Holz-Nagelbau nach DIN 1052, 3. Ausgabe, 1940*. 5. Aufl. Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Holz, Berlin.
- [5] Ahnert, R.; Krause, K.H. (2009) *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Unterzüge und gemauerte Gurtbogen, Pfeiler und Stützen, Treppen, Dächer und Dachtragwerke, Dachaufbauten aus Holz, Lastannahmen zum Dach*. Bd. 3. 7., durchgesehene u. korrigierte Aufl. Berlin: Huss-Medien.
- [6] Rug, W. (2003) *100 Jahre Holzbau- und Holzbauforschung in: BDZ [Hrsg.] 100 Jahre Bund Deutscher Zimmermeister, 100 Jahre Verband, Holzbau, Holzbauforschung 1903–2003*. Berlin: Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ).
- [7] Seraphin, M. (2003) *Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus – eine Entwicklungsgeschichte*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Hochbaustatik und Tragwerksplanung, Bd. 2. Aachen: Shaker.
- [8] Tasche, M. (2015) *Analyse von Entwicklungssträngen im konstruktiven Ingenieurbau anhand von bestehenden Brücken und Stabtragwerken im Hochbau in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen* [Dissertation]. Aachen: Shaker, 2016.
- [9] Tasche, M.; Baumgarten, H.; Zinnert, G. (2011) *Typisierte Stabtragwerke aus Holz in der DDR von 1955 bis 1990*. Bautechnik 88, H. 9, S. 646–650. doi.org/10.1002/bate.201101505
- [10] Stoy, W. (1925) *Massenermittlung der Lehrbogen von Wölb- und Bogentragwerken unter besonderer Berücksichtigung der Strebenwerke* [Dissertation]. Technische Hochschule Braunschweig. Die Bautechnik 4, H. 53, S. 810–822. Braunschweig, 1926.
- [11] Freyssinet, E. (1929) *Die Brücke bei Plougastel*. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 73, 94f.
- [12] Freyssinet, E. (1930) *Le Pont en beton armé Albert Louppe sur l'Elorn, entre Brest et Plougastel*. Le génie civil 97, pp. 317–334.
- [13] DIN 1052:1933-07 (1933) *Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [14] Stoy, W.; Fonrobert, F. (1937) *Holz-Nagelbau*. Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Holz. 2., völlig neu bearbeitete Aufl. Berlin.
- [15] Stoy, W.; Fonrobert, F. (1941) *Holz-Nagelbau nach DIN 1052, 3. Ausgabe, 1941*. Schriftenreihe der Reichsarbeitsgemeinschaft Holz e. V. 3., neu bearbeitete und verbesserte Aufl. Berlin.
- [16] Stoy, W.; Seidel, E. (1933) *Der Holz-Nagelbau*. Berlin.
- [17] Gesteschi, T. (1926) *Der Holzbau*. Berlin.
- [18] Seidel, E. (1943) *Die Entwicklung des Holz-Nagelbaues*. Die Bautechnik 21, H. 29/33, S. 204–107.
- [19] Seidel, E. (1933) *Genagelte Holzbinder. Für die Dacherneuerung der Firma P. Rentsch, G.m.b.H., der Buntweberei, Seifhennersdorf i. Sa.* Deutsche Bauzeitung 67, S. 937–940.
- [20] Gaber, E. (1935) *Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen*. Karlsruhe.
- [21] Gaber, E. (1940) *Sparsame Holzträger. Ein Beitrag zum hochwertigen Holzbau*. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen, Berlin.
- [22] Schmidt, K. (1939) *Die Nagelverbindungen im Holzbau*. Baumeister – Technische und wirtschaftliche Rundschau 37, H. 3, S. 73–76.
- [23] von Halász, R. (1952) *Holzbau-Taschenbuch*. 4. Aufl. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- [24] Gerlach, H. (1938) *Der stützenfreie Dachraum im Kleinwohnungsbau*. Holz im Wohnungs- und Siedlungsbau – Vom wirtschaftlichen Bauen, S. 127–161.
- [25] Wedler, B.; Trysna, F.; von Halász, R.; Schultz, A. (1943) *Hölzerne Hausdächer. Baustoffbedarf und Arbeitsaufwand, Standsicherheitsnachweis nach Untersuchungen des Fachausschusses III „Holz im Bauwesen“*. Veröffentlichung (Mitteilungen) der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, Berlin.
- [26] Vollmar, H. (1938) *Bohlenlamellen für Decken und Dächer*. Bauwelt, H. 40, S. 918–919.
- [27] Vollmar, H. (1940) *Der Vollmar-Bohlen-Sparbinder im Wohnungsbau. Zur Weiterentwicklung des Vollmar-Bohlen-Lamellendachs*. Bauwelt, H. 36, S. 566–568.
- [28] Kersten, C. (1940) *Neuzeitliche Holzdächer*. Zentralblatt der Bauverwaltung 60, H. 9/10, S. 133–138.
- [29] Witte (1940) *Das Rostan-Dach. Eine weitere holzsparende Dachbauweise*. Bauwelt, H. 31, S. 489–490.
- [30] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Abbund und Ausführung des Kelwies-Sparbinders*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 49/50, S. 537–540.
- [31] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Der Kelwies-Sparbinder und seine Herstellung*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 36, S. 453–454.

- [32] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Der Kelwies-Sparbinder. Die größte bisher bekannte Holzersparnis*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 28, S. 356–359.
- [33] Eisfeld, E.; Bode, E. (1939) *Das Kastengitterträgedach „K.-G.-Dach“*. Bauwelt, H. 36, S. 814–818.
- [34] Harbers, G. (1939) *Erstmalige Anwendung des Ludwig-Kroher-Dachstuhls*. Technische und wirtschaftliche Rundschau, Beilage Baumeister 37, H. 1, S. 7–9.
- [35] Engelmänn, I. (2023) *Das Kroher-Dach. Baukonstruktionsgeschichte und Erhaltungsstrategien einer Sparkonstruktion für Dächer und Decken*. architectura (in Vorb.).
- [36] Kersten, C. (1947) *Das Holz im Wiederaufbau*. Berlin: Lipfert.
- [37] Neufert, E.; Speer, A. [Hrsg.] (1943) *Bauordnungslehre*. Berlin: Volk und Reich Verlag.
- [38] Mittag, M. (1956) *Baukonstruktionslehre*. 7. Aufl. Gütersloh: C. Bertelsmann Verlag.
- [39] Theuerkorn, M. (1954) *Baukonstruktionslehre. Holzbau*. Bd. 3. 1. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.
- [40] Hempel, G.; Möhler, K.; Steinhardt, O. (1955) *Der Holzbau von heute: Dachkonstruktionen*. Deutscher Zimmermeister (Sonderdruck). Karlsruhe: Bruderverlag.
- [41] Schley, W. (1953) *Brettsparrimbinder. Tafeln für den Ingenieur-Holzbau*. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, S. 48–62.
- [42] Abt. Bau-, Wohnungs- und Kleinsiedlungswesen im Ministerium für Arbeit, Soziales und Vertriebene [Hrsg.] (1951) *Normteile für den Wohnungsbau (Landesbauformen). Bauen in Schleswig-Holstein*. Kiel.
- [43] Seidel, E.; Hempel, G.; Jäger, J. [Hrsg.] (1952) *Nagel-Brettbinder: Geprüfte statische Berechnungen und Ausführungszeichnungen*. Karlsruhe: Bruderverlag.
- [44] VEB Typenprojektierung Berlin (1960) *Übersichtskatalog Bauelemente 1960, Teil I Rohbau*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- [45] Institut für Bauelemente- und Faserbaustoffe [Hrsg.] (1982) *Dach- und Hallenkonstruktionen in Holzbauweise. Informationen und Systemübersichten 1982*. Leipzig.
- [46] Lingner, R. (1962) *Die Bauten der Internationalen Gartenausstellung*. Deutsche Architektur, H. 4/5, S. 197–207.
- [47] BAUFA Engineering GmbH Leipzig (1991) *Dach- und Hallenkonstruktionen in Holzbauweise für Neubau und Rekonstruktion. Informationen und Systemübersichten 1991*. Leipzig.
- [48] Neufert, E.; Studiengemeinschaft Fertigtbau [Hrsg.] (1965) *Welche Hallen für die Industrie? Bedarfsuntersuchung und Marktangebot für vorgefertigte Hallen*. Querschnitt-Schriftenreihe der Rationalisierungs-Gemeinschaft Bauwesen im RKW, Frankfurt am Main.
- [49] Hempel, G. (1971) *Freigespannte Holzbinder*. 9. Aufl. Karlsruhe: Bruderverlag.
- [50] Hempel, G. (1970) *Geprüfte Nagelbinder mit Brettergurten*. Karlsruhe: Bruderverlag.
- [51] Hempel, G. (1970) *Geprüfte Nagelbinder mit Kantholzgurten*. Karlsruhe: Bruderverlag.

Autor:innen

Dr.-Ing. Iris Engelmänn (Korrespondenzautor:in)
iris.engelmann@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Architektur
Geschwister-Scholl-Str. 8
99423 Weimar

Sascha Schwendner
s.schwendner@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Str. 3
34125 Kassel

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

wseim@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Str. 3
34125 Kassel

Zitieren Sie diesen Beitrag

Engelmänn, I.; Schwendner, S.; Seim, W. (2023) *Materialsparende Nagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte von 1930 bis 1990*. Bautechnik 100, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 53–63.
<https://doi.org/10.1002/bate.202200103>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 13. Dezember 2022; angenommen: 11. Mai 2023.

Nägeln im Holzbau – die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens

Die Tragfähigkeit von Nägeln (Drahtstifte) und Nagelverbindungen im Holzbau war lange Zeit ausschließlich über Tabellen, die auf experimentellen Untersuchungen basierten, geregelt. In den letzten 100 Jahren untersuchten unterschiedliche Forscher das Last-Verformungsverhalten dieser Verbindungen und entwickelten Modelle, mit denen auf Grundlage von analytischen Gleichungen die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von Nägeln berechnet werden können. Die zunächst in Not- und Sparkonstruktionen eingesetzten Nägel werden heutzutage v. a. im Holztafelbau verwendet. Im Bestand finden sich aber auch zahlreiche, teils weitgespannte Fachwerkstrukturen, deren Tragsicherheit auf den genagelten Verbindungen in den Knotenpunkten basiert. In dem folgenden Beitrag wird die Erforschung und Entwicklung des Trag- und Verformungsverhaltens von Holz-Holz-Verbindungen mit Nägeln als Verbindungsmittel chronologisch und detailliert erläutert. Die entsprechenden Meilensteine werden genauer betrachtet. Unterschiedliche Methoden für die Bestimmung der Tragfähigkeit werden vorgestellt. Auf mechanische Phänomene, die nach und nach erforscht wurden, wird eingegangen. Mit dem heute erreichten Stand des Wissens können vielfältige Verbindungen nachgewiesen werden. Zudem ist es möglich, deren Steifigkeit explizit zu bestimmen. Tabellen und Grafiken verdeutlichen die einzelnen Meilensteine der geschichtlichen Entwicklung und vergleichen konkret die unterschiedlichen normativen Regelungen seit Beginn der Einführung des Nagels in den Ingenieurholzbau in Deutschland. Hierbei kann gezeigt werden, dass es trotz unterschiedlicher Herangehensweisen seit 1933 kaum Änderungen bei den Ergebnissen der rechnerischen Bestimmung der Tragfähigkeit gibt.

Stichworte DIN 1052; Mindestabstände; Nagelverbindungen; TGL 33135/01; Tragfähigkeit; Eurocode 5

Nails in wood construction – fundamental research and continuous standardisation

For a long time, the load-carrying capacity of nails and nailed connections in timber structures was regulated only by tables based on experimental investigations. In the last 100 years, different researchers investigated the load-deformation behaviour of these connections and developed models with which the load-carrying capacity and deformation behaviour of nails can be estimated very precisely on the basis of analytical equations. At first used in material saving construction in economical difficult times, nails are nowadays mainly used for the connections of the sheathing to the ribs for light-frame elements. In the following article, the research and development of the load-carrying capacity and deformation behaviour of timber-timber connections with nails as fasteners is explained chronologically and in detail. Different methods to determine the load-carrying capacity are presented. Mechanical phenomena that have been discovered stepwise are dealt with. Actually, very individual connections can be verified by using code regulations. In addition, it is possible to determine the stiffness of the connection. Tables and graphics illustrate the milestones of the historical development and specifically compare the normative regulations since the introduction of the nail in engineered timber construction in Germany. Here it can be shown that despite the constantly changing definitions, the calculation results regarding the load-bearing capacity has remained in a similar order of magnitude since 1933 until today.

Keywords DIN 1052; load carrying capacity; minimum distances; nail-connection; TGL 33135/01; Eurocode 5

1 Einführung

Die Erforschung der Tragfähigkeit genagelter Verbindungen ist beispielhaft dafür, wie aus der Baupraxis heraus Fragen an die Wissenschaft formuliert werden – und auch dafür, wie auf diese Fragen vergleichsweise schnell eine Antwort gefunden wird und in der Folge ein Innovationschub für eine ganze Branche entsteht. Diese These kann wie folgt belegt werden:

Wilhelm Stoy (1887–1958) hatte sich nach seinem Bauingenieurstudium in Darmstadt, Danzig und Braunschweig und einigen Jahren in verschiedenen Ingenieurbüros in seiner Promotion, 1926, und Habilitation, 1927, mit Lehrgerüsten beschäftigt und ist dabei auf die bis dahin in Deutschland wenig beachtete Leistungsfähigkeit von Nagelverbindun-

gen gestoßen [1–3]. Mit Abschluss der Habilitation gründete er zusammen mit Felix Fonrobert in Holzminden ein Ingenieur-Laboratorium. Dort erarbeiteten die beiden Ingenieure grundlegende Erkenntnisse zur Tragfähigkeit und Steifigkeit für die Anwendung von Nägeln als tragende Verbindungsmittel im Holzbau. Konkreter Anlass für die Erforschung von Nagelverbindungen gab 1928 die Ausführung eines 16m weit gespannten Binders im nordhessischen Adorf (Ldkr. Waldeck-Frankenberg), der nur aus Brettern zusammengenagelt werden sollte [4,5]. Der Entwurf von Stoy ist in Bild 1 dargestellt.

Weil es zu dieser Zeit in Deutschland keine Berechnungs- und Konstruktionsvorschriften für Nagelverbindungen gab und somit das Projekt zunächst nicht realisierbar gewesen wäre, führte Wilhelm Stoy erste grundlegende Versuche

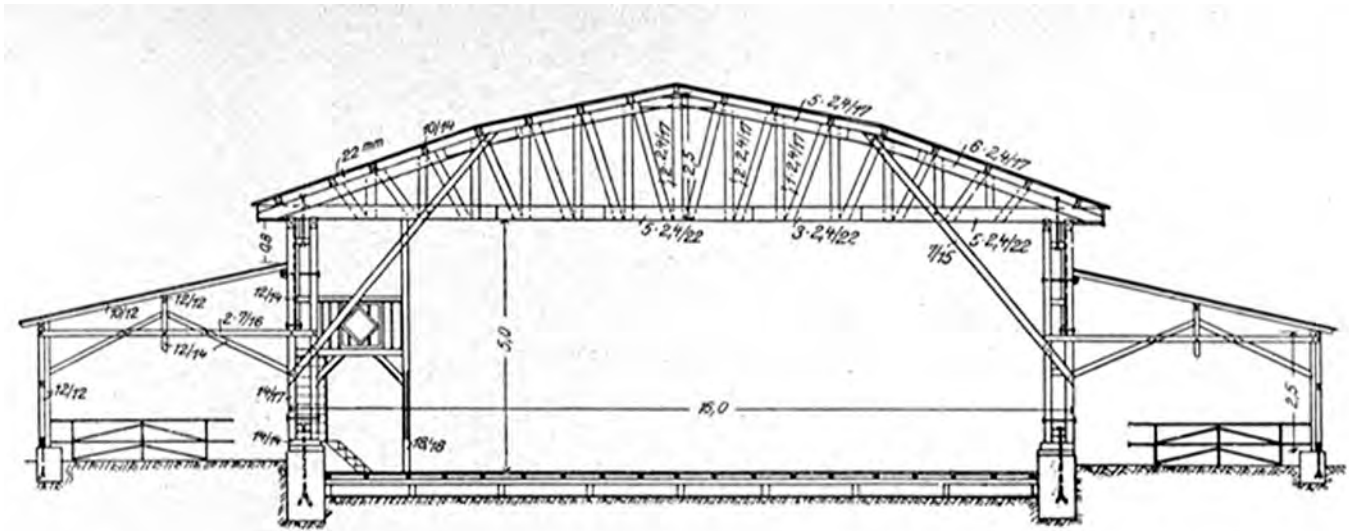


Bild 1 Nagelbrettbinder für eine Veranstaltungshalle in Adorf (Waldeck), 1928, Entwurf: Wilhelm Stoy [7]
Nailboard roof construction for an event hall in Adorf (Waldeck), 1928, design: Wilhelm Stoy [7]

zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Nägeln durch [6]. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte Stoy die Nagelbinder, ausgeführt als Mansardbinder, für die 32 m lange Turn- und Festhalle projektieren.

Den Binder kennzeichneten ein durchlaufender horizontaler Untergurt und ein aus vier Segmenten bestehender polygonaler Obergurt. Der Binderabstand betrug 4 m, der Pfettenabstand 1 m. Die Tragfähigkeit des Binders wies Stoy anhand einer Probelastung nach. Auf dem Werkplatz hatte der Binder einen Stich von 10 cm erhalten. Nach einer Belastung des ersten aufgestellten Binders mit dem Eigengewicht von 16 Zimmerleuten betrug die elastische Durchbiegung 1 cm. Ein Wert, welcher auch wiederholt bei späteren Folgeversuchen bestätigt wurde [7]. Bereits 1955 erkannten Fachleute diesen Entwurf der Halle in Adorf als den „Grundstein für den ingenieurmäßigen Holznagelbau“ [8]. Dennoch wurde die Halle 1978 abgerissen (Bild 2) und durch eine neue Mehrzweckhalle an gleicher Stelle ersetzt.



Bild 2 Adorf, Halle während des Abrisses 1978, (Foto: Ostermann/Privatarchiv Erwin Brüne)
Adorf, hall during demolition 1978

Nach Fertigstellung der Halle begann Stoy Holz-Holz-Verbindungen mit Nägeln systematisch zu untersuchen. In seinem Laboratorium an der Staatsbauschule Holzminden stellte er zusammen mit Felix Fonrobert ca. 4000–5000 Versuchskörper her und dokumentierte die Ergebnisse in umfassenden Berichten [8,9]. Seine Versuchsergebnisse bildeten die Grundlage für die Aufnahme der Nagelverbindungen in die DIN 1052:1933 [10].

2 Zuverlässige Bemessungsregelungen und Tragfähigkeit

2.1 Historische Entwicklung

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 [11] 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 [12] angewandten Verfahren liefert Linzner [13] in Kapitel 5 seiner Dissertation. Die aktuellen Regelungen berücksichtigen neben der Lochleibungsfestigkeit auch plastische Fließgelenke in dem Verbindungsmittel und basieren auf dem oberen Grenzwert der Plastizitätstheorie.

In der DIN 1052:1933 [10] 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

Tab. 1 Angaben zur Tragfähigkeit von auf Abscheren beanspruchten Holz-Holz-Verbindungen je Scherfuge mit Nägeln in den Holzbaunormen von 1933 bis heute
Specifications on load-bearing capacity for nailed timber-timber connections per shear joint in the timber construction standards from 1993 to date

Regelwerk	Jahr	Angabe	Randbedingungen
DIN 1052 [10]	1933	für $a \leq 40$ mm $F_{zul} = 80 \text{ kg/cm}^2 \cdot a \cdot d/2$ für $a > 40$ mm $F_{zul} = 50 \text{ kg/cm}^2 \cdot a \cdot d/2$	– $a = (6..8)d$ – Annahme: gleichmäßig verteilter Leibungsdruck
DIN 1052 [34]	1940	Tabelle	– $a = 20..80$ mm, $d = 2,8..8,8$ mm – unabhängig von α – Nageldicke nach dünnstem Holz
DIN 1052 [35]	1947	Tabelle	– $a = 20..80$ mm, $d = 2,8..8,0$ mm – unabhängig von α – Nageldicke nach dünnstem Holz
TGL 112-0730 [31]	1963	Tabelle	– $a = 20..80$ mm, $d = 2,8..8,0$ mm – unabhängig von α – Nadelholz und Hartholz (vb)
DIN 1052 – Blatt 1 [21]	1969	zul $N_1 = \frac{500 \cdot d_n^2}{1 + d_n}$ [kp] mit d_n in [mm] Tabelle	– $a = 24..90$ mm, $d = 2,2..9,0$ mm – unabhängig von α – Nadelholz (nvb)
TGL 33135/01 [20]	1984	Tabelle	– $a = 24..90$ mm, $d = 3,1..9,0$ mm – unabhängig von α – Nadel- (nvb/vb/Blech) und Laubholz
DIN 1052-2 [23]	1988	zul $N_1 = \frac{500 \cdot d_n^2}{10 + d_n}$ [N] mit d_n in [mm]	– unabhängig von α und von Güteklasse – Nadelholz (nvb)
DIN EN 1995-1-1 [12]	2010	Johansen-Gleichungen	– unabhängig von α ($d \leq 8$ mm) – Holzart über Dichte berücksichtigt – vorbohren für $\rho_k \geq 500 \text{ kg/m}^3$ oder $d > 6$ mm

a = Dicke des Seitenholzes bzw. Eindringtiefe
 d_n = Durchmesser des Nagels
 α = Kraft-Faser-Winkel
vb = vorgebohrt
nvb = nicht vorgebohrt

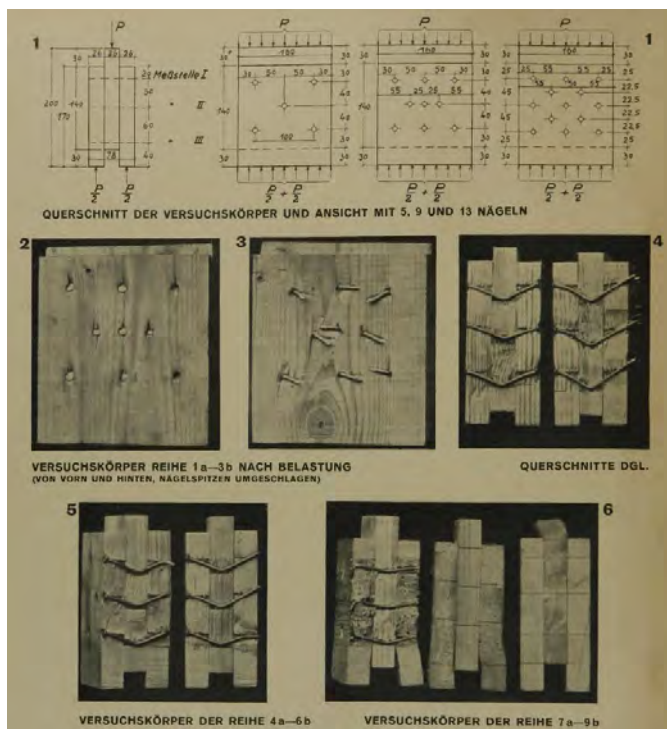


Bild 3 Unterschiedliche Versuchskörper und deren Versagensformen aus [18]
Different test specimens and their failure modes from [18]

50 kg/cm², bei dünnen Brettern ($a \leq 40$ mm) 80 kg/cm² (Tab. 1).

Gl. (1) gibt die Nageltragfähigkeit in Abhängigkeit von der Lochleibungsfestigkeit P , dem Nageldurchmesser d sowie der Brettdicke a an.

$$\text{zul } N_1 = P \cdot a \cdot d \text{ [kg]} \tag{1}$$

Die Vielzahl an Versuchen in den 1930er-Jahren, die von Stoy [14], Gaber [15] und Grabbe [16] durchgeführt wurden (Bild 3), 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 (Bild 4) [18]. Dort sind den Holz厚ken bestimmte Nagelabmessungen zugeordnet und umgekehrt. Die Angaben orientierten sich an den üblichen Holz厚ken und an den durch die Klassifizierungen vorgegebenen Abmessungen der Drahtstifte und galten nur für die jeweilige Kombination. Dabei waren jeder Brettdicke mehrere Nagelgrößen zugeordnet. Die Auswahl ergab sich aus dem möglichst günstigen Verhältnis zwischen Holz厚ke und Nageldurchmesser. Nach Stoy [14] ist die Tragfähigkeit abhängig von diesem Verhältnis,

Tafel 6				Tafel 7				
Zulässige Belastung von ein- und zweischnittig beanspruchten Nägeln in kg in jeder Faserrichtung je Nagel				Zulässige Belastung von ein- und zweischnittig beanspruchten Nägeln in kg in jeder Faserrichtung				
Holzdicke in mm	Nagel Durchmesser d in 1/8 mm Länge in mm	Zulässige Belastung je Nagel in kg		Nagel Durchmesser in 1/8 mm	Verwendbar für Holzdicke in mm	Mindest-Nagellänge in mm	Zulässige Belastung je Nagel in kg	
		einschnittig	zweischnittig				einschnittig	zweischnittig
20	28/60	30	60	26	20	60	30	60
	31/66	37,5	75	31	20	65	37,5	75
	34/72	45	90	34	24	80	45	90
31/80	37,5	75	20		75			
34/75	45	90	24		75			
24	28/90	33,5	105	38	28	90	52,5	105
	34/90	45	90		34	90		
	38/90	52,5	105		38	90		
28	32/100	42,5	128	42	36	100	52,5	128
	38/100	52,5	105		39	100		
	42/100	62,5	126		42	110		
30	36/115	72,5	145	46	40	100	72,5	145
	42/115	82,5	126		50	115		
	46/115	72,5	145		36	115		
35	43/160	82,5	—	55	40	130	97,5	195
	46/190	72,5	145		45	145		
	55/145	72,5	145		50	130		
40	46/190	72,5	145	60	40	145	115	230
	55/145	72,5	145		45	145		
	48/130	72,5	—		50	130		
45	55/180	97,5	185	70	50	190	150	310
	60/160	115	230		55	145		
	55/145	72,5	145		60	180		
50	60/190	115	230	80	60	210	165	370
	66/145	97,5	—		70	240		
	66/210	155	310		80	240		
55	66/190	115	230	88	80	260	210	420
	66/145	97,5	—		88	260		
	66/210	155	310		88	260		
60	66/190	115	230	70	70	210	150	310
	70/210	155	310		85	210		
	70/240	185	370		70	240		
70	70/210	155	310	70	80	240	165	370
	76/240	185	370		80	240		
	70/210	155	310		88	260		
80	76/240	185	370	88	80	260	210	420
	88/260	210	420		88	260		

Bild 4 Tragfähigkeitstabellen nach DIN 1052:1938 [17]
 Load capacity tables acc. to DIN 1052:1938 [17]

das er den Schlankheitsgrad der Verbindung nannte. Auch Gaber und Grabbe [15,16,19] bezogen sich auf diesen Wert.

In den Tabellen der DIN 1052:1938 (Bild 4) spiegelt sich die auf Gaber, Grabbe und Stoy [7,14–16,19] zurückgehende Erkenntnis wider, dass die Tragfähigkeit unabhängig vom Kraft-Faser-Winkel ist. Diese basiert auf experimentellen Untersuchungen an stiftförmigen Verbindungsmitteln mit Durchmessern < 8 mm. In der DIN EN 1995-1-1:2010 [20] wird diese Unabhängigkeit vom Kraft-Faser-Winkel auf Nageldurchmesser $d \leq 8$ mm begrenzt. Größere Durchmesser sind nach DIN EN 1995-1-1:2010 [20] wie Bolzen zu berechnen.

Die Tabellen gewannen mit den Jahren an Umfang und berücksichtigen später auch Laubholz und vorgebohrte Nagellöcher sowie Bleche. Es wurden jedoch nie alle theoretisch möglichen Kombinationen von Nägeln und Holzarten normativ abgedeckt. Die Werte stellten immer nur einen Basiswert dar, der je nach Gegebenheiten pauschal prozentual abgemindert oder erhöht werden durfte.

In den letzten Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) zum Holzbau von 1984 [20] fanden sich immer noch tabellierte Tragfähigkeiten, während in der DIN 1052:1969 [21] ergänzend zu den Tabellen die Formulierung Gl. (2) aufgeführt wurde. Diese Gleichung, die sich aus der mathematischen Annäherung an die grafisch aufgetragenen tabellierten Werte ergibt, stammt von Fonrobert [22]. Mit der DIN 1052-2:1988 [23] verschwanden die Tabellen aus der bundesdeutschen Norm.

$$\text{zul } N_1 = \frac{500 \cdot d_n^2}{10 + d_n} \text{ in [N]} \quad (2)$$

Wenngleich durch Johansen [24] schon 1949 die Beschreibung der unterschiedlichen Versagensmechanismen für die heute gültige Betrachtungsweise veröffentlicht wurde, fand sich in DIN 1052-2:1988 [23] jedoch weiterhin mit Gl. (2) eine empirische Formulierung, die ohne mechanischen Bezug blieb. Sie galt nur für Nadelholz unabhängig von der Güteklasse und dem Kraft-Faser-Winkel, näherte sich durch die Berücksichtigung des Durchmessers gut der abnehmenden Lochleibungsfestigkeit bei zunehmendem Durchmesser an und bezog die Streckgrenze des Nagels ($500 \text{ N/mm}^2 \approx 85 \% \text{ der Mindestzugfestigkeit}$) mit ein [13]. Für die Tragfähigkeit günstige Einflüsse aus Laubholzverwendung und/oder Vorbohren wurden über pauschale prozentuale Erhöhungen geregelt.

Die aktuellen normativen Regelungen nach DIN EN 1995-1 [12] beziehen sich auf die bereits erwähnten Johansen-Gleichungen. Ursprünglich wurden von Johansen die verschiedenen Versagensmechanismen von Bolzenverbindungen analytisch untersucht. Jedem Versagensmechanismus wurde eine rechnerische Versagenslast zugewiesen [24]. Ein möglicher Versagensmechanismus einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung, bei dem sich pro Schnitt zwei Fließgelenke bilden, ist in Bild 5 dargestellt.

Für diesen Fall gilt nach Johansen als Grenzlast Gl. (3):

$$P_F = 0,885 \cdot \sqrt{s_B \cdot s_H} \cdot d^2 \quad (3)$$

mit dem Biege­widerstand des Bolzens s_B und der Lochleibungs­festigkeit s_H . Der Biege­widerstand wird heute als Fließmoment $M_{y,Rk}$ bezeichnet. Werner und Siebert [25] untersuchten das Fließmoment von Nägeln mithilfe eines eigens entwickelten Versuchsrahmens und lieferten basierend auf dieser Versuchsauswertung einen Vorschlag für

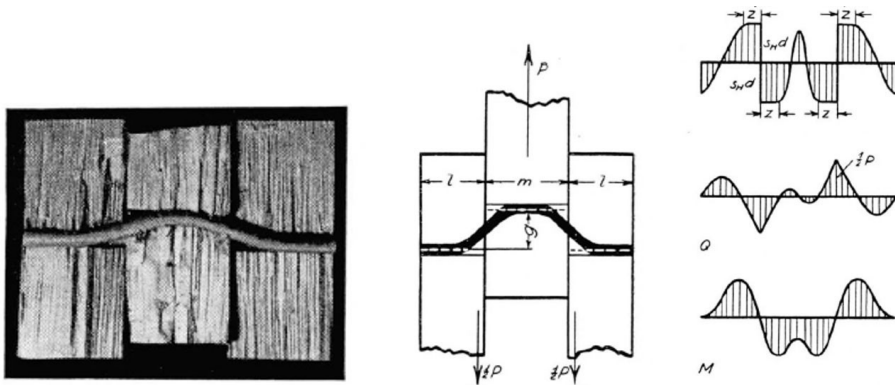


Bild 5 Möglicher Versagensmodus einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung [24]
Possible failure mode of a two-cut wood-wood connection [24]

die charakteristische Fließspannung zur Aufnahme in den Eurocode 5 [12].

2.2 Die Entdeckung des Seileffekts

Mit der Weiterentwicklung der Formulierungen von Johansen beschäftigte sich zuerst Möller [26] und später Meyer [27]. Meyer lieferte einen ersten Ansatz zu einem Phänomen, das früher bereits beobachtet, aber erst durch ihn quantifizierbar wurde: dem sog. Seileffekt. Dazu teilte er die Gesamttragfähigkeit nach Trägerwirkung und Seilwirkung auf und leitete sie analytisch her. Die Trägerwirkung entspricht hierbei der reinen Biegebeanspruchung mit Ausbildung von Fließgelenken in dem Stahlquerschnitt. Die Seilwirkung entsteht durch eine Reibung des Verbindungsmittels an dem Holz, die bei einer Verformung des Verbindungsmittels aktiviert wird. Mithilfe spezieller Versuchsaufbauten trennte er die Einflüsse und bestimmte sie einzeln (Bild 6).

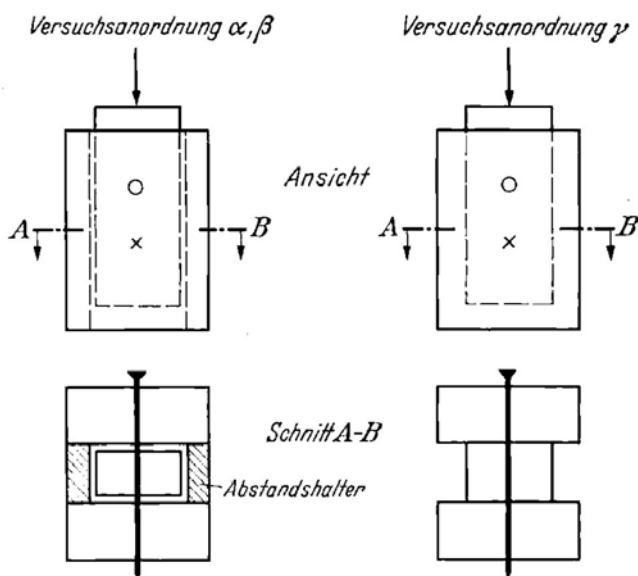


Bild 6 Versuchsanordnungen zur Bestimmung unterschiedlicher Nageltragwirkungen aus [27]
Test setups to determine different nail load-bearing effects from [27]

Er kam zur Erkenntnis, dass die Seilwirkung kurzzeitig zwar einen großen Einfluss hat, dieser jedoch langfristig abnimmt und allgemein zu stark streut, als dass er bei der Berechnung berücksichtigt werden sollte. Die reine Trägerwirkung nach Johansen liefere aber gute Näherungen. Weitere Untersuchungen von Kuipers und van der Put [28] führten dann allerdings doch dazu, dass der Seileffekt normativ verankert wurde. Zunächst war in der DIN 1052:2004 [29] 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) [12] durfte der Seileffekt auch bei Holz-Holz-Verbindungen mit glattschaftigen Nägeln berücksichtigt werden. Der Seileffekt für Nägel ist jedoch nach wie vor nicht vollständig erforscht, wie aktuelle Untersuchungen zeigen [30]. Unter anderem stellt sich die Frage, ob der Seileffekt für geringe Durchmesser ausreichend berücksichtigt wird. In Tab. 1 sind alle wesentlichen Entwicklungsschritte bei der Festlegung der Tragfähigkeit genagelter Verbindungen zusammengefasst. Daraus wird nochmals deutlich, wie lange tabellierte Tragfähigkeiten, die auf den Versuchen insbesondere der 1930er-Jahre beruhen, die Normen des letzten Jahrhunderts bestimmt haben. Erst mit der Umstellung auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept 2004 wurde dieser Bezug abgeschafft.

2.3 Effektive Nagelanzahl in Faserrichtung

Ein Aspekt, der bei der Ermittlung der Gesamttragfähigkeit einer Verbindung wichtig ist, ist die Berücksichtigung mehrerer in Faserrichtung hintereinander angeordneter Verbindungsmittel. Im Falle der Nägel war man sich bereits sehr früh bewusst, dass in hoch beanspruchten Stoßlaschen eine hohe Anzahl hintereinander in Faserrichtung liegender Nägel zu einer Abminderung der Tragfähigkeit führen kann. Unabhängig vom Abstand a_1 und dem Versetzen wurde von 1938 an in der DIN 1052 [17] und später auch in der TGL [31] die Tragfähigkeit des einzelnen Nagels in einer Verbindung mit mehr als zehn Nägeln hintereinander pauschal um 10 % abgemindert, ab einer Anzahl von 20 um 20 %. Die TGL 33135/01:1984 [20] begrenzt die maximale Anzahl an Nägeln allerdings auf 20.

DIN 1052-2:1988 [23] enthielt erstmals eine Formel zur Berechnung der ansetzbaren Nagelanzahl n_{ef} (Gl. (4)):

$$n_{ef} = 10 + \frac{2}{3} (n - 10) \text{ für } n > 10 \quad (4)$$

Mit Einführung der DIN EN 1995-1-1:2010 [12] ist n_{ef} in Abhängigkeit vom Versatzmaß, vom Abstand a_1 und vom Vorbohren mithilfe eines Exponenten k_{ef} zu bestimmen. Bei Versetzen aus der Reihe um $1d$ oder bei $a_1 \geq 14d$ wird die Nagelanzahl nicht abgemindert.

Die Untersuchungsergebnisse von Blaß [32] zur Lastverteilung in Nagelverbindungen bestätigen, dass es bei einem ausreichend großen Abstand der Nägel ($a_1 = 73 \text{ mm} \approx 20 \cdot 3,66 \text{ mm} = 20d$) zu keinem tragfähigkeitsmindernden Einfluss der Nägel untereinander kommt. Blaß zeigte, dass bei bis zu 40 Nägeln die volle Tragfähigkeit jedes einzelnen Nagels erreicht wird.

Zimmer und Lissner [33] beschreiben in ihren Untersuchungen einen lastmindernden Einfluss, wenn der Abstand der einzelnen Nägel untereinander in Faserrichtung stark reduziert wird. Bei entsprechenden Anschlüssen konnte ein Rückgang der Tragfähigkeit um bis zu 30 % beobachtet werden.

2.4 Vergleich der zulässigen Belastungen

Bild 7 zeigt die Entwicklung der zulässigen Belastung eines Nagels je Scherfuge von der DIN 1052:1933 bis zum aktuellen Entwurf des EC5, der prEN 1995-1-1:2022 [10, 12, 20, 21, 23, 31, 34–36]. Hierbei ist d/l das Verhältnis des Nageldurchmessers zu dessen Länge und t die Dicke des angeschlossenen Holzbauteils.

Bis 1988 basierten die Angaben noch auf der Methode der zulässigen Spannungen (deterministisches Sicherheitskonzept). Mit der Einführung der DIN 1052:2004 [29] wurden Einwirkung und Widerstand als charakteristische Werte angegeben und mit Teilsicherheitsbeiwerten zu Bemessungswerten erhöht bzw. abgemindert. Hinzu kommt über den k_{mod} -Wert der Einfluss der Lasteinwirkungsdauer und der Umgebungsbedingungen (Nutzungsklasse). Dieser Übergang erfordert im Folgenden im Sinne der Vergleichbarkeit eine Umrechnung.

Gl. (5) stellt über das Verhältnis von Einwirkung und Widerstand eine Beziehung zwischen zulässigem und charakteristischem Wert der Tragfähigkeit her. Der Faktor α berücksichtigt sowohl die Faktoren auf der Widerstandsseite (α_R) als auch bei den Lasten (α_E) und hängt entsprechend von den Einwirkungen und Umgebungsbedingungen ab [37].

$$\frac{F}{F_{zul}} \equiv \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \Leftrightarrow F_{v,Rk} = \underbrace{\frac{\gamma_M}{k_{mod}}}_{\alpha_R} \cdot \underbrace{\frac{1,35 \cdot g + 1,5 \cdot q}{g + q}}_{\alpha_E} \cdot F_{zul} \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow F_{zul} = \frac{F_{Rk}}{\alpha}$$

Der Regelfall bei der Bemessung sind Lastkombinationen aus ständigen und veränderlichen Lasten (z. B. Eigengewicht und Schnee, Eigengewicht und Wohnraumnutzung) und Bauteile im Innenraum oder geschützten Außenbereich. Dementsprechend ergibt sich der Modifikationsbeiwert k_{mod} zu 0,9 (Schnee) bzw. 0,8 (Wohnraum). Mit dem Material Sicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,3$ zusammen kann nach Gl. (5) α_R mit 1,44 bzw. 1,63 angegeben werden. In Anlehnung an Zimmer und Lissner [37] wird für α_E 1,42 als Mittelwert für im Holzbau übliche ständige und veränderliche Einwirkungen angesetzt. Mit dem Mittelwert für α_R aus den k_{mod} -Werten 0,9 und 0,8 resultiert $\alpha = 2,18$. Zimmer und Lissner [38] verglichen ebenfalls zulässige mit charakteristischer Tragfähigkeit und kamen unter Verwendung leicht abweichender Einzelfaktoren mit $\alpha = 2,06$ zu einem ähnlichen Ergebnis.

Seit 1938 bis zur Einführung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts und der Bemessung nach Grenzzuständen im Jahr 2004 hat sich die Tragfähigkeit für Nägel mit $d \leq 6 \text{ mm}$ nur wenig verändert. Die größten Unterschiede ergaben sich bei der gleichzeitigen Einführung der Johansen-Gleichungen und des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts. Die zulässige Belastung ist nun plötzlich bis zu etwa 30 % geringer, wobei die größeren Differenzen für die kleineren Durchmesser gelten. Das deutet darauf hin,

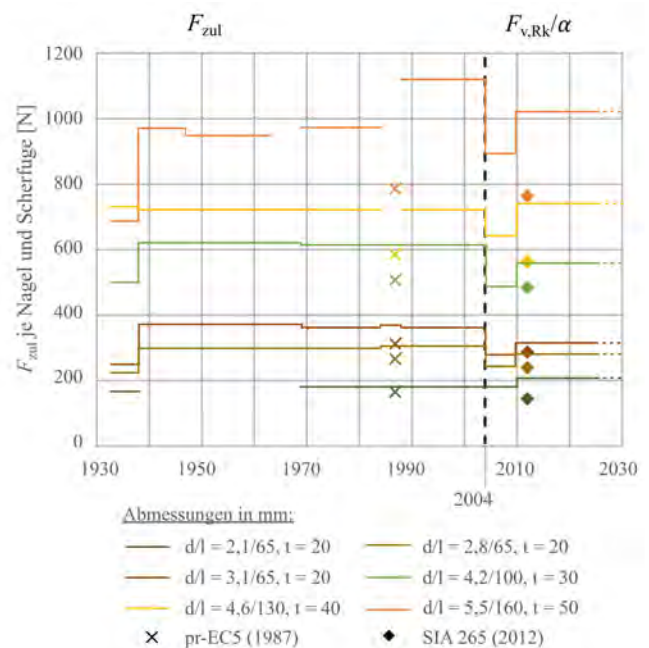


Bild 7 Entwicklung der zulässigen Belastung je Nagel und Scherfuge von 1933 bis heute
Development of the permissible load per nail and shear plane from 1933 to date

dass die ursprünglich für Bolzen ($d \geq 8\text{ mm}$) entwickelten Johansen-Gleichungen bei Nägeln die Tragfähigkeit unterschätzen. Mit Berücksichtigung des Seileffekts, der bei Holz-Holz-Verbindungen mit glattschaftigen Nägeln erst ab 2010 zugelassen wurde, wird dann in etwa der zuvor über viele Jahre gültige Stand hinsichtlich der Tragfähigkeit in einer Scherfuge wieder erreicht. Diese Erkenntnis ist in Bild 7 übersichtlich dargestellt.

In Bild 7 sind zusätzlich die Angaben aus zwei weiteren Normen aufgenommen. Zum einen Gl. (6) aus dem Entwurf des Eurocode 5 aus dem Jahr 1987 [39], bei welcher die charakteristische Rohdichte ρ_k in $[\text{kg}/\text{m}^3]$ und der Nageldurchmesser d in $[\text{mm}]$ mit berücksichtigt werden. Zum anderen ist die in der Schweiz anzusetzende Tragfähigkeit nach SIA 265:2012 [40] dargestellt. Für Nägel ohne Vorbohrung kann nach Gl. (7) die Bemessungstragfähigkeit direkt mit dem Nageldurchmesser d in $[\text{mm}]$ berechnet werden. Unter Berücksichtigung von Gl. (5) kann mit $\alpha_E = 1,42$ die zulässige Tragfähigkeit berechnet werden, um einen direkten Vergleich mit dem globalen Sicherheitskonzept herzustellen. Dabei ist zu erkennen, dass diese Werte zum Teil erheblich unterhalb der Widerstände nach DIN 1052:2004 bzw. EC5 liegen.

$$R_k = 6 \cdot \sqrt{\rho_k} \cdot d^{1,6} \quad (6)$$

$$R_d = 92 \cdot d^{1,7} \quad (7)$$

Bild 7 dokumentiert anschaulich, dass sich die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen in den letzten 100 Jahren kaum verändert hat. Somit kann bestätigt werden, dass die Grundlagenforschung von Stoy, Gaber, Grabbe u.a. in den 1930er-Jahren Ergebnisse lieferte, die über etwa 80 Jahre Bestand hatten und auch bei der Umstellung auf das semi-probabilistische Sicherheitskonzept wegweisend waren. Vergleichbare Erkenntnisse ergaben sich bereits bei den Studien zu den Konstruktionsregeln [41].

3 Nachgiebigkeit von Nagelverbindungen

Während schon früh die Konstruktionsregeln und die Tragfähigkeit im Fokus der Forschung standen und dementsprechend in den Regelwerken berücksichtigt werden konnten, waren Untersuchungen zur Nachgiebigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen, metallischen Verbindungsmitteln im Holzbau über viele Jahre nur vereinzelt zu finden. 1933 wurde eine maximale Verformung von stiftförmigen Verbindungsmitteln im Holzbau unter Gebrauchslast von 1,5 mm angegeben, wobei sich diese ab 1940 bis 1988 nur noch auf Dübelverbindungen bezog. Erst 1988 fanden sich konkrete Angaben in der Norm zur Berechnung von Steifigkeiten und Verformungen stiftförmiger Verbindungsmittel im Holzbau. Die Verformung unter Gebrauchslast sowie das Zusammenwirken unterschiedlicher Verbindungsmittel spielten aber sehr wohl eine Rolle, was offensichtlich bekannt war. Gaber [19] wies nach, dass Leim und Nägel aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten nicht zusammenwirken. In seinen Ver-

suchen zeigte sich, dass die Nägel erst nach dem Versagen der Leimfuge Last abtrugen und es somit keine Lasterhöhung gab. 1940 wurde ein entsprechender Abschnitt in die DIN 1052 [34] aufgenommen, in dem „etwa gleich groß[e]“ Nachgiebigkeit der einzelnen Verbindungsmittel eines Anschlusses gefordert wird. Bezüglich der unterschiedlichen Nachgiebigkeit lieferte man allerdings immer noch keine Zahlen.

Marten [42] beschäftigte sich 1940 eingehend mit dem Verformungsverhalten genagelter Verbindungen und führte Untersuchungen zur Bettung des Nagels im Holz durch (Bild 8). Dabei stellte er eine größere Nachgiebigkeit bei nicht vorgebohrten Nägeln fest, aber keinen Unterschied hinsichtlich der Kraft-Faserrichtung. Andresen [43] stellte 1989 in seiner Veröffentlichung einen Überblick über die Forschung zum Verformungsverhalten des Nagels zusammen und gab zugleich normtaugliche Formeln basierend auf seinen eigenen Versuchen an.

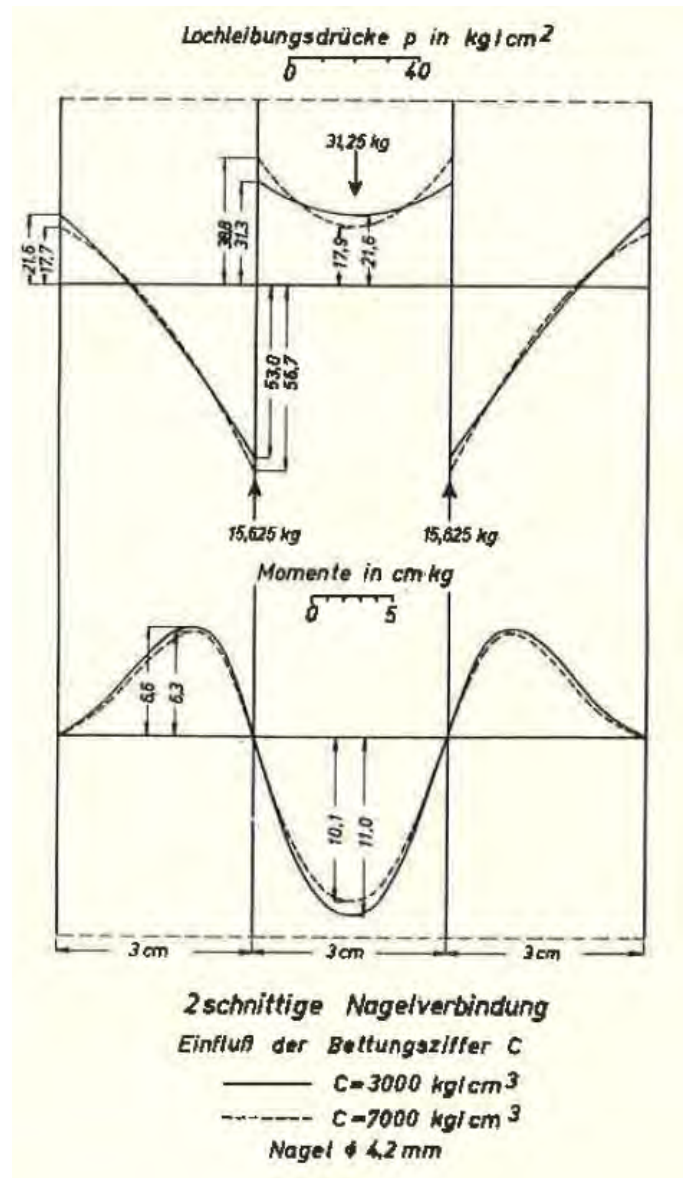


Bild 8 Verteilung von Lochleibungsdruck und Biegemoment abhängig von der Bettungsziffer [42]
Distribution of embedding strain and bending moment depending on the modulus of subgrade reaction [42]

Im Entwurf zur DIN 1052-2:1988 [23] wurde festgelegt, dass es konkreter Angaben zu Verbindungsmittelsteifigkeiten bedurfte, um nachgiebig verbundene Stäbe sowie die Verformungen infolge von Stößen und Anschlüssen an Tragwerken zu berechnen. Von Möhler [44] wurden die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zusammengetragen und es wurden die daraus abgeleiteten Verschiebungsmodul C angegeben, die sich je nach Schnittigkeit, Material und Vorbohrung unterschieden. Zudem waren die Werte von der zulässigen Belastung und dem Durchmesser abhängig. Es wurden nicht alle Vorschläge in die Endfassung 1988 [23, 45, 46] übernommen.

Aktuell definiert der Eurocode den Verschiebungsmodul K_{ser} für vorgebohrte und nicht vorgebohrte Nägel je Scherfuge abhängig von der mittleren Rohdichte und dem Durchmesser, d. h. im Unterschied zur DIN belastungsunabhängig.

4 Zusammenfassung

Nagelverbindungen sind seit 1933 in der deutschen Normung verankert. Zuvor waren keine Nägel für primär lastabtragende Bauteile zulässig. Durch mehrere parallel lau-

fende Forschungsvorhaben, die auf unterschiedlichem Weg zu ähnlichen Ergebnissen kamen, konnten Nagelverbindungen in die Normung aufgenommen werden. Die dabei erzielten Forschungsergebnisse haben im Wesentlichen bis heute Bestand und werden durch neue Erkenntnisse zum besseren Verständnis des Lastabtrags stetig erweitert. Vergleicht man die Tragfähigkeiten von Nägeln in tragenden Holzkonstruktionen seit Einführung in die Normung in Deutschland, so stellt man fest, dass sich die Tragfähigkeit pro Scherfuge eines Nagels in einer Holz-Holz-Verbindung nur geringfügig geändert hat. Ansätze zu Verbindungsmittelsteifigkeiten wurden erst 1988 normativ geregelt und basieren bis heute auf empirisch hergeleiteten Formeln.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurde im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms (SPP) 2255 „Kulturerbe Konstruktion – Grundlagen einer ingenieurwissenschaftlich fundierten und vernetzten Denkmalpflege für das bauliche Erbe der Hochmoderne“ erarbeitet. Für die Finanzierung möchten sich die Autoren herzlich bedanken.

Literatur

- [1] Tasche, M. (2016) *Analyse von Entwicklungssträngen im konstruktiven Ingenieurbau anhand von bestehenden Brücken und Stabtragwerken im Hochbau in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen*. Aachen: Shaker.
- [2] Stoy, W. (1926) *Massenermittlung der Lehrbogen von Wölb- und Bogentragwerken unter besonderer Berücksichtigung der Strebenwerke*. Die Bautechnik 4, H. 53, S. 810–822.
- [3] Stoy, W. (1927) *Beitrag zur wirtschaftlichen Ausbildung von Lehrgerüsten*. Der Brückenbau 16, H. 3, S. 44–45; H. 4, S. 70–71.
- [4] Seidel, E.; Stoy, W. (1933) *Der Holz-Nagelbau*. Berlin.
- [5] Emde, A.; Welteke, K.; Fieseler, M. (2016) *Adorf – Die Geschichte eines Waldeckischen Dorfes*. Adorf: Ortsbeirat Adorf, Eigenverlag.
- [6] Rug, W. (2003) *100 Jahre Holzbau- und Holzbau Forschung in: BDZ [Hrsg.] 100 Jahre Bund Deutscher Zimmermeister, 100 Jahre Verband, Holzbau, Holzbau Forschung 1903–2003*. Berlin: Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ).
- [7] Stoy, W. (1930) *Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmittel*. Konstruktion und Ausführung 64, H. 19, Beilage der DBZ, S. 141–146.
- [8] Dröge, G. (1955) *25 Jahre Holznagelbau in Versuch und Praxis*. Die Bautechnik 32, H. 2, S. 37–44.
- [9] Seraphin, M. (2003) *Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus – eine Entwicklungsgeschichte*. Aachen: Shaker.
- [10] DIN 1052:1933-07 (1933) *Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 1933.
- [11] Preuß, M. (1921) *Eiserne Bolzen im Holzbau*. Der Holzbau 1921, H. 23, S. 89–92.
- [12] DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2010.
- [13] Linzner, P. (1993) *Neue Aspekte zum Trag- und Verformungsverhalten von Nägeln in Hirn- und Seitenholz* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- [14] Stoy, W. (1935) *Tragfähigkeit von Nagelverbindungen im Holzbau*. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen, H. 11, S. 1–46.
- [15] Gaber, E. (1933) *Untersuchungen über Nägel und genagelte Bohlenträger*. Bericht über die Sitzungen der Holztagung 1933, S. 36–39.
- [16] Grabbe, H. (1935) *Die Festigkeit der zweischnittig genagelten Holzverbindungen bei gleicher und ungleicher Holzstärke* [Dissertation]. Technische Hochschule Carolo Wilhelmina.
- [17] DIN 1052:1938-05 (1938) *Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Mai 1938.
- [18] Stoy, W. (1935) *Tragfähigkeit von Nagelverbindungen im Holzbau*. Schweizerische Bauzeitung, H. 7, S. 105–106.
- [19] Gaber, E. (1935) *Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen*. Versuchsanstalt für Holz, Stein und Eisen, H. 3.
- [20] TGL 33135-01:1984-01 (1984) *Holzbau: Tragwerke – Berechnung und bauliche Durchbildung*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen. Ausgabe Januar 1984.
- [21] DIN 1052 Blatt 1:1969-10 (1969) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 1969.
- [22] Fonrobert, F. (1948) *Grundzüge des Holzbaues im Hochbau. Ein Leitfaden für Studium und Praxis*. Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn.
- [23] DIN 1052-2:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Mechanische Verbindungen*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.
- [24] Johansen, K. W. (1949) *Theory of timber connections*. IABSE publications – IVBH Abhandlungen 9, pp. 249–262. <https://doi.org/10.5169/SEALS-9703>

- [25] Werner, H.; Siebert, W. (1991) *Neue Untersuchungen mit Nägeln für den Holzbau*. Holz als Roh- und Werkstoff 49, S. 191–198.
- [26] Möller, T. (1950) *En ny metod för beräkning av spikförband*. Chalmers Tekniska Högskolas Handlingar 117.
- [27] Meyer, A. (1957) *Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung*. Holz als Roh- und Werkstoff 15, H. 2, S. 96–109.
- [28] Kuipers, J.; van der Put, T. (1982) *Betrachtung zum Bruchmechanismus von Nagelverbindungen*. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, S. 99–106.
- [29] DIN 1052:2004-08 (2004) *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe August 2004.
- [30] Svensson, S.; Munch-Andersen, J. (2018) *Theory of timber connections with slender dowel type fasteners*. Wood Material Science & Engineering 13, No. 1, pp. 7–15.
- [31] TGL 112-0730:1963-02 (1963) *Tragwerke aus Holz – Projektierung*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen. Ausgabe Februar 1963.
- [32] Blaß, H. J. (1991) *Zum Einfluss der Nagelanzahl auf die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen*. Bauen mit Holz, H. 1, S. 21–26.
- [33] Zimmer, K.; Lißner, K. (1992) *Untersuchungen über die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei einer Beanspruchung senkrecht zur Schaftrichtung*. Holz als Roh- und Werkstoff 50, S. 181–185.
- [34] DIN 1052:1940-12 (1940) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 1940.
- [35] DIN 1052:1947-10 (1947) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 1947.
- [36] CEN/TC 250/SC 5 N1650 prEN 1995-1-1 (2022) *Entwurf des Eurocode 5 – Consolidated version of EN 1995-1-1 dated September 2022*.
- [37] Zimmer, K.; Lißner, K. (1989) *Calculation of joints and fastenings as compared with the international state*. International Council for Building Research Studies and Documentation/Working Commission W18A – Timber Structures.
- [38] Zimmer, K.; Lißner, K. (1992) *Berechnung von Verbindungsmitteln im Vergleich zum internationalen Stand*. Holz als Roh- und Werkstoff 50, S. 53–56.
- [39] Commission of the European Communities (1987) *Common Unified Rules for Timber Structures: Eurocode No. 5 – Report EUR 9887*.
- [40] SIA 265:2012 (2012) *Holzbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [41] Fischer, J.; Schwendner, S.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln*. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen). <https://doi.org/10.1002/bate.202200099>
- [42] Marten, G. (1940) *Über die Kraftübertragung in Nagelverbindungen*. Forschungsberichte Holz 1940, Nr. 7.
- [43] Andresen, K. (1989) *Klassifizierung der Verbindung nach der Steifigkeit des Anschlusses* [Forschungsbericht]. Technische Universität Berlin.
- [44] Möhler, K. (1986) *Verschiebungsgrößen mechanischer Holzverbindungen der DIN 1052, Teil 2* (Entwurf 1984). Bauen mit Holz, H. 4, S. 206–214.
- [45] DIN 1052-1:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.
- [46] DIN 1052-3:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Holzhäuser in Tafelbauart/Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.

Autor:innen

Dr.-Ing. Sascha Schwendner (Korrespondenzautor:in)
s.schwendner@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Jens Fischer, M.Sc.
fischer.jj@t-online.de
Zur Lieth 13
59939 Olsberg

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim
wseim@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Dr.-Ing. Iris Engelmann
iris.engelmann@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Architektur
Geschwister-Scholl-Straße 8
99423 Weimar

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schwendner, S.; Fischer, J.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Nägel im Holzbau – die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens*. Bautechnik 100, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 64–72. <https://doi.org/10.1002/bate.202200100>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 01. Dezember 2022; angenommen: 01. August 2023.

Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln

Der metallische Nagel als tragendes Verbindungsmittel in Holzkonstruktionen ist heute weitverbreitet. Doch noch vor 100 Jahren war das anders: sein statisch konstruktiver Gebrauch war in Deutschland nicht normativ geregelt. Das änderte sich Ende der 1920er-Jahre, als damit begonnen wurde, genagelte Verbindungen systematisch zu erforschen. Seit 1933 ist der Nagel Bestandteil der deutschen Regelwerke und findet seitdem breite Verwendung. Über weite Teile des 20. Jahrhunderts diente er in Not- und Sparkonstruktionen wie Brett- und Bohlenbindern als hocheffizientes Verbindungsmittel der Wahl. Diese materialsparenden Tragwerke waren in Zeiten wiederkehrender Ressourcenknappheit sehr gefragt und gehören damit zur Konstruktionsgeschichte des Holzbaus. In diesem Beitrag wird über die Forschung zur Anwendung von Nägeln in Holzkonstruktionen und die einhergehend fortlaufende Normierung berichtet. Die stufenweisen Fortschritte werden vorgestellt. Anhand eines Zeitstrahls werden Zusammenhänge zwischen Forschung und Normung gezeigt. Tabellen und Grafiken verdeutlichen die Änderungen innerhalb der Normen von der ersten DIN 1052 im Jahr 1933 über die erste eigenständige Holzbaunorm in der DDR, die TGL 112-0730, aus 1963 bis zur DIN 1052-1988. Abschließend wird Bezug zum derzeitigen Entwurf des Eurocode 5 genommen. Allgemein zeigt sich, dass ein Großteil der heute immer noch gültigen Kenntnisse auf die Grundlagenforschung der 1930er-Jahre zurückgeht.

Stichworte DIN 1052; Mindestabstände; Nagel; Nagelverbindungen; TGL 33135/01; Tragfähigkeit

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 der BRD in den 1970er-Jahren war der Nagel auch ein bevorzugtes Verbindungsmittel bei den sog. Brett- und Bohlenbindern, welche in unterschiedlichen Formen v.a. 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. In den Trägern ergänzten sich die vergleichsweise dünnen Stahlstifte optimal mit den schmalen Holzquerschnitten. Die Nägel wurden bei Vollwandbindern flächig verteilt, bei Fachwerkknoten da-

Nails in wood construction – fundamental research and continuous standardisation

The nail as a load-bearing timber fastener is well known today. But 100 years ago, it was different: its structural use was not allowed. This changed with the beginning of systematical research at the end of the 1920s. Since 1933, the nail has been part of the German regulations and has been widely used ever since. For much of the 20th century, it served as the highly efficient fastener of choice especially in roof structures such as board and plank trusses. These material-saving load-bearing structural elements were always in demand due to the periodically recurring scarcity of material resources and are an important part in construction history. The following article deals with the research of the load-bearing behaviour of nails and the standardisation that has constantly accompanied it. The achievements of individual research projects are presented. A timeline shows the connections between research and standardisation. Tables and graphics illustrate the changes within the standards from the first DIN 1052 in 1933 to the first independent timber construction standard in the DDR, TGL 112-0730, from 1963 to DIN 1052-1988. Reference is always made to the Eurocode 5 valid today. In general, it can be seen that a large part of today's knowledge still goes back to the basic research of the 1930s.

Keywords wood-wood-connection; nail; experimental investigations; DIN 1052; TGL; minimum distances; load bearing capacity

gegen 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.

Bei Fachwerken im Ingenieurholzbau wurden Bohlen durch Brettschichtholz und Nägel durch andere Verbindungsmittel verdrängt. So werden Knotenpunkte heute überwiegend mit eingeschlitzten Blechen und Stabdübeln gefügt. Nägel wurden auch zeitweise bei Fachwerken mit dünnen, durchgenagelten Blechen (z.B. System Greim) oder mit aufgenagelten 5-mm-Blechen und Gelenkwellen verwendet. Solche Sonderformen werden in diesem Aufsatz nicht betrachtet. Allerdings ergeben sich im Zusammenhang mit genagelten Konstruktionen auch aktuelle Fragestellungen. Beispielsweise können bestehende Dächer für Photovoltaikanlagen genutzt oder rückgebaute

Binder an anderer Stelle einer neuen Nutzung zugeführt werden.

Die systematische Erforschung der Nagelverbindungen begann in Deutschland in den späten 1920er-Jahren, maßgeblich durch Gaber, Grabbe und Stoy (u. a. [1–5]), und führte schnell zur Akzeptanz der Nagelbauweise innerhalb des Bauwesens. Das spiegelt sich in der Aufnahme der Nagelverbindung in die Holzbaunorm DIN 1052:1933 [6] wider. Davor, in den „Vorläufigen Bestimmungen für Holztragwerke“ der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft [7, 8], 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. Dabei liegt der Schwerpunkt bei den Beiträgen aus dem deutschsprachigen Raum. Eine Würdigung der Forschungsarbeiten z. B. im angelsächsischen Raum [9–15] soll vorläufig zurückgestellt werden. Eine gute Übersicht zu Konstruktionsweisen in Deutschland von 1928 bis 1989 findet sich bei Engelmann [16].

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 [17]. Dabei behandelte er auch die genagelte Holzverbindung. Die zeitlichen Abläufe zu deren Erforschung und Regelung wurden unter Bezug auf einzelne Protagonisten und verschiedene Tragwerke insbesondere in den Anfangsjahren detailliert erläutert und lieferten so einen guten Überblick über die geschichtliche Entwicklung mit einigen Hintergrundinformationen. Die Abfolge der Normen wurde in Tabellenform präsentiert und Neuerungen allgemein und knapp wiedergegeben. Insgesamt wurden aber keine zahlenmäßigen Angaben zu bspw. Konstruktionsregeln und Tragfähigkeiten gemacht. Im Gegensatz dazu beschrieb Linzner 1993 in Kapitel 5 seiner Dissertation umfassend die Entwicklung der analytischen Berechnungsverfahren von den Anfängen bis zum heute angewandten Verfahren [18]. Der vorliegende Aufsatz kann als eigenständige Ergänzung zu den erwähnten Veröffentlichungen gesehen werden. Es wird anhand von Tabellen und Diagrammen mit Darstellung der Rechenwerte gezeigt, wie sich die Erforschung und Reglementierung des Nagels in den letzten 100 Jahren entwickelt hat. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Konstruktionsregeln. In einem eigenen Beitrag wird das Tragverhalten der genagelten Verbindung behandelt [19]. Neben Formeln und Tabellen werden dort auch die wesentlichen Randbedingungen sowie die Angaben zur Nachgiebigkeit und dem Verformungsverhalten einzelner Nägel und von Holz-Nagel-Verbindungen erläutert.

1.1 Forschung und Normung – Übersicht

Bild 1 zeigt die Entwicklung von Forschung und Normung zu genagelten Verbindungen im 20. Jahrhundert beginnend mit der Veröffentlichung von Preuß [20] zu eisernen Bolzen, die erste Berechnungsansätze einer Holzverbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln beinhaltete. Im Zeitstrahl sind Forschungsbeiträge blau umrandet, die für die einzelnen Themen von besonderer Bedeutung sind. Auf der Grundlage der wegweisenden Forschungsergebnisse der 1930er-Jahre wurden in die DIN 1052:1933 erstmals Regeln für tragende Nagelverbindungen aufgenommen. Als Protagonisten sind hier v. a. Stoy, Gaber und Grabbe zu nennen [1–5]. Stoy begann bereits im Sommer 1928 mit Versuchen. Konkreter Anlass war der Neubau einer Turnhalle in Adorf (Hessen) mit einem Nagelbinder von 16 m Spannweite [4].

Bis 1960 waren Nägel im Holzbau ein wichtiges Forschungsthema. Die rasch hinzugewonnenen Erkenntnisse ermöglichten in vergleichsweise kurzer Abfolge in den Jahren 1938–1947 erweiterte Ausgaben der DIN 1052 [21–23]. Während Johansens Aufsatz [24] mit einem auf die Plastizitätstheorie aufbauenden Ansatz weitgehend unbeachtet blieb, lieferten die Arbeiten von Egner und Fonrobert [25, 26] wichtige Erkenntnisse in Bezug auf Mindestabstände und Auszugstragfähigkeit. Eine Vielzahl der bis zu den 1960er-Jahren gewonnenen Erkenntnisse hat bis heute Bestand.

Ab 1963 gab es mit der TGL 112-0730 [27] eine eigenständige Holzbaunorm in der DDR (TGL = Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen). 1969 erschien die aktualisierte DIN 1052 [28]. Die Entwicklung der DIN in der BRD und der TGL in der DDR verlief in den folgenden Jahren weitestgehend parallel. Möglicherweise sollte dadurch der innerdeutsche Holzhandel möglichst einfach bleiben, wie Rug [29] vermutet.

Im Vergleich zu den vergangenen Jahrzehnten wurde in den 1960er- und 1970er-Jahren eher wenig zu genagelten Verbindungen geforscht. Der einzelne Nagel geriet durch die Einführung der Nagelplatten aus den USA in der BRD in den 1970er-Jahren aus dem Blickfeld. In der DDR griff man allerdings weiter auf den Nagel als Verbindungsmittel bei Brettbindern zurück, weitgehend auf Grundlage der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse. Die Forschung widmete sich v. a. den Themen, die sich abhängig von der technischen Entwicklung (z. B. Sondernägel [30]) oder aufgrund offener Fragen, z. B. hinsichtlich Nachgiebigkeit [25, 31–33] und kombinierter Beanspruchung [34], ergaben. Dadurch erhielten immer mehr Aspekte ihren Platz in der Norm, wodurch der Umfang steigt. Mit der TGL 33135/01 [35] und den DIN 1052-1 bis DIN 1052-3 [36–38] kamen 1984 bzw. 1988 die letzten großen Änderungen auf Basis der Methode der zulässigen Spannungen, ehe 2004 mit der DIN 1052:2004 [39] die absehbaren Entwicklungen des Eurocodes übernommen wurden.

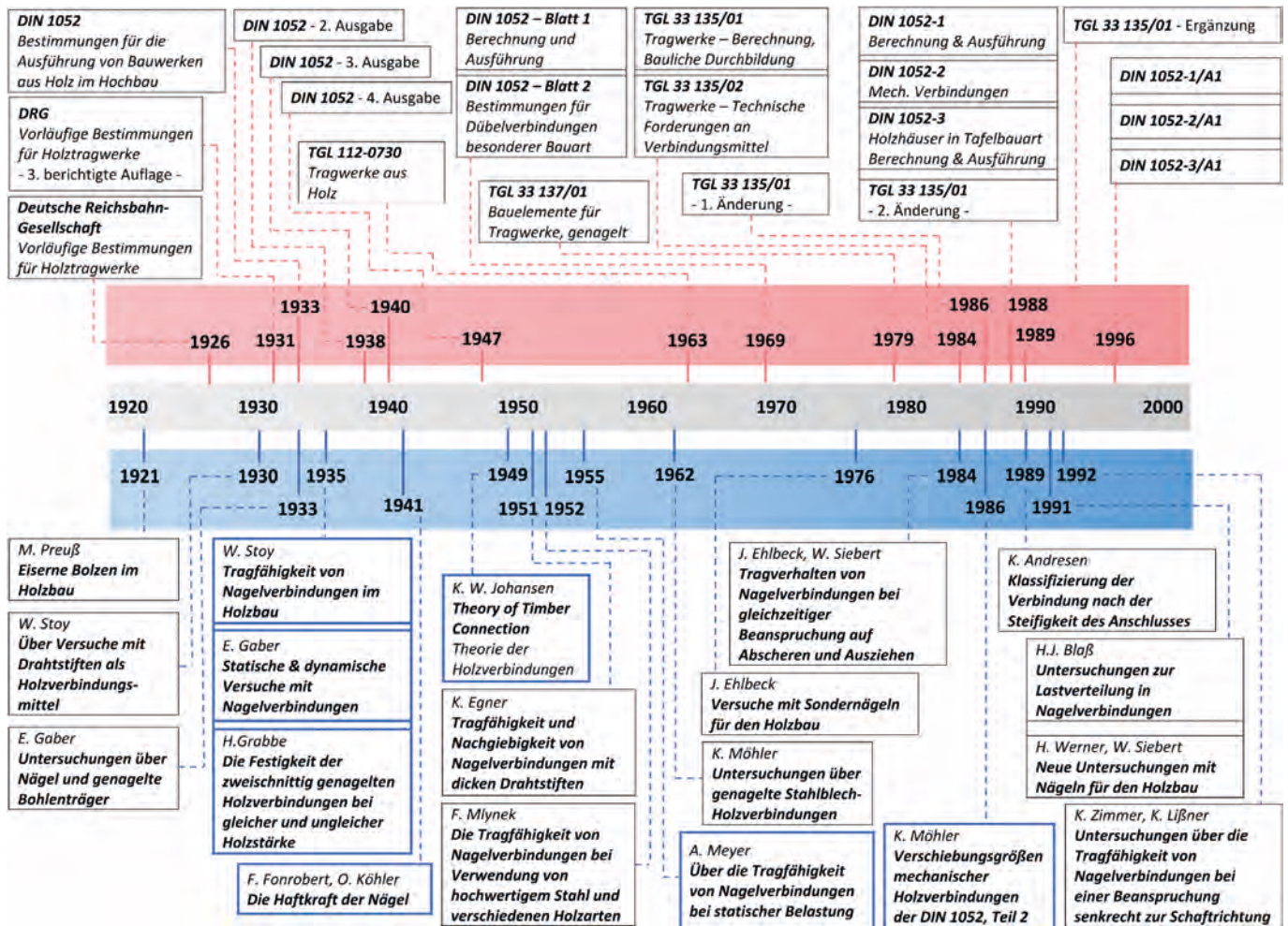


Bild 1 Zeitstrahl zur Entwicklung von Forschung und Normung genagelter Verbindungen
Timeline of the development of research and standardization of nailed connections

Im Folgenden soll noch ein kurzer Überblick zu benachbarten Themen gegeben werden. Die DIN 1052:1947 [23] enthielt erstmals Angaben zur Auszugstragfähigkeit von Nägeln bei Schalungen, Sparren und Pfetten. Bis dahin waren Nägel nur für eine Beanspruchung auf Abscheren genormt. Die Regelungen zur Beanspruchung auf Herausziehen gehen im Wesentlichen auf die Arbeit von Fonrobert und Köhler [26] zurück. In der DIN 1052:1988 [37] wurde dann auch die kombinierte Beanspruchung auf Abscheren und Herausziehen auf der Grundlage der Arbeiten von Ehlbeck und Siebert [34] geregelt.

In den Jahren 1963 und 1969 wurden Holzwerkstoffplatten und Bleche in die Normen DIN 1052:1963 [27] bzw. DIN 1052:1969 [28] aufgenommen. Im Jahr 1962 lieferte Möhler mit seinen Untersuchungen zu Nägeln in Stahlblech-Holz-Verbindungen einen wichtigen Beitrag zur Aufnahme dieser damals neuartigen Verbindung in die Normen [40].

Angaben zu Sondernägeln, die einen profilierten Schaft aufweisen, tauchten zum ersten Mal in DIN 1052:1969 auf [28]. Zunächst waren nur wenige Angaben enthalten. Diese wurden 1988 präzisiert [37] auf der Grundlage der Untersuchungen von Ehlbeck [28] zu Sondernägeln im Holz-

bau. Erste Versuche mit Schraubennägeln führte allerdings bereits Stoy 1934 durch [41].

1.2 Tragelemente mit genagelten Verbindungen

Die Erforschung von und die normativen Regelungen zu genagelten Verbindungen ermöglichten die Entwicklung neuartiger materialsparender Konstruktionen. Einen umfassenden Überblick dazu gibt der Beitrag von Engelmann et al. [16]. Im Folgenden werden die wichtigsten Entwicklungsschritte aufgeführt.

Erste Untersuchungen und Ausführungen fanden im Hallenbau statt [16]. Ab 1928 entwarf Wilhelm Stoy Brettbinde als genagelte Mansard- oder Parabelbinde in Fachwerkausführung mit Spannweiten zwischen 16 m und 20 m [42,43]. Auf der Frühjahrsmesse 1933 in Leipzig zeigte Erich Seidel einen ersten Kantholzbinder in Dreiecksform, bei dem die Gurte aus Kanthölzern und die Zugdiagonalen aus Brettern angenagelt wurden [42]. Vor dem Hintergrund der äußerst sparsamen Nutzung von Bauholz und der besseren Kenntnis zur Tragfähigkeit von Nagelverbindungen versuchten die entwerfenden Ingenieure jedoch auch das Kantholz wiederum durch Bretter zu ersetzen [19]. Ab 1935 kamen – ausgelöst durch Forschungen für

den Kriegsbrückenbau – Vollwandbinder auf [44]. Diese wurden als Doppel-T- oder Kasten-hohlprofile aus schräg gestellten kurzen Brettern für die Stege und längeren Brettern oder schwachen Kanthölzern für die Gurte zusammengenagelt und zunächst für Spannweiten zwischen 10m und 20m eingesetzt.

Vollwandbinder für Sparrendächer, die bei geringen Spannweiten hochkant gestellte Bretter nutzten, finden sich bei den Bauweisen für den Gagfah- und die Vollmar-Binder [45,46]. Weitere Sparkonstruktionen mit Tragelementen, die aus zusammengesetzten Doppel-T- oder Hohlkastenquerschnitten bestanden und dabei Nägel und zum Teil auch Leim verwendeten, entwickelten Barffknecht, Maerz, Trysna, Lüer und Birkmann [46,47].

Dort, wo größere Spannweiten gefordert waren, kamen Fachwerkbinder aufgrund des geringeren Holzverbrauchs

zum Einsatz. Während der Kelwies-Binder eine ebene Fachwerk-konstruktion zeigte [48–51], bildeten das Kroher- und das Kasten-Gitter-Dach durch die Kombination zweier ebener Fachwerkträger räumliche Gitterträger aus [52,53]. In Bild 2 sind die Bindertypen von Kroher und Kelwies dargestellt.

Bei diesen Sparkonstruktionen war es erforderlich, auf der vorgegebenen Übergreifungsfläche an den Knoten möglichst viele Nägel unterzubringen. Aus diesem Grund waren die Konstruktionsregeln zu den Randabständen genauso wichtig wie die Regeln für die Bemessung. Sowohl in Ost- als auch in Westdeutschland wurden Nagelbrettbinder in den Wiederaufbaujahren aufgrund ihres effizienten Materialeinsatzes häufig verwendet und oft typisiert. Bild 3 zeigt eine Konstruktionszeichnung eines typisierten Nagelbrettbinders.

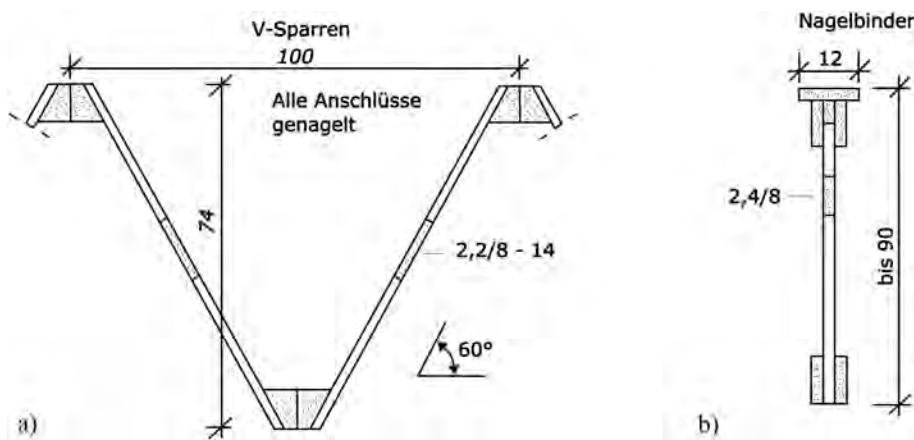


Bild 2 Konstruktionszeichnung des Kroher-Dachs (a) und des Kelwies-Binders (b) nach [54]
Construction drawing of the Kroher-roof (a) and the Kelwies-beam (b) nach [54]

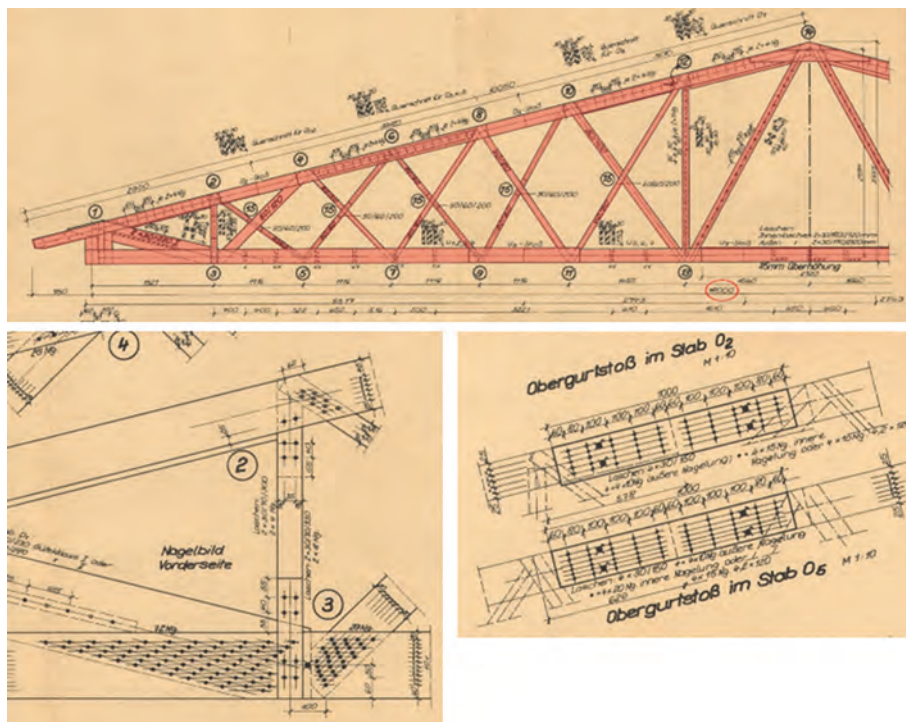


Bild 3 Institut für Bauelemente und Faserbaustoffe Leipzig: Konstruktionszeichnungen Typ BS 148.1, 1972 (Archiv V. Mund, Weimar)
Institute for Construction Elements and Fibre Building Materials Leipzig: construction drawings type BS 148.1, 1972

Dabei kamen im Wesentlichen ebene Fachwerkbrettbin- der zum Einsatz, die auf DDR-Gebiet aufgrund der zentral gesteuerten Typenprojektierung und des Devisenmangels zur Einführung wirtschaftlicherer Alternativen bis 1991 äü- berst optimierte Konstruktionen hervorbrachte.

2 Werkstoffe

Das Holz und die Nägel unterlagen vor 1933 keinen ein- heitlichen Regelungen. Der Verweis auf DIN 4074:1939 „Bauholz, Gütebedingungen“ [55] war zum ersten Mal in DIN 1052:1940 [22] zu finden. Weitere Ausgaben der DIN 4074 erschienen 1958 und 1989 mit Unterscheidungen zwischen Schnitt- und Rundholz in den Teilen 1 und 2 [56– 58]. Die Einführung der Güteklassen I, II und III stellte ei- nen wichtigen Entwicklungsschritt hin zu einer gesicherten Qualitätskontrolle dar. Die Güteklassen waren die Vorläu- fer der heutigen Sortierklassen S7, S10 und S13.

Ab 1989 wurden die Schnittholzabmessungen in die DIN 4074-1 [58] einbezogen und stellten einen Anhalts- punkt für die Sortierung dar. Als Bretter gelten bis heute Hölzer mit Dicken von $t \leq 40\text{ mm}$ und einer Breite von $b \geq 80\text{ mm}$, als Bohlen mit $t > 40\text{ mm}$ und $b > 3t$.

Heute werden Anforderungen an Bauholz in der DIN EN 14081-1:2019 [59] geregelt, die Festigkeitsklassen sind in DIN EN 338:2016 [60] angegeben. Auf den Über- gang vom deterministischen zum semiprobabilistischen Si- cherheitskonzept wird in dem Beitrag von Schwendner et al. [19] eingegangen.

Die Festlegung zulässiger Nageltypen unterlag seit der Einführung der DIN 1052:1933 [6] ebenfalls einem Wan- del. Am Anfang waren runde und kantige Nägel mit un- terschiedlichen Kopfformen nach DIN 1151, DIN 1152 und DIN 1154 [61–63] zur Verwendung in Holzkonstruktionen zugelassen. Neben den Kopfformen war klar definiert, wel- che Abmessungen (Durchmesser d , Länge l) verwendet werden durften. Ab 1940 waren nur noch runde Nägel mit Flach- und Senkkopf nach DIN 1151 [61] zulässig. In der DDR beschränkte man sich 1963 mit der zur DIN 1151 textgleichen A TGL 0-1151 [64] auf Nägel mit Senkköpfen, wobei Nägel allgemein ab 1984 mit der TGL 36 433 [65] in

der DDR eine eigenständige Norm erhielten. Die DIN 1052:1969 [28] räumte die Möglichkeit ein, abwei- chende Nagelformen und -werkstoffe, d.h. im Wesentli- chen Sondernägel, nach vorheriger Prüfung zuzulassen. Die Eignungsprüfung für Sondernägel erhielt 1988 einen eigenen Anhang. Sondernägel wurden fortan in drei un- terschiedliche Tragfähigkeitsklassen eingeordnet. Explizit wurde 1988 auch zum ersten Mal die Zugfestigkeit des Na- geldrahts mit mindestens 600 N/mm^2 definiert. Vorher war sie nur indirekt in der Formel für die zulässige Nageltragfä- higkeit enthalten. Neben runden Senkkopfnägeln sind zu- dem runde Maschinenstifte nach DIN 1143 Teil 1 [66] zu- lässig. Weiterhin werden Ausnahmen zur Nagellänge ge- stattet und Angaben zum Mindestkopfdurchmesser und zur Mindestlänge der Nagelspitze gemacht. Beharzte Stifte sind ebenso erlaubt wie abweichende Kopfformen, sofern die Kopffläche mehr als $2,5d^2$ beträgt.

Aktuell regelt die DIN EN 14592:2022 [67] die Anforde- rungen an Verbindungsmittel allgemein sowohl in Bezug auf die Festigkeiten als auch auf die Geometrie. Dort sind glattschaftige wie profilierte Nägel mit unterschiedlichen Kopfformen definiert. Die Mindestzugfestigkeit des Drahts beträgt nach wie vor 600 N/mm^2 .

3 Konstruktionsregeln

Konstruktionsregeln stellen sicher, dass die experimentell abgesicherte Tragfähigkeit auch erreicht wird und kein vorzeitiges, ungewolltes Versagen eintritt. Konstruktions- regeln 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 Re- geln, wie das Versetzen in Faserrichtung oder das Vorbohren einer Verbindung, spielen eine wichtige Rolle. In Bild 4 sind alle geometrischen Abmessungen im Zusam- menhang mit den hier behandelten Konstruktionsregeln in einer Isometrie eines typischen Brettbinderknotens darge- stellt.

Die Notation und Begrifflichkeiten der normierten Min- destgrößen haben sich im Laufe der Jahre verändert oder sind ergänzt worden. Zur allgemein besseren Verständlich-

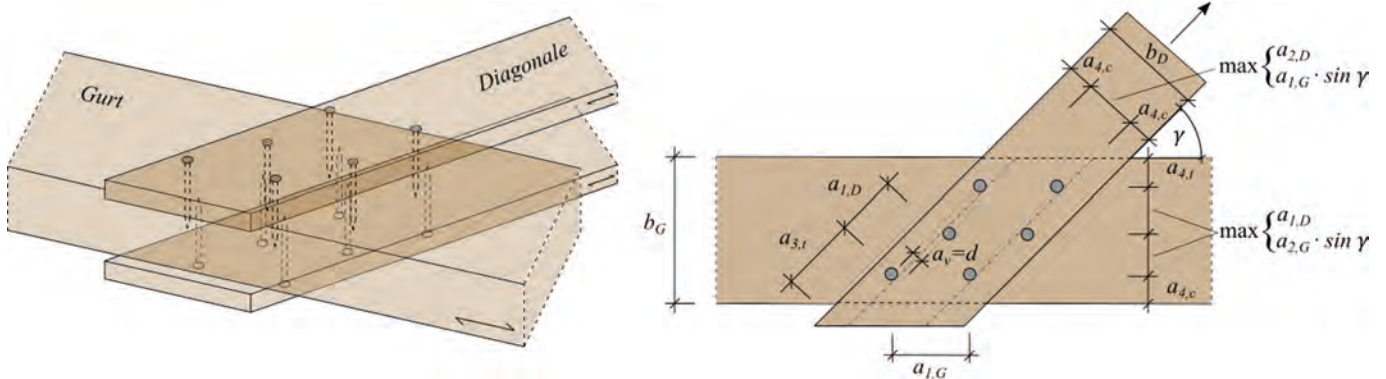


Bild 4 Isometrie einer typischen Brettbinderverbindung mit allen geometrischen Größen
Isometry of a typical board truss connection with all geometric sizes

keit werden die Begriffe und Formelzeichen nach der aktuell gültigen Norm – der DIN EN 1995-1-1/NA [68,69] – verwendet. Die normativen Regelungen zu Nägeln von 1938 bis zum derzeit aktuellen Entwurf des Eurocode 5, bezeichnet als prEN 1995-1-1 [70], sind in den Tab. 1, 2 zusammengefasst. Dort, wo es möglich war, werden direkte Querbezüge zwischen den Ergebnissen konkreter Forschungsvorhaben und entsprechenden ergänzten oder angepassten normativen Regelungen angegeben. Dies ist allerdings nur an wenigen Stellen der Fall, sodass davon auszugehen ist, dass die Forschungsergebnisse in den entsprechenden Normungsgremien diskutiert, aber nicht unverändert übernommen wurden.

3.1 Nagelabstände

Ein wesentlicher Aspekt bei einer Holzverbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln allgemein 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. Die wohl auf Schaechterle [71] zurückgehende Regelung, nach der der Mindestabstand so festzulegen ist, dass ein Ausreißen der gesamten Verbindung im Holz, ein sog. Blockscheren, ausgeschlossen wird, lässt sich auf genagelte Verbindungen übertragen.

Basierend auf den Forschungsergebnissen von Gaber [1,2] und Stoy [4,5] enthielt DIN 1052:1938 [21] erstmals konkrete Angaben zu den Mindestabständen, die nur von d abhängen und nicht vom Kraft-Faser-Winkel. Im Wesentlichen sind diese Werte bis heute unverändert (Bild 5) (Tab. 1). Die einzige größere Anpassung betrifft den Abstand in Faserrichtung vom beanspruchten Hirnholze $a_{3,t}$. Bei Untersuchungen von Fonrobert [72] 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 [25] lieferte eine Untersuchung für dicke Nägel ($d \geq 6\text{ mm}$), in der eine Erhöhung für $a_{3,t}$ von $12d$ auf $15d$ empfohlen wurde. Dröge [73] empfiehlt für $a_1 = 15d$

Tab. 1 Regeln von Nagelabständen in Holzbaunormen von 1938 bis heute
Minimum distances in timber construction standards from 1938 to date

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	
a_1	nvb	$10d$	$10d$	$10d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $12d$)	$10d$	$10d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $12d$)	$d < 5\text{ mm}$: $(5 + 5 \cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $(5 + 7 \cos \alpha)d$	$d < 5\text{ mm}$: $10d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $12d$
	vb	–	–	$5d$	$5d$	$5d$	$(4 + \cos \alpha)d$	$5d$
a_2	nvb	$5d$	$3,5d$ ¹	$5d$	$5d$ ³	$5d$	$5d$	$5d$
	vb	–	–	$5d$	$3,5d$	$5d$	$(3 + \sin \alpha)d$	$4d$
$a_{3,c}$	nvb	$5d$	$7d$	$7d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $10d$)	$7d$	$7d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $10d$)	$10d$	$10d$
	vb	–	–	$5d$	$5d$	$5d$	$7d$	$7d$
$a_{4,c}$	nvb	$5d$	$5d$	$5d$	$5d$	$5d$	$5d$	$5d$
	vb	–	–	$3d$	$3,5d$	$3d$	$3d$	$3d$
$a_{3,t}$	nvb	$12d$	$15d$	$15d$	$15d$	$15d$	$(10 + 5 \cos \alpha)d$	$15d$
	vb	–	–	$10d$	$10d$	$10d$	$(7 + 5 \cos \alpha)d$	$12d$
$a_{4,t}$	nvb	$5d$	$7d$	$\alpha \geq 30^\circ$: $7d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $10d$) $\alpha < 30^\circ$: $5d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $7d$)	$5d$ ⁶	$\alpha \geq 30^\circ$: $7d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $10d$) $\alpha < 30^\circ$: $5d$ ($d > 4,2\text{ mm}$: $7d$)	$d < 5\text{ mm}$: $(5 + 2 \cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $(5 + 5 \cos \alpha)d$	$d < 5\text{ mm}$: $7d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $10d$
	vb	–	–	$5d$	$5d$	$5d$	$d < 5\text{ mm}$: $(3 + 2 \cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $(3 + 4 \cos \alpha)d$	$d < 5\text{ mm}$: $5d$ $d \geq 5\text{ mm}$: $7d$
$a_{1,max}$	–	–	$40d$	$40d$	$40d$	$40d$	$40d$	$40d$
$a_{2,max}$	–	–	$20d$	$20d$	$20d$	$20d$	$20d$	$20d$

¹ bei Stabanschluss von 180° : $5d$; bei versetzter Anordnung red. auf $3,5d$

² Abstände für $u > 25\%$ (bei Herstellung) um 1,5-Faches erhöhen

³ $3,5d$ (wenn um $5d$ längs versetzt)

⁴ Douglasie: vb für $d \geq 3,1\text{ mm}$

⁵ Werte gelten für $\rho_k \leq 420\text{ kg/m}^3$ (\approx Nadelholz)

⁶ bei Anschlusswinkel $> 15^\circ$: $7d$

Tab. 2 Konstruktionsregeln für genagelte Verbindungen von 1938 bis heute
Design rules for nailed connections from 1938 to date

Regelwerk	DIN 1052		TGL 112-0730	DIN 1052 – Blatt 1	TGL 33135/01	DIN 1052-2	DIN EN 1995-1-1	prEN 1995-1-1
	1938/1940	1947	1963	1969	1984	1988	2010	2022
Mindestabstände	(siehe Tab. 1)							
Mindestholzdicke	20 mm	20 mm	$a \geq 6d$	$a = d (3+8d) > 2,4 \text{ cm}$ $a \geq 6d$ (Vorbohren bei $d \geq 4,2 \text{ mm}$)	24 mm	$a = d (3 + 8d) > 2,4 \text{ cm}$ $a \geq 6d$ (Vorbohren bei $d \geq 4,2 \text{ mm}$)	$a \geq 7d$ $a \geq 14d^1$ 22 mm (DIN EN 14081-1)	$a \geq 14d^1$ 22 mm (DIN EN 14081-1)
Mindesteindringtiefe	–	–	$\geq a_{\min}$ lt. Tabelle	$6d/4d^3$	$6d/4d^3$	$6d/4d^3$	8d	8d
Versetzen	um 1d	um 1d	–	um 1d	–	um 1d	um 1d, sonst a_1 einhalten	um 1d, sonst a_1 einhalten
Übergreifungslänge	–	–	$\leq t_2/3$: gleiches Nagelbild $> t_2/3$: versetztes Nagelbild	$t_2 \geq (t_{\text{pen}} + 8d)$: gleiches Nagelbild $t_2 \leq t_{\text{pen}}$: versetzen um $a_1 = 10d (12d)$ $t_{\text{pen}} < t_2 < (t_{\text{pen}} + 8d)$: versetzen um $a_1 = 5d$	$\leq t_2/3$: gleiches Nagelbild $> t_2/3$: versetzen um $a_1 = 10d$	$t_2 \geq (t_{\text{pen}} + 8d)$: gleiches Nagelbild $t_2 \leq t_{\text{pen}}$: versetzen um $a_1 = 10d (12d)$ $t_{\text{pen}} < t_2 < (t_{\text{pen}} + 8d)$: versetzen um $a_1 = 5d$	$t_2 - t_{\text{pen}} \geq 4d$: gleiches Nagelbild $t_2 - t_{\text{pen}} < 4d$: versetzen um a_1	$t_2 - t_{\text{pen}} > 4d$: gleiches Nagelbild $t_2 - t_{\text{pen}} \leq 4d$: versetztes Nagelbild
Vorbohren	–	–	$d > 4,6 \text{ mm}$ mit 0,85d	s_{\min} mit $\approx 0,85d$	Laubholz und $d > 4,2 \text{ mm}$ mit 0,85d	mit 0,9d	$d > 6 \text{ mm}$ mit 0,8d	$d \geq 6 \text{ mm}$ mit 0,8d
Mindestmaß (Nagel)	$d/l = 2,8/60$	$d/l = 2,8/65$	$d/l = 2,8/65$	$d/l = 2,2/45$	$d = 3,1$ (allgemein) $d = 2,8$ (untergeordnet)	$d/l = 1,8/35$ (DIN 1151)	$d = 1,9$ (DIN EN 14592)	$d = 1,9$ (DIN EN 14592)
Mindestnagelanzahl ²	4 ³	4	4/2 ⁴	4	3/2 ⁴	4	2 Nägel pro Anschluss ⁵	2 Nägel pro Anschluss ⁵

¹ gilt für besonders spaltgefährdete Hölzer
² Angaben beziehen sich auf Nägel pro Scherfuge (SF)
³ erst ab 1940 eingeführt
⁴ der erste Wert gilt bei einer Scherfuge, der zweite bei mehreren
⁵ unabhängig von der Anzahl der Scherfugen

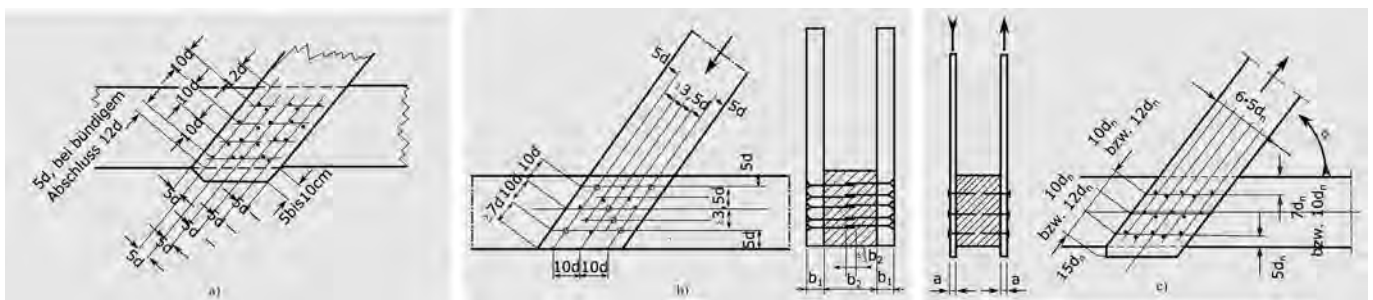


Bild 5 Angabe der Mindestabstände: a) DIN 1052:1938, b) TGL 112-0730:1963, c) DIN 1052:1988 [6, 27, 37]
Indication of the minimum distances acc. a) DIN 1052:1938, b) TGL 112-0730:1963, c) DIN 1052:1988 [6, 27, 37]

und für $a_{3,t} = 15-20d$. 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 Rands der Kraft-Faser-Winkel zu berücksichtigen. Für a_1 und $a_{4,t}$ fin-

det zudem eine Unterscheidung für Nägel mit $d \geq 5 \text{ mm}$ statt.

1969 wurden erstmals maximale Abstände für Nägel angegeben. Die Werte 40d und 20d sind bis heute unverändert gültig. Das ist für Fachwerkknoten nicht relevant, sondern vielmehr für Verbindungen parallel zur Faser, bei denen der Zusammenhalt der einzelnen Elemente konstruktiv si-

chergestellt werden muss. Genagelte Stegträger, deren Berechnung nach dem γ -Verfahren im gleichen Jahr eingeführt wurde, oder Wandtafeln, die 1988 einen eigenen Normteil bekommen haben [38], sind dafür Beispiele.

3.2 Mindestholzdicke

Dass sowohl die Tragfähigkeit als auch die Nagelbarkeit einer Holz-Nagel-Verbindung die Festlegung einer Mindestholzdicke t_{\min} erfordern, war frühzeitig bekannt. Bis 1969 wurde diese explizit in den Tragfähigkeitstabellen angegeben. Für Nägel mit Durchmessern zwischen 2,8 mm und 3,4 mm betrug sie 20 mm. Die in der Tabelle angegebene Tragfähigkeit durfte nur angesetzt werden, wenn Nagel und Brett zusammenpassten. Bei $t_{\min} = 20$ mm sollte nach DIN 1052:1938 $d/l = 3,1/65$ mm gewählt werden. Damit war gleichzeitig die Einschlagtiefe festgelegt (Abschn. 3.3).

In der DIN 1052:1933 sind darüber hinaus Angaben zu Mindestquerschnitten zu finden. Einteilige Fachwerkstäbe sollten eine Querschnittsfläche $> 60 \text{ cm}^2$ und eine kleinste Abmessung von 6 cm aufweisen. Bei mehrteiligen Stäben musste jeder Einzelquerschnitt mindestens 36 cm^2 betragen.

Zur direkten Berechnung einer Mindestholzdicke $t_{\min} = a$ in Abhängigkeit vom Nageldurchmesser d wurde in DIN 1052:1969 erstmals eine Formel angegeben:

$$t_{\min} = a = d \cdot (3 + 8d) > 2,4 \text{ cm} \quad (1)$$

Während die DIN 1052-2:1988 diese Gl. (1) übernahm, beschränkte sich die TGL 33135/01:1984 auf die Angabe einer einheitlichen Grenze von 24 mm. DIN 1052:1969 enthält eine Angabe, dass bei mit ungefähr $0,85d$ vorgebohrten Brettern bei einem Nageldurchmesser von $d \geq 4,2$ mm die volle Tragfähigkeit ab einer minimalen Brettdicke von $6d$ angesetzt werden durfte. Andernfalls ist die Tragfähigkeit im Verhältnis $a/6d$ abzumindern. Die Forschungsergebnisse für die Mindestholzdicken in der DIN 1052 beruhen auf Untersuchungen von Blaß und Schmid [74].

Die Mindestholzdicke wird aktuell in der DIN EN 14081-1:2019 geregelt. Für tragende Bauteile darf sie einen Wert von 22 mm nicht unterschreiten. Im Eurocode 5 ist lediglich eine Mindestdicke abhängig von Durchmesser und Rohdichte einzuhalten, ab der vorgebohrt werden sollte, um ein Spalten zu verhindern (Abschn. 3.4.3). Dabei findet die Unterscheidung zwischen einem allgemeinen Fall und für in besonderem Maße spaltgefährdete Hölzer statt. Im Falle besonderer Spaltgefahr, die laut Norm z. B. bei Weißtanne, Douglasie und Fichte vorliegt, wird die Mindestdicke verdoppelt.

3.3 Mindesteindringtiefe

Im Zusammenhang mit den tabellierten Angaben der frühen Fassungen der DIN 1052 ergab sich die Mindestein-

dringtiefe durch die Festlegung der Dicke des Seitenholzes in Verbindung mit dem Durchmesser und der Länge des Nagels. Eine allgemeinere Festlegung zur Mindesteindringtiefe t_{pen} (auch: Mindesteinbindetiefe) findet sich erstmals in der TGL 112-0730:1963 und war dort der Mindestholzdicke und den Nagelabmessungen aus der Tragfähigkeitstabelle zugeordnet: $t_{\text{pen, min}} \geq t_{\min}$. Mit der DIN 1052-1:1969 galt für einschnittige Verbindungen eine Mindesteindringtiefe von $6d$, bei mehrschnittigen Verbindungen genügte $4d$. Diese Vorgabe hatte sowohl in der nachfolgenden TGL 33135/01:1984 als auch der DIN 1052-2:1988 Bestand. 1988 wird lediglich eine Ergänzung für Sondernägel vorgenommen. Im aktuellen Eurocode 5 ist die Mindesteindringtiefe für glattschaftige Nägel mit $8d$ etwas größer angegeben, im Entwurf des Eurocode 5 (prEN 1995-1-1, 2022) [75] werden aktuell $10d$ gefordert.

3.4 Weitere Konstruktionsregeln

3.4.1 Versetzen in Faserrichtung

Aufgrund der Spaltgefahr des Holzes bei in Faserrichtung hintereinanderliegenden Nägeln ist eine versetzte Anordnung ein bekanntes Mittel, um ein Aufreißen beim Einschlagen eines Nagels im Holz zu vermeiden. Das Versetzmaß beträgt $1d$ und ist seit 1938 mit der zweiten Ausgabe der DIN 1052 unverändert. Das Versetzen der Nägel wurde bereits von Stoy [4] gefordert und wurde seit 1938 in allen DIN-Normen berücksichtigt. In den TGL von 1963 und 1984 war es jedoch nicht mehr explizit erwähnt. Die schematischen Nagelbilder dort zeigten Nägel in einer Linie hintereinander angeordnet (Bild 5). Das legt nahe, dass die Nägel nicht versetzt werden mussten.

Heute ist es nicht mehr zwingend notwendig, die Nägel gegeneinander zu versetzen. Allerdings ist nach DIN EN 1995-1-1:2010 der Mindestabstand a_1 bei nicht versetzter Anordnung auf $14d$ zu erhöhen. Andernfalls ist die Tragfähigkeit der Verbindung mit n_{ef} zu reduzieren. Diese Regelung findet sich auch in der prEN 1995-1-1:2022 [75].

In den TGL war darüber hinaus ein Versetzen in Querrichtung erwähnt, um den Abstand a_2 zwischen den Reihen zu verkleinern.

3.4.2 Übergreifungslänge bei beidseitiger Nagelung

Seit 1963 ist das beidseitige Nageln in der DIN 1052 berücksichtigt. Mlynek empfahl aufgrund des einseitigen Einflusses des Nagelkopfs bei zweiseitigen Verbindungen die Nägel von beiden Seiten in gleicher Weise einzubringen [76]. Dadurch kann es allerdings infolge der mittigen Überschneidung zur Traglastminderung kommen. Aus diesem Grund wurden Bedingungen formuliert, die die Übergreifungslänge begrenzen.

Falls die Übergreifung zweier gegenüberliegender Nägel kleiner als ein Drittel der Mittelholzbreite war, durfte

nach TGL 112-0730 auf beiden Seiten das gleiche Nagelbild angewandt werden. Bei Überschreitung des Grenzwerts mussten die Nägel unter Einhaltung der Mindestabstände wie bei einseitiger Nagelung längs und quer versetzt werden. Die folgende TGL 33135/01 übernahm diese Regelung. Mit der DIN 1052 ging man in der BRD 1969 und auch 1988 einen etwas differenzierteren Weg. Es musste zwischen drei Fällen unterschieden werden, die alle auf dem Abstand der Nagelspitze zur nächsten Scherfuge beruhten. Wenn dieser Abstand $8d$ nicht unterschritt, dann durfte auf das gleiche Nagelbild auf beiden Seiten zurückgegriffen werden. Überschritt die Einbindelänge die Dicke des Mittelholzes, mussten die Nägel in Faserrichtung um a_1 versetzt werden. In allen anderen Fällen betrug das Versatzmaß nur $5d$. Der aktuelle Eurocode wählt eine ähnlich einfache Formulierung wie die TGL. Dort liegt die Grenze zum versetzt angeordneten Nagelbild bei der Unterschreitung eines Mindestabstands der Nagelspitze von der nächsten Scherfuge bei $4d$.

3.4.3 Vorbohren im Holz

Infolge des Eintreibens des Nagels werden Holzfasern verdrängt und es kann zum Aufspalten des Holzes kommen. Das Vorbohren stellt insbesondere bei dickeren Nägeln eine gute Möglichkeit dar, dies zu verhindern.

Seit 1963 ist diese Möglichkeit mit der TGL 112-0730 normativ geregelt. Dort wird ein Vorbohren mit $0,85d$ ab einem Nageldurchmesser von $d > 4,6\text{mm}$ erforderlich. Hart-hölzer waren stets vorzubohren, was mit einer Tragfähigkeitserhöhung um 20% einherging. Mit der folgenden TGL im Jahre 1984 verschärfte sich die Vorgabe. Nadelholz war nun ab einem Durchmesser von $d > 4,2\text{mm}$ vorzubohren. Die Vorgabe für Laubholz hatte Bestand. Allerdings wurde die entsprechende Tragfähigkeit direkt tabelliert und lag deutlich über den pauschalen 20% aus der Vorgängernorm.

Entgegen den Regelungen in der DDR musste Nadelholz in der BRD nicht vorgebohrt werden. Falls vorgebohrt wurde mit ungefähr $0,85d$ (1969) bzw. $0,9d$ (1988), durfte eine 25% höhere Tragfähigkeit in Rechnung gestellt und, wie unter Abschn. 3.2 erwähnt, die erforderliche Holzdicke reduziert werden. Laubhölzer mussten auch nach DIN 1052 vorgebohrt werden. Die Nagelbelastbarkeit durfte pauschal gegenüber dem Wert für Nadelholz um 50% angehoben werden. An die Bedingungen in Westdeutschland war immer eine Mindestbohrtiefe gebunden, die der erforderlichen Holzdicke bzw. Eindringtiefe entsprach.

In der aktuell gültigen Norm gilt nach wie vor, dass bei Durchmessern $d > 6\text{mm}$ mit $0,8d$ sowie Nägeln in Hart-holz ($\rho_k \geq 500\text{kg/m}^3$) unabhängig vom Durchmesser immer vorgebohrt werden muss.

3.4.4 Mindestdurchmesser des Nagels

Seit 1933 ist der Durchmesser des Nagels mit Bezug zur Dicke des angeschlossenen Holzbauteils festgelegt. DIN 1052:1933 definiert über Gl. (2), die den optimalen Bereich der Schlankheit λ nach Stoy [5] (Bild 6) angibt, einen Mindestdurchmesser.

$$d = \frac{1}{6} \dots 1/8 \cdot t \tag{2}$$

Der zur Rohdichte proportionale Faktor ϕ in Bild 6 wurde von Stoy als einer der maßgebenden Parameter für die Bestimmung der Tragfähigkeit einer Nagelverbindung definiert. Mithilfe dieses Faktors konnte der Bereich der optimalen Schlankheit eingegrenzt werden.

Spätere Fassungen der DIN 1052 gaben die Tragfähigkeit für bestimmte Nageldurchmesser an. In diesen Jahren lag die Mindestholzdicke bei 20mm (Abschn. 3.2) und der zugehörige Durchmesser betrug 2,8mm. Die Länge lag zu Anfang noch bei 60mm, später, ab 1947, bei 65mm. 1969 wurden die Mindestmaße in den Tabellen auf $d/l = 2,2/45\text{mm}$ herabgesetzt. Die TGL 33135/01:1984 legte letztmals einen Mindestdurchmesser innerhalb der Holzbaunorm vor. Allgemein betrug dieser 3,1mm. Für untergeordnete Bauteile durfte $d = 2,8\text{mm}$ verwendet werden. In DIN 1052-2:1988 sowie im aktuellen Eurocode 5 finden sich keine Mindestmaße für Nägel. Diese sind über die Produktnormen DIN 1151:1973 [61] bzw. DIN EN 14592:2022 [67] geregelt $d/l = 1,8/35\text{mm}$ bzw. $d_{\text{min}} = 1,9\text{mm}$.

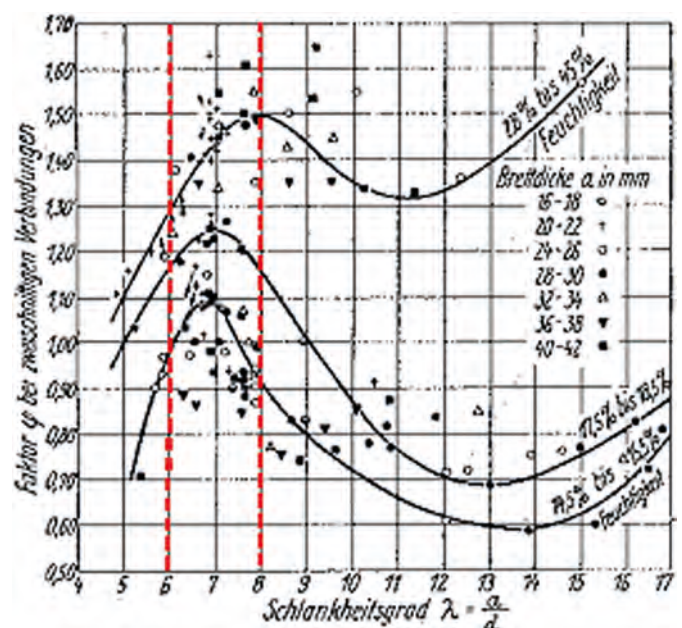


Bild 6 Abhängigkeit des Faktors ϕ vom Schlankheitsgrad $\lambda = a/d$ [5]
 Dependence of the factor ϕ on the slenderness ratio $\lambda = a/d$ [5]

3.4.5 Mindestnagelanzahl

Ab 1940 ist die Mindestnagelanzahl in der Normung verankert. Deren Einführung sollte sicherstellen, dass eine gewisse Tragfähigkeit auch bei Ausfall eines oder mehrerer Nägel durch bspw. Materialfehler oder Fehler bei der Herstellung sichergestellt ist.

Die geforderte Anzahl von mindestens „vier Nägeln pro einschnittigem Anschluss“ hatte sich bis 1988 praktisch nicht mehr verändert. Lediglich die sprachliche Formulierung änderte sich im Laufe der Jahre. Implizit werden mit der Angabe auch mehrschnittige Anschlüsse eingeschlossen. Explizit erfolgte die Regelung für mehr als eine Scherfuge aber erst 1963 in der TGL 112-0730 mit der Vorgabe von zwei Nägeln bei zweisechnittigen Verbindungen. Wenn 1969 bzw. 1988 von „vier Nagelscherflächen pro Fuge“ die Rede war, wurden sowohl ein- als auch mehrschnittige Verbindungen abgedeckt.

In der DDR fand mit der TGL 33135/01:1984 eine Reduzierung statt. Von da an waren für einschnittige Verbindungen nur noch drei Nagelscherflächen, also drei Nägel, erforderlich. Für zweisechnittige Verbindungen waren zwei Nagelscherflächen ausreichend. Das heißt, dass bei entsprechender Eindringtiefe sogar nur ein Nagel erlaubt war.

Der Eurocode 5 folgt der allgemeinen Vorgabe für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, wonach in jedem Anschluss unabhängig von der Schnittigkeit mindestens zwei Verbindungsmittel anzuordnen sind.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden für Deutschland die Entwicklungen der Forschung und Normung zu den Konstruk-

tionsregeln von Verbindungen mit Nägeln von 1933 bis heute vorgestellt. Der systematische Vergleich umfasst u. a. Nagelabstände sowie Mindestabmessungen der angeschlossenen Hölzer und zeigt, dass die meisten der konstruktiven Vorgaben, die Anfang des 20. Jahrhunderts erforscht und normativ geregelt waren, bis heute Gültigkeit besitzen und über die Zeit hinweg nur geringfügig angepasst wurden. Ein zweiter Beitrag von Schwendner et al. [19] greift das Thema auf und nimmt die Entwicklung der Regelungen zur Tragfähigkeit von Nagelverbindungen in den Blick. Mit der kreativen Anwendung von Konstruktions- und Bemessungsregeln und damit mit der Vielfalt und Originalität der Konstruktionsformen unterschiedlicher genagelter Tragelemente im 20. Jahrhundert befassen sich Engelmann et al. [16]. Als Ganzes gesehen geben die drei Beiträge einen umfassenden Überblick über ein hochinteressantes Thema der Bautechnikgeschichte. Den Architekten und den Ingenieurinnen, die sich mit den entsprechenden Bauwerken im Zusammenhang mit Fragen der Erhaltung oder Umnutzung befassen, werden wichtige Informationen zur Verfügung gestellt, mit denen sich die vorgefundene Situation besser einordnen und bewerten lässt.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beschlossenen Schwerpunktprogramms (SPP) 2255 „Kulturerbe Konstruktion – Grundlagen einer ingenieurwissenschaftlich fundierten und vernetzten Denkmalpflege für das bauliche Erbe der Hochmoderne“ gefördert. Für die Finanzierung möchten sich die Autoren herzlich bedanken.

Literatur

- [1] Gaber, E. (1933) *Untersuchungen über Nägel und genagelte Bohlenträger* in: Fachausschuß für Holzfragen [Hrsg.] *Bericht über die Sitzungen der Holztagung 1933*. Berlin, 1./2. Dez. 1933. Berlin: Neudeutsche Verlags- und Treuhandgesellschaft, S. 36–39.
- [2] Gaber, E. (1935) *Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen*. Versuchsanstalt für Holz, Stein und Eisen, H. 3.
- [3] Grabbe, H. (1935) *Die Festigkeit der zweisechnittig genagelten Holzverbindungen bei gleicher und ungleicher Holzstärke* [Dissertation]. Technische Hochschule Carolo Wilhelmina.
- [4] Stoy, W. (1930) *Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmittel*. Konstruktion und Ausführung 64, H. 19, S. 141–146.
- [5] Stoy, W. (1935) *Tragfähigkeit von Nagelverbindungen im Holzbau*. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen, H. 11, S. 1–46.
- [6] DIN 1052:1933-07 (1933) *Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 1933.
- [7] Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (1926) *Vorläufige Bestimmungen für Holztragwerke*. Berlin: Ernst & Sohn. Ausgabe Dez. 1926.
- [8] DRG:1926-12 (1931) *Vorläufige Bestimmungen für Holztragwerke*. 3. berichtigte Ausgabe. Berlin: Ernst & Sohn.
- [9] Brock, G. R. (1957) *The strength of nailed joints*. 41. Aufl.
- [10] Kuenzi, E. W. (1955) *Theoretical design of a nailed or bolted joint under lateral load*. 1951. Aufl.
- [11] Mack, J. J. (1960) *The strength of nailed timber joints, I, in messmate stringybark*. 9. Aufl.
- [12] Norén, B. (1962) *Nailed joints-a contribution to the theoretical analysis of yield and strength*. 123. Aufl.
- [13] Stern, E. G. (1964) *Load transmission by nails in double shear*. 55. Aufl.
- [14] Westman, E. F.; McAdoo, J. C. (1969) *Nail withdrawal resistance of Douglas-fir and western hemlock*. 19. Aufl.
- [15] Albert, T. J.; Johnson, J. W. (1967) *Lateral holding capacity of power driven fasteners*. 17. Aufl.
- [16] Engelmann, I.; Schwendner, S.; Seim, W. (2022) *Materialsparende Holznagelbinder – Aspekte der Konstruktionsgeschichte*

- von 1930 bis 1990. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen).
- [17] Rug, W. (2003) *100 Jahre Holzbau und Holzbauauforschung* in: Bund Deutscher Zimmermeister BDZ [Hrsg.] *100 Jahre Bund Deutscher Zimmermeister, 100 Jahre Verband, Holzbau, Holzbauauforschung 1903–2003*. Karlsruhe: Bruderverlag.
- [18] Linzner, P. (1993) *Neue Aspekte zum Trag- und Verformungsverhalten von Nägeln in Hirn- und Seitenholz* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- [19] Schwendner, S.; Fischer, J.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – die Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens*. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen). <https://doi.org/10.1002/bate.202200100>
- [20] Preuß, M. (1921) *Eiserne Bolzen im Holzbau*. Der Holzbau 1921, H. 23, S. 89–92.
- [21] DIN 1052:1938-05 (1938) *Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Mai 1938.
- [22] DIN 1052:1940-12 (1940) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 1940.
- [23] DIN 1052:1947-10 (1947) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 1947.
- [24] Johansen, K. W. (1949) *Theory of timber connections*. IABSE publications – IVBH Abhandlungen 9, pp. 249–262. <https://doi.org/10.5169/SEALS-9703>
- [25] Egner, K. (1951) *Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit von Nagelverbindungen mit dicken Drahtstiften*. Deutscher Zimmermeister 53, H. 3, S. 1–9.
- [26] Fonrobert, F.; Köhler, O. (1941) *Die Haftkraft der Nägel*. Die Bautechnik 19, H. 50/51, S. 537–540.
- [27] TGL 112-0730:1963-02 (1963) *Tragwerke aus Holz – Projektierung*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- [28] DIN 1052 Blatt 1:1969-10 (1969) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 1969.
- [29] Rug, W. (2016) *Holzbau im Bestand – Ausgewählte historische Bemessungs- und Konstruktionsnormen von 1917 bis 2007*. Berlin: Beuth.
- [30] Ehlbeck, J. (1976) *Versuche mit Sondernägeln für den Holzbau*. Holz als Roh- und Werkstoff 34, S. 205–211.
- [31] Marten, G. (1940) *Über die Kraftübertragung in Nagelverbindungen*. Berlin.
- [32] Möhler, K. (1986) *Verschiebungsgrößen mechanischer Holzverbindungen der DIN 1052, Teil 2 (Entwurf 1984)*. Bauen mit Holz, H. 4, S. 206–214.
- [33] Andresen, K. (1989) *Klassifizierung der Verbindung nach der Steifigkeit des Anschlusses* [Forschungsbericht]. Technische Universität Berlin.
- [34] Ehlbeck, J.; Siebert, W. (1984) *Tragverhalten von Nagelverbindungen bei gleichzeitiger Beanspruchung auf Abscheren und Ausziehen*.
- [35] TGL 33135-01:1984-01 (1984) *Holzbau: Tragwerke – Berechnung und bauliche Durchbildung*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- [36] DIN 1052-1:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.
- [37] DIN 1052-2:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Mechanische Verbindungen*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.
- [38] DIN 1052-3:1988-04 (1988) *Holzbauwerke – Holzhäuser in Tafelbauart/Berechnung und Ausführung*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1988.
- [39] DIN 1052:2004-08 (2004) *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe August 2004.
- [40] Möhler, K. (1962) *Untersuchungen über genagelte Stahlblech-Holzverbindungen*. Berichte aus der Bausforschung 24, S. 37–51.
- [41] Stoy, W. (1934) *Versuche mit Schraubennägeln*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 41, S. 456–458.
- [42] Stoy, W. (1930) *Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmittel*. Konstruktion und Ausführung 64, H. 19, Beilage der DBZ, S. 141–146.
- [43] Seidel, E.; Stoy, W. (1933) *Der Holz-Nagelbau*. Berlin.
- [44] Dröge, G. (1955) *25 Jahre Holz-nagelbau in Versuch und Praxis*. Die Bautechnik 32, H. 2, S. 37–44.
- [45] Gerlach, H. (1938) *Der stützenfreie Dachraum im Kleinwohnungsbau*. Holz im Wohnungs- und Siedlungsbau – Vom wirtschaftlichen Bauen, S. 127–161.
- [46] Wedler, B. et al. (1943) *Hölzerne Hausdächer. Baustoffbedarf und Arbeitsaufwand, Standsicherheitsnachweis nach Untersuchungen des Fachausschusses III „Holz im Bauwesen“*. Veröffentlichung (Mitteilungen) der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, Berlin.
- [47] Kersten, C. (1940) *Neuzeitliche Holzdächer*. Zentralblatt der Bauverwaltung 60, H. 9/10, S. 133–138.
- [48] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1940) *Der Kelwies-Sparbinder*. Bauwelt, H. 14, S. 220–222.
- [49] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Der Kelwies-Sparbinder. Die größte bisher bekannte Holzersparnis*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 28, S. 356–359.
- [50] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Der „Kelwies-Sparbinder“ und seine Herstellung*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 36, S. 453–454.
- [51] Keldenich, J.; Wiesner, C. (1939) *Abbund und Ausführung des Kelwies-Sparbinders*. Der Deutsche Zimmermeister, H. 49/50, S. 537–540.
- [52] Eisfeld, E.; Bode, E. (1939) *Das Kastengitterträgerdach „K.-G.-Dach“*. Bauwelt, H. 36, S. 814–818.
- [53] Harbers, G. (1939) *Erstmalige Anwendung des Ludwig-Kroher-Dachstuhls*. Technische und wirtschaftliche Rundschau, Beilage Baumeister 37, H. 1, S. 7–9.
- [54] Ahnert, R.; Krause, K. H. (2009) *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz*. 7. Aufl. Berlin.
- [55] DIN 4074:1939-03 (1939) *Bauholz – Gütebedingungen*. Berlin: Beuth. Ausgabe März 1939.
- [56] DIN 4074 Blatt 1:1958-12 (1958) *Bauholz für Holzbauteile – Gütebedingungen für Bauschnittholz (Nadelholz)*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 1958.
- [57] DIN 4074 Blatt 2:1958-12 (1958) *Bauholz für Holzbauteile – Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz)*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 1958.
- [58] DIN 4074-1:1989-09 (1989) *Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit – Nadelschnittholz*. Berlin: Beuth. Ausgabe September 1989.
- [59] DIN EN 14081-1:2019-10 (2019) *Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 2019.
- [60] DIN EN 338:2016-07 (2016) *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 2016.
- [61] DIN 1151:1973-04 (1973) *Drahtstifte, rund; Flachkopf, Senkkopf*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1973.
- [62] DIN 1152:1973-04 (1973) *Drahtstifte, rund; Stauchkopf*. Berlin: Beuth. Ausgabe April 1973.
- [63] DIN 1154:1936-06 (1936) *Drahtnägeln, kantig, Senkkopf, geriffelt Stauchkopf, Hufnagelkopf, glatt*. Berlin: Beuth. Ausgabe Juni 1936.
- [64] TGL 0-1151 (1965) *Senkkopfnägeln*.
- [65] TGL 36433 (1979) *Nägeln für allgemeine Verwendung*.

- [66] DIN 1143-1 (1982) *Maschinenstifte, rund, lose*. Berlin: Beuth.
- [67] DIN EN 14592 (2022) *Holzbauwerke – Stiftförmige Verbindungsmittel – Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- [68] DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2010.
- [69] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 (2013) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth. Ausgabe August 2013.
- [70] prEN1995-1-1 (2022) *Consolidated version of EN 1995-1-1 dated September 2022*.
- [71] Schächterle, K. (1920) *Bauholz-Verbindungen*. Der Holzbau, S. 22–24.
- [72] Fonrobert, F. (1947) *Biege feste genagelte Stöße*. Bautechnik 24, H. 1, S. 7–12.
- [73] Dröge, G. (1955) *25 Jahre Holznagelbau in Versuch und Praxis*. Die Bautechnik 32, H. 2, S. 37–48.
- [74] Blaß, H. J.; Schmid, M. (2002) *Spaltgefahr von Nadelhölzern* [Forschungsbericht]. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe.
- [75] prEN1995-1-1 (2022) *Entwurf des Eurocode 5 – Consolidated version of EN 1995-1-1 dated September 2022*.
- [76] Mlynek, F. (1952) *Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei Verwendung von hochwertigem Stahl und verschiedenen Holzarten* [Dissertation]. Technische Hochschule Braunschweig.

Autor:innen

Jens Fischer, M.Sc.
fischer.jj@t-online.de
Zur Lieth 13
59939 Olsberg

Dr.-Ing. Sascha Schwendner (Korrespondenzautor:in)
s.schwendner@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim
wseim@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Dr.-Ing. Iris Engelmann
iris.engelmann@uni-weimar.de
Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Architektur
Geschwister-Scholl-Straße 8
99423 Weimar

Zitieren Sie diesen Beitrag

Fischer, J.; Schwendner, S.; Seim, W.; Engelmann, I. (2023) *Verbindungen mit Nägeln im Holzbau – die Erforschung und Entwicklung von Konstruktionsregeln*. Bautechnik 100, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 73–84.
<https://doi.org/10.1002/bate.202200099>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 01. Dezember 2022; angenommen: 29. August 2023.

Ingenieurskunst im Experiment: die Multihalle Mannheim

Die Mannheimer Multihalle, ein Meisterwerk der Ingenieurbaukunst, bedarf einer umfassenden Sanierung. Die einzigartige freitragende Gitterschale, entworfen von Frei Otto, wurde ursprünglich als temporäres Bauwerk für die Bundesgartenschau 1975 konzipiert. Nach der Veranstaltung wurde die Halle vielseitig genutzt, doch im Laufe der Jahre traten Verformungen und Schäden auf, die eine Sanierung unabdingbar machen. Die Herausforderung besteht darin, die Tragwirkung der Konstruktion zu erhalten, baurechtliche Anforderungen zu erfüllen und die Originalsubstanz so weit wie möglich zu bewahren. Das Ingenieurbüro Fast + Epp ist für die Sanierung der Dachkonstruktion verantwortlich und setzt dabei auf eine experimentelle Herangehensweise. Ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus wird eingesetzt, um die Verstärkungsbereiche zu bestimmen und den Holzverbrauch zu minimieren. Das Sanierungskonzept sieht auch eine partielle Rückverformung der Gitterschale vor, um sowohl das Tragverhalten zu verbessern als auch den ästhetischen Charakter des Leichtbaus zu erhalten. Im Rahmen der Sanierung wird eine probeweise Instandsetzung durchgeführt, um fundierte Erkenntnisse über die Machbarkeit und die Auswirkungen zu gewinnen. Die Sanierung der Multihalle ist eine komplexe Aufgabe, bei der sowohl technische als auch denkmalpflegerische Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Stichworte Experimentalbauwerk; Gitterschale; Holzbau; Kulturdenkmal; Leichtbau; Sanierung; Tragwerksoptimierung

1 Einleitung

Die Mannheimer Multihalle ist die weltgrößte freitragende Gitterschale über amorphem Grundriss (Bild 1). Das Pionierbauwerk des Leichtbaus wurde von Pritzker-Preisträger Frei Otto anlässlich der Bundesgartenschau 1975 erschaffen. Die ursprünglich nur als temporäres Bauwerk geplante Halle hat aufgrund ihrer Einmaligkeit international Beachtung gefunden und gilt heute als Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung. Es ist der Experimentierfreude und der kollaborativen Zusammenarbeit der damaligen Beteiligten zu verdanken, dass dieses herausragende Zeugnis der Ingenieurbaukunst realisiert werden konnte.

Nach der Bundesgartenschau erlebte die Multihalle eine vielfältige Nutzung: Pop-Konzerte, Parteitage und Ausstellungen fanden hier statt. Bis in die Neunzigerjahre wurde die befristete Baugenehmigung immer wieder sukzessive verlängert. Dann zeigten sich deutliche Verfor-

Experimentation in engineering design: Multihalle Mannheim

The Mannheim Multihalle, an outstanding example of engineering architecture, requires substantial renovation work. The unique free-form gridshell, designed by Frei Otto, was originally planned as a temporary structure for Germany's National Garden Show of 1975. After the event, the hall was used in many different ways, but over the years, deformations and damage occurred, making refurbishment necessary. The challenge is to preserve the load bearing characteristics of the structure, meet building code requirements, and preserve the original material as much as possible. The engineering firm Fast + Epp is responsible for the renovation of the roof structure and relies on an experimental approach. An evolutionary optimization algorithm is being used to determine areas of reinforcement and to minimize the amount of additional material. The renovation concept also includes a partial restoration of the geometry of the gridshell in order to improve the load-bearing behavior and to preserve the character of the lightweight structure. As part of the rehabilitation, a trial repair is carried out to gain knowledge of the feasibility and impact of the proposed measures. The renovation of the Multihalle is a complex task in which both technical and monument preservation aspects have to be taken into account.

Keywords experimental building; gridshell; lightweight construction; rehabilitation; renovation; restoration; structural design optimization; timber construction

mungen im Dachtragwerk und die Standsicherheit wurde infrage gestellt. Um dem entgegenzuwirken, wurde in der Halle ein Gerüstturm als Notunterstützung aufgestellt



Bild 1 Die organische Form der Multihalle verleiht dem Gebäude einen einmaligen Charakter (Quelle: Daniel Lukac)
The organic shape gives the Multihalle its unique character

(Bild 2). Die veraltete und teils undichte Membran und die daraus resultierenden Schäden an der Dachhaut tragen zu einer Durchfeuchtung der Randträger bei, die in Teilbereichen unterstützt werden mussten. Um die Multihalle langfristig zu erhalten, ist eine umfassende Sanierung notwendig.

Die Herausforderung besteht darin, die Tragwirkung der Konstruktion zu erhalten, baurechtliche Anforderungen zu erfüllen und die Originalsubstanz so weit wie möglich zu bewahren. Das Gebäude ist v. a. durch seine filigrane Konstruktion charakterisiert, welche auf die geschickte

Wirkung des Tragwerks zurückzuführen ist. Durch die Konstruktion als Gitterschale entstand eine Halle mit Spannweiten von bis zu 60m, welche aus Latten aus Hemlocktanne mit einem Querschnitt von gerade einmal 5 cm × 5 cm zusammengesetzt wurde. Auch bei der Sanierung soll der Materialeinsatz minimiert werden, ohne dabei den ästhetischen Anspruch zu verlieren. Dieser komplexen Aufgabe stellte sich das Ingenieurbüro Fast + Epp mit seiner Holzbauexpertise.

2 Tragverhalten der Gitterschale

Das Besondere an einer Gitterschale ist, dass durch ihre zweifach gekrümmte Fläche ein leichtes räumliches Tragwerk entsteht, das in seiner Idealform nur durch Druck beansprucht wird. Neben der gleichmäßigen Belastung durch das Eigengewicht treten durch Wind und Schnee ungleichmäßige Lasten auf, was zusätzlich eine Biegesteifigkeit des Gitters nötig macht. In der Multihalle wird dies durch den mehrlagigen Aufbau des Gitters in den Bereichen mit großer Spannweite erreicht. Die zusammengesetzten Latten sind nur an den Bolzen miteinander verbunden (Bild 3) und konnten sich beim Aufrichten der Schale durch Langlöcher gegenseitig zueinander verschieben. Anschließend wurden die Bolzen angezogen, damit die Form fixiert und die zusammengesetzten Latten miteinander gekoppelt. Um die Steifigkeit in einigen Bereichen weiter zu erhöhen, wurden Schubverbinder zwischen den beiden Lagen des Doppelgitters eingebaut. Diagonal verlaufende Seile steifen das Gitter zusätzlich in seiner Ebene aus [1].

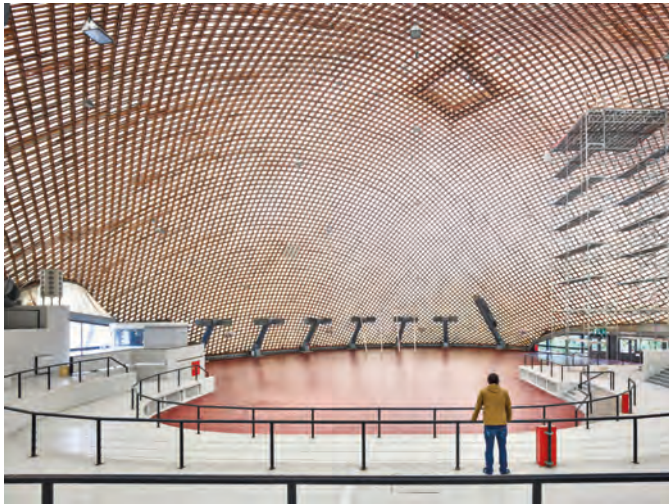


Bild 2 Aufgrund der Verformungen in der großen Halle wurde ein Gerüstturm als Notunterstützung aufgestellt (Quelle: Daniel Lukac)
Due to the deformations in the large hall, a scaffold tower was erected as a temporary prop

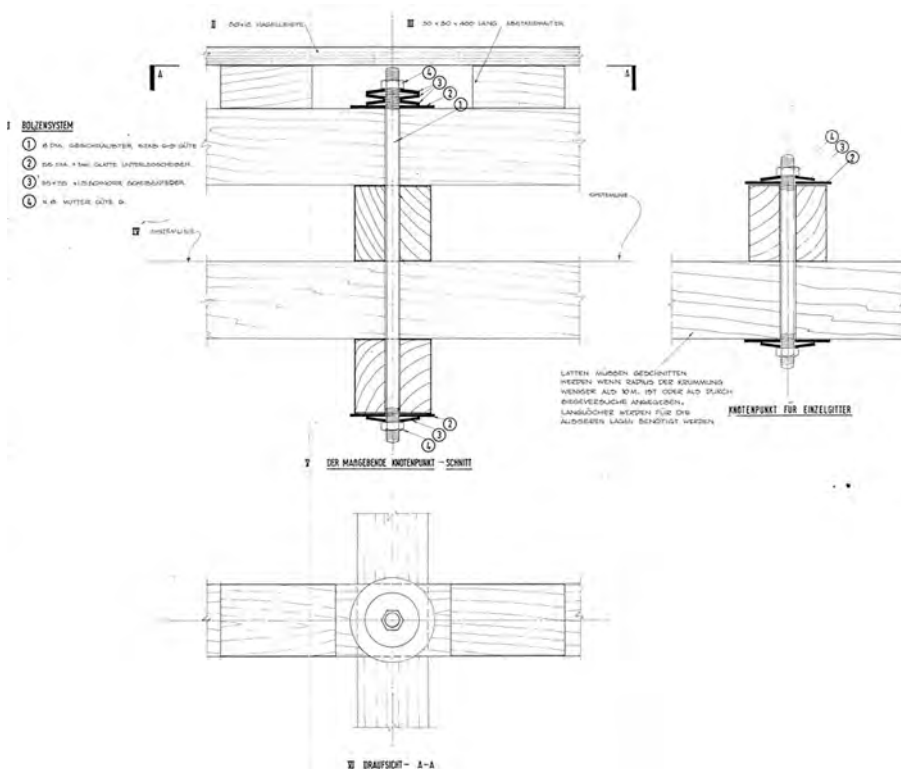


Bild 3 An den Knoten wird über Tellerfedern eine gleichmäßige Kraft für die Reibverbindung aufgebracht (Quelle: Ove Arup + Partners)
A constant force is applied to the nodes via disc springs for the friction-type connection

Um das Tragverhalten der Schale und die aufgetretenen Verformungen eingehend zu bewerten, führten die Ingenieure von Fast + Epp detaillierte Analysen an zwei verschiedenen FE-Modellen durch. Dabei setzten sie den Ursprungszustand mit der 2014 vermessenen verformten Geometrie in Relation. Die Auswertung und der Vergleich beider Modelle zeigt, dass für eine dauerhafte Standzeit die Steifigkeit des Dachtragwerks erhöht werden muss, um die Stabilität der Halle zu gewährleisten. Die aufgetretenen Verformungen haben zudem höhere Biegemomente erzeugt, was die Tragfähigkeit weiter reduziert hat. Aus statischer Sicht ist daher eine Wiederherstellung der Geometrie wünschenswert. Ob sich die ursprüngliche Geometrie dauerhaft wiederherstellen lässt, ist jedoch fraglich.

3 Ein evolutionärer Algorithmus für ein optimiertes Sanierungskonzept

Eine Verstärkung der Gitterschale ist für den dauerhaften Erhalt des Bauwerks unumgänglich. Um dem filigranen Tragwerk gerecht zu werden, sollten die Verstärkungsbereiche jedoch auf das Nötigste begrenzt werden. Dazu mussten die Bereiche des Dachs bestimmt werden, in denen eine Verstärkung besonders wirksam ist. Mittels evolutionärer Optimierungsalgorithmen wurden die notwendigen Verstärkungsbereiche durch eine parametrische Modellierung mit Grasshopper [2] zusammen mit dem Finite-Elemente-Programm Karamba3D [3] in Rhino3D [4] zur Wahrung des ursprünglichen Erscheinungsbilds der Multihalle auf ein Minimum reduziert (Bild 4).

Die Verstärkungsbänder werden kreuzweise angeordnet (Bild 5). Zwei der Bänder kreuzen sich am Punkt mit der

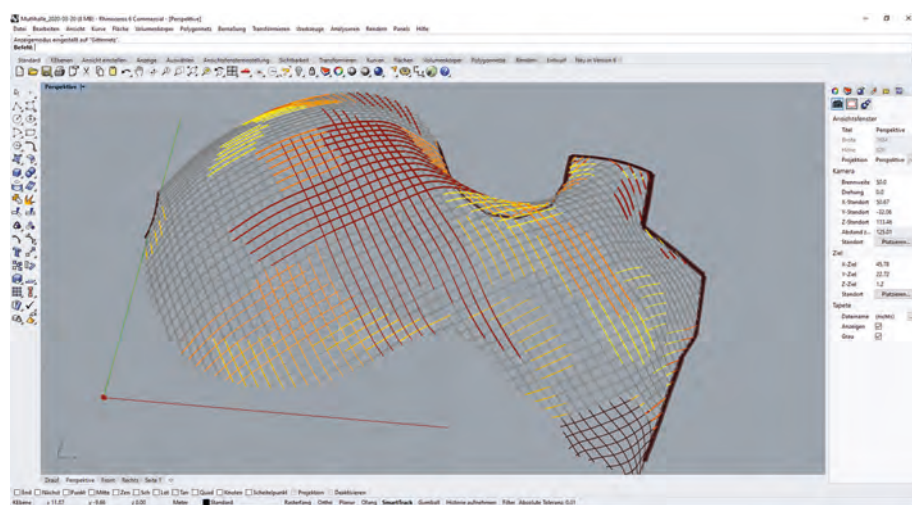


Bild 4 Mithilfe von Grasshopper wurden in Rhino unterschiedliche Verstärkungsmuster untersucht (Quelle: Fast + Epp)
Grasshopper was used to investigate different reinforcement patterns in Rhino



Bild 5 In der großen Halle werden Verstärkungsbänder angeordnet, in der kleinen Halle sind kaum Verstärkungen notwendig (Quelle: Fast + Epp)
Reinforcement bands are positioned in the large hall, while in the small hall very few reinforcements are necessary

größten Verformung der Kuppel. Aufgrund der größeren Spannweite sind die meisten Verstärkungsbänder in der Hauptveranstaltungshalle platziert. In der kleinen Halle über dem Restaurant sind nur zwei Verstärkungsbänder notwendig. In den einlagigen Zugangstunneln zeigte sich, dass v. a. eine Verstärkung der Hüftbereiche notwendig ist.

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Sanierungskonzepts, das auf dem Einsatz einzelner Verstärkungsbänder beruht, müssen stark verformte Bereiche des Dachtragwerks wieder in ihre ursprüngliche Position angehoben werden. So wird die Schalentragwirkung verbessert. Die Optimierungsberechnungen ergaben, dass eine dauerhafte Rückverformung von etwa 60 % notwendig sein würde, um auf weitere Maßnahmen verzichten zu können. Die Ingenieure von Fast + Epp reizten dabei die Grenzen des Tragwerks aus, um den ursprünglichen Charakter des Leichtbaus zu erhalten.

4 Im Dialog zur denkmalgerechten Sanierung

Gemeinsam mit Bauherrn, Förderer und Denkmalpflege berieten die Ingenieure, wie eine denkmalgerechte Sanierung sichergestellt und die Unwägbarkeiten bei der Sanierung dieses komplexen Bauwerks reduziert werden können. Es stand die Frage im Raum, inwieweit sich das Dachtragwerk schadfrei anheben lässt und welcher Erfolg dauerhaft erreicht werden kann. Eine der größten Herausforderungen bestand darin, die Sanierungsmaßnahmen in einer Ausschreibung hinreichend genau zu beschreiben, sodass ein Holzbauunternehmen die Arbeiten verlässlich kalkulieren kann und eventuelle Nachträge vermieden werden können.

Um Sicherheit bezüglich der Kosten und Termine zu erhalten, wurde übereinstimmend beschlossen, Erkenntnisse für eine mögliche Sanierung zunächst über eine probeweise Instandsetzung zu gewinnen. Diese soll Antworten auf Fragen der baupraktischen Umsetzung liefern, aber auch die Auswirkungen auf das Erscheinungsbild der Multihalle evaluieren. Mithilfe dieser experimentellen Vorgehensweise sollte die Durchführbarkeit unterschiedlicher Sanierungsvarianten lokal überprüft werden, um baupraktische Hindernisse frühzeitig zu identifizieren und den späteren Sanierungsablauf optimieren zu können.

5 Testflächen: einmalige Herangehensweise für ein einmaliges Bauwerk

Um der Einmaligkeit des komplexen Bauwerks und seinem experimentellen Charakter gerecht zu werden, haben Bauherr und Planer einen innovativen Ansatz verfolgt, der weit über die üblichen Planungsschritte im Hochbau hinausgeht. Insgesamt wurden drei Testflächen in der Multihalle angelegt, welche von der Wüstenrot

Stiftung finanziert, gesteuert und intensiv begleitet wurden. Mit ihnen wurden unterschiedliche Herangehensweisen erprobt, um die für die weitere Sanierung beste zu ermitteln.

Eine der Testflächen konzentriert sich auf die Montage der Verstärkungslatten und der Übergangsdetails, den Einbau von Schubverbindern, die Anschlussdetails an die Randbereiche sowie den Austausch der Bolzen und der Aussteifungsseile. An einer weiteren Testfläche wurde das Rückverformen einer Beule erprobt, um herauszufinden, ob sich das Gitter schadfrei zurückdrücken lässt. Durch eine Vermessung sollte überprüft werden, ob die Geometrie nach Rückbau der hierzu erforderlichen temporären Stützung in der geplanten Geometrie verbleibt. Die dritte Testfläche fokussierte sich auf die Erneuerung eines Randträgers. In diesem Kontext sollten eine Verstärkung der Verbindung der beiden Randträgerhälften durch Schubblöcke sowie ein verbesserter Anschluss der Membran getestet werden. Durch den Ausbau der Träger konnte zudem der Zustand der bisher unzugänglichen Randträgerhälften besser beurteilt werden. Dies ermöglichte eine fundierte Einschätzung des notwendigen Umfangs für den Austausch der Träger.

5.1 Testfläche 1: Holzverstärkungen in der Veranstaltungshalle

An der ersten Testfläche in der Veranstaltungshalle wurden im nordöstlichen Bereich zwei der Verstärkungsbänder teilweise angebracht. Nach Rücksprache mit ausführenden Firmen wurde entschieden, die Verstärkungslatten auf der Innenseite anzubringen, um die Bestandsmembran möglichst lange als Witterungsschutz verwenden zu können und eine ebene Arbeitsfläche zu haben.

In enger Zusammenarbeit und im stetigen Austausch wurden beschädigte Elemente der vorhandenen Konstruktion durch das Holzbauunternehmen mithilfe eines Schadenskatalogs identifiziert, markiert und anschließend ausgetauscht bzw. erneuert (Bild 6). Die Verbindung zwischen neuem und altem Holz erfolgte durch seitliche Holzlaschen und Vollgewindeschrauben. Alle durchgeführten Reparaturen wurden akribisch in Plänen dokumentiert.

Nach Abschluss der Reparaturarbeiten wurden die zusätzlichen Lagen angebracht. Für die Holzverstärkungen wurde Weißtanne verwendet. Sobald die zusätzlichen Lagen eingebaut waren, wurden Schubverbinder entsprechend den statischen Erfordernissen eingebaut.

Der Einbau der bis zu 10m langen Latten verlief reibungslos (Bild 7). Die Langlöcher sowie die Bohrungen für die Gewindestangen an den Lattenenden wurden bereits werkseitig vorgefertigt. Längere Latten erwiesen sich beim Einbau als unhandlich.



Bild 6 Die Schäden wurden durch das Holzbauunternehmen mit Klebeband markiert und einem Schadenstyp zugeordnet (Quelle: Fast + Epp)
The timber construction company marked the damage with adhesive tape and assigned a damage type



Bild 7 Die Verstärkungslatten wurden in der Testfläche von einer mobilen Arbeitsbühne aus montiert (Quelle: Fast + Epp)
The reinforcement laths were installed in the test area from a mobile working platform

Im Vorfeld der Montage der Verstärkungslatten wurde ein Großteil der Bolzen ausgetauscht und durch längere ersetzt. Hierbei ist zu beachten, dass der Austausch der Bolzen selbst einen signifikanten zeitlichen Aufwand darstellt. Bei der Testfläche 1 wurde stellenweise Korrosion an den Bolzen festgestellt, wo diese das Bestandholz durchdringen. Diese ist auf die feuerhemmende Imprägnierung mit Salzen zurückzuführen.

Der Austausch der Seile war bei geöffneter Membran von oben problemlos möglich. Beim Austausch arbeitete der Seilbauer Hand in Hand mit dem Zimmerer, der die Bolzen an den entsprechenden Knotenpunkten getauscht hat. Ein Austausch der Seile von unten ist nicht möglich, da sich die Seilklemme mangels Zugänglichkeit nicht montieren lässt. Auf die Seile wurde eine Vorspannkraft aufgebracht (Bild 8).

Nach der erfolgreichen Erneuerung der Seile in der Testfläche wurden auch die Seile in der restlichen Halle in Augenschein genommen und Zugversuche an ausgebauten



Bild 8 Die Seile und Anschlusspunkte werden getauscht und eine Vorspannkraft aufgebracht (Quelle: Fast + Epp)
The cables and end connections are replaced and a pretensioning force is applied

ten Seilen durchgeführt. Das Ergebnis: Sämtliche aussteifenden Seile im Tragwerk sollen durch neue Exemplare ersetzt werden.

Der Schub zwischen den einzelnen Lagen des Gitters wird über die Knotenpunkte übertragen. Durch ein Paket von Tellerfedern soll an den Bolzen ein kontinuierlicher Anpressdruck von 4kN aufgebaut werden, damit die Kräfte über Reibung zwischen den einzelnen Latten übertragen werden können. Während der Sanierungsmaßnahmen müssen die Federpakete mit neuen Tellerfedern ergänzt werden, da im Bestand nur eine Federkraft von 2kN erreicht wird. An Stellen, wo die Tragfähigkeit der Knotenpunkte überschritten wird, sind zusätzliche Schubverbinder erforderlich (Bild 9).

5.2 Testfläche 2: Rückverformung der Geometrie

An der zweiten Testfläche wurde der Bereich mit der größten Verformung im Hochpunkt der Kuppelstruktur der Veranstaltungshalle wieder in seine ursprüngliche Geometrie gebracht. Die Verformung betrug hier im Vergleich zur ursprünglichen Planung 71 cm. Um die Machbarkeit der Rückverformung zu testen, wurde auf einer Fläche von ca. 400m² ein Raumgerüst aufgestellt (Bild 10). Auf dieses Raumgerüst wurden Sprieße ge-



Bild 9 Zusätzliche Schubverbinder koppeln die einzelnen Lagen der Gitterschale (Quelle: Fast + Epp)
Additional shear connectors couple the individual layers of the grid shell



Bild 10 Der Bereich unter der größten Beule wurde vor dem Hochdrücken mit einem Raumgerüst unterstützt (Quelle: Fast + Epp)
The area with the largest deformations was supported with a birdcage scaffold before pushing up

stellt, mithilfe derer das Dach angehoben wurde. Die Gerüstebenen wurden durch einen Vermesser eingemessen, der den vorhandenen Abstand zwischen Gerüstebene und unterster Latte an den Positionen der Spriëße sowie den angestrebten Abstand nach dem Hochdrücken auf der Plattform markiert hat (Bild 11). Die Geometrie konnte durch Messen der Höhe der Spriëße selbst während der Arbeiten kontrolliert werden.

Anschließend wurden die Bolzen an den Knotenpunkten der Gitterschale in diesem Bereich gelöst, um das Dach wieder verformbar zu machen. Durch Hochdrücken der Spriëße wurde das Dach schrittweise in die ursprüngliche Form gebracht. Während des Prozesses wurde die Geometrie durch 40 an der Dachkonstruktion befestigte Lasersensoren und fünf mechanische Wegaufnehmer permanent überwacht. Die Echtzeitüberwachung ermöglicht es, die Arbeiten bei unerwarteten Verformungen des Dachs außerhalb des unterstützten Bereichs unterbrechen zu können, die Situation zu bewerten und mögliche Schäden abzuwenden. Zeitgleich inspizierten Kletterer



Bild 11 Mithilfe von Schwerlastspriëßen auf der Gerüstplattform wurde das Dach Stück für Stück angehoben (Quelle: Fast + Epp)
Heavy-duty jack posts were placed on the scaffold platform to lift the roof step by step

auf dem Dach die Dachmembran, um sicherzustellen, dass keine unerwünschten Spannungen entstehen.

Bei der Testfläche 2 gelang es, die größte der insgesamt neun Beulen zurückzudrücken. Die Gitterschale konnte dabei wieder näher an die ursprüngliche Geometrie gedrückt werden, ohne signifikante Schäden zu verursachen. Allerdings mussten dafür teilweise Seilspreizen ausgebaut, Klammern in der Membran gelöst und die unter hoher Spannung stehende Membran stellenweise aufgeschnitten werden. In einem Teilbereich konnte die ursprünglich geplante Geometrie nicht vollständig erreicht werden, was darauf hindeutet, dass sie in der angenommenen Form niemals existierte. Vermessungsdaten unmittelbar nach Fertigstellung des ursprünglichen Baus liegen nicht vor.

Nach dem Hochdrückvorgang wurde die Membran wieder neu befestigt und abgedichtet. Obwohl in diesem Bereich ursprünglich keine Verstärkungsmaßnahmen geplant waren, wurden Schubverbinder im hochgedrückten Zustand eingebaut, um die Steifigkeit gemäß den statischen Anforderungen zu erhöhen.

Es war zu erwarten, dass sich das Dach nach dem Entfernen der Spriëße wieder etwas absenkt. Außerdem sollte überprüft werden, ob sich die Geometrie im Anschluss an die Wiederherstellung durch zeitabhängige Effekte wieder verändert. Deswegen wurde die Geometrie der Halle durch weitere Laserscans kontrolliert. Zusätzliche Kontrollmessungen wurden im April, Mai und Oktober 2022 sowie im April 2023 durchgeführt. Die Laserscans lieferten ein vollständiges Abbild der Dachgeometrie zu den Messzeitpunkten und wurden durch die fortlaufenden Aufzeichnungen einzelner Sensoren am Dach ergänzt.

Die nach dem Ablassen der Spriëße beobachteten Verformungen liegen in einem Bereich, der mit den bisher nach der Optimierung geplanten Verstärkungsmaßnahmen verträglich ist. Die Verformungen am maßgebenden Punkt betragen nach der zweiten Vermessung im Mai 2022 ca. 70 % des zuvor hochgedrückten Werts. Die Verformungen nahmen danach noch in kleinem Maße zu.

5.3 Testfläche 3: Austausch der Randträger

Die dritte Testfläche mit einer Gesamtfläche von ca. 145 m² umfasste den Austausch eines Randträgers im südlichen Bereich des Stegs zwischen Restaurant und Veranstaltungshalle. Die Randträger sind zweiteilig ausgebildet. Die Latten der Gitterschale laufen in den Zwischenraum der Trägereile ein. Die Randträger weisen überwiegend starke Verformungen um die schwache Achse auf und wurden daher mittig unterstützt. Durch den Eintritt von Wasser wurden sie stark geschädigt.

Der an den Randträger grenzende Bereich des Stegs wurde temporär unterstützt, die beiden alten Trägerhälften wurden durch neue ersetzt (Bild 12). Die Randträger sind unterschiedlich stark verdreht. Der ausgebaute Träger hat eine Verdrehung von etwa 1°/m. Für den Austausch wurden eine unverdrillte und eine verdreht gefertigte Trägerhälfte eingesetzt, die sich problemlos installieren ließen.

Bisher waren nur die Träger auf der Innenseite sichtbar, da die äußere Randträgerhälfte mit Membran verkleidet war. Durch die Öffnung und den Austausch eines Randträgers in der Testfläche 3 konnten erstmals auch Rückschlüsse über den Zustand der äußeren Randträgerhälften gezogen werden. Die ausgebaute äußere Randträgerhälfte weist erhebliche Schäden durch Fäulnis, Risse in den Klebefugen und Lücken an den Stoßfugen der Lamellen auf. Klebstoffreste deuteten auf eine vorangegangene Sanierung hin. Der Träger war in einem unzureichenden Zustand und eignete sich nicht zur Wiederverwendung. Es sollen daher alle äußeren Trägerhälften ausgetauscht werden.

Die Träger wurden durch den Einbau von Schubblöcken mit gekreuzt angeordneten Holzschrauben verstärkt. Eine Vermessung nach Abbau der Unterstützung hat gezeigt, dass die Schubblöcke ausreichen, um die Verformung auf das zulässige Maß zu begrenzen. Die Fahnenbleche an den Stützen waren in einem guten Zustand. Hier wurde vor Einbau des Trägers der Korrosionsschutz erneuert. Zusätzlich wurden die Appel-Dübel an den Verbindungsstellen ausgetauscht.

Zum Austausch des Randträgers in der Testfläche 3 mussten die Bolzen im Gitter auf einem angrenzenden Streifen gelöst werden, um die Lage des Gitters an die neuen, unverformten Trägerhälften anzupassen. Hierbei zeigte sich, dass die Bolzen an dieser Stelle in einem wesentlich schlechteren Zustand als in der Testfläche 1 waren. Eine Überprüfung an weiteren Stellen im Außenbereich ergab, dass Bolzen dort deutlich mehr korrodiert

sind und sich infolgedessen auch schwerer austauschen lassen.

Als zusätzliche Neuerung wurde bei der Testfläche 3 ein neues Membrandetail zur Hinterlüftung der Randträger getestet, um künftige Feuchtigkeitsansammlungen an den Randträgern zu verhindern (Bild 13).

6 Experimentelle Testflächen: Wegweiser für effiziente Sanierung und präzise Planung

Das Montagekonzept hat durch die probeweise Instandsetzung entscheidende Weiterentwicklungen erfahren. Vor der Durchführung der Testflächen war bislang nicht klar, welche Arbeiten im Innenraum von unten und welche auf der Dachfläche von oben ausgeführt werden können. Auch die Anordnung der Verstärkungslatten auf der Ober- oder Unterseite des Bestandgitters und die Wahl zwischen mobilen Arbeitsbühnen oder Raumgerüsten waren ungeklärt. Die Testflächen haben gezeigt, dass sich die Schadensreparatur der unteren Lagen sowie die Montage der Verstärkungslatten von unten gut durchführen lassen. Arbeiten bis zu einer Höhe von 15m lassen sich mit mobilen Arbeitsbühnen erledigen. Für Arbeiten in größeren Höhen empfiehlt sich ein Raumgerüst, solange die Neigung des Gitters in diesen Bereichen moderat ist, um nicht zu viele Abtreppungen im Gerüst zu erzeugen. Die Schadensreparatur von außen, der Tausch der Seile und der Membran müssen hingegen von oben realisiert werden. Diese Arbeiten bestimmen den Bauablauf entscheidend, da sie nur in der warmen Jahreszeit ausgeführt werden können.

Aus den Bautagebüchern der Testflächen und den zusammengetragenen Erfahrungen der ausführenden Firmen wurden Aufwandswerte ermittelt, die es erlauben, die voraussichtliche Bauzeit hochzurechnen und die Kostenberechnung zu aktualisieren.



Bild 12 Der Austausch eines Randträgers ließ Rückschlüsse auf den Zustand der anderen Träger zu (Quelle: Fast + Epp)
Replacement of an edge beam allowed conclusions about the condition of the other beams



Bild 13 Schubverbinder verstärken die Randträger und ein neues Membrandetail zur Hinterlüftung wurde getestet (Quelle: Fast + Epp)
Shear connectors reinforce the edge beams and a new membrane detail for rear ventilation was tested

Aufgrund der Erkenntnisse der Testflächen konnte der erforderliche Sanierungsumfang besser eingegrenzt werden, woraus sich ein genaueres Bild für die Ausschreibung ergibt.

Die Arbeiten an den Testflächen waren geprägt von einer vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen Bauherren, Wüstenrot Stiftung, Fast + Epp und dem Zimmerer. Mit einer Experimentierfreude im Geiste der ursprünglichen Planer ließen sich viele Details vor Ort klären, ohne dass es in jedem Fall einer Zeichnung bedurfte. Entscheidend ermöglicht hat das die direkte und unkomplizierte Finanzierung durch die Wüstenrot Stiftung.

Das optimierte Sanierungskonzept, welches die teilweise Wiederherstellung der Geometrie und nur bereichsweise angeordnete Verstärkungsbänder vorsieht, soll den ursprünglichen Charakter des Gebäudes bewahren. Das Ziel: so wenig Verstärkungen wie möglich anbringen. Der Bauherr hat sich für dieses Konzept entschieden, um so weit wie möglich am Original zu bleiben. Für diesen innovativen Ansatz existieren keine anerkannten Regeln der Technik. Die probeweise Instandsetzung hat dabei geholfen, wichtige Erkenntnisse für die Umsetzung zu erlangen und damit die Sanierungsmaßnahmen auf ein Minimum zu begrenzen. Der erfolgreiche Test der Rückverformung einer Beule hat den Weg zu diesem Konzept eröffnet. Ohne diese experimentelle Vorgehensweise hätte



Bild 14 Mit dem optimierten Sanierungskonzept von Fast + Epp wird die Multihalle bald wieder in neuem Licht erstrahlen (Quelle: Daniel Lukac)
With the optimized rehabilitation concept of Fast + Epp, the Multihalle will shine in new splendor soon

eine größere Unsicherheit bestanden und es wären v. a. in Bezug auf das Verformungsverhalten der Halle nur konservative Annahmen möglich. Fast + Epp freut sich auf die weitere Sanierungsarbeit zusammen mit allen Partnern, sodass die Multihalle im Sinne der ursprünglichen Planer bald wieder in neuem Licht erstrahlen kann (Bild 14) und sich Architektur-Begeisterte aus aller Welt an der Ikone des Leichtbaus erfreuen können.

Literatur

- [1] Burkhardt, B. [Hrsg.] (1978) *IL 13 Multihalle Mannheim*. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke (IL).
- [2] Davidson, S. (2023) *Grasshopper – Algorithmic Modeling for Rhino* [Software]. Lynnwood: Davidson, S. <https://www.grasshopper3d.com> [Zugriff am: 24. August 2023]
- [3] Preisinger, C. (2023) *Karamba3D* [Software]. Wien: Preisinger, C. <https://karamba3d.com> [Zugriff am: 24. August 2023]
- [4] R. McNeel & Associates (2019) *Rhinoceros 3D Version 6 SR20* [Software]. Seattle: R. McNeel & Associates. <https://www.rhino3d.com>

Autor:innen

Dr.-Ing. Jochen Stahl, P.Eng. (Korrespondenzautor:in)
germany@fastepp.com
Fast + Epp GmbH
Rosa-Parks-Straße 4
64295 Darmstadt

Christian Rosenkranz, M.Sc.
crosenkranz@fastepp.com
Fast + Epp GmbH
Rosa-Parks-Straße 4
64295 Darmstadt

Zitieren Sie diesen Beitrag

Stahl, J.; Rosenkranz, C. (2023) *Ingenieurskunst im Experiment: die Multihalle Mannheim*. Bautechnik 100, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 85–92.
<https://doi.org/10.1002/bate.202300094>

Aus dem Inhalt

Nachhaltiger Pavillon aus Holz und Stahl überzeugte Jury	93
EASTWOOD stärkt den Holzbau	94
Formaldehydfreie Bio-Klebstoffe für die Holzwerkstoffherstellung ...	94
Veranstaltungskalender	95

BAUTECHNIK aktuell

Sonderheft Holzbau

Ausgabe 2

WETTBEWERBE

Nachhaltiger Pavillon aus Holz und Stahl überzeugte Jury

Die beiden Architekten Gustav Düsing und Max Hacke aus Berlin sind die Gewinner des Deutschen Architekturpreises 2023, der in diesem Jahr mit 30.000 Euro dotiert ist. Sie realisierten im Auftrag der Technischen Universität Braunschweig das „Studierendenhaus TU Braunschweig“, in dem die Studierenden lernen, lesen und sich treffen können. Die beiden Architekten haben ein Gebäude geschaffen, in dem es sich gut gemeinsam studieren lässt, und greifen gleichzeitig aktuelle Themen rund um Klimaschutz, Nachhaltigkeit und Barrierefreiheit auf.

Der Staatspreis wird alle zwei Jahre für herausragende baukulturelle Leistungen vergeben und ist die bedeutendste Auszeichnung für Architektinnen und Architekten in Deutschland. Die Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger und die feierliche Preisverleihung fand am 28. September 2023 in Berlin statt.

Klara Geywitz, Bundesministerin für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: „Mit dem Studierendenhaus haben die beiden Berliner Architekten nicht nur den Studentinnen und Studenten in Braunschweig etwas Gutes getan. Sie haben eine innovative Stahl-Holz-Hybridkonstruktion eingesetzt, die leicht montiert und wieder in seine Grundkomponenten zerlegt werden kann, und gleichzeitig ein einladendes Gebäude geschaffen, das dank seiner offenen Struktur von den Studierenden flexibel genutzt werden kann. Aber auch die Auszeichnungen und Anerkennungen sind vorbildlich, da sie für innovatives und effektives Bauen stehen. Dass Deutschland viele kreative, erfindungsreiche und engagierte Architektinnen und Architekten hat, macht die große Anzahl der Einreichungen deutlich. Ein großer Dank an die Jury, die diese tollen Gewinner ausgewählt hat.“

Andrea Gebhard, Präsidentin der Bundesarchitektenkammer: „Jedes Gebäude wird angesichts einer sich rasant wandelnden



Studierendenhaus TU Braunschweig

Welt einen Beitrag für mehr Wirksamkeit in unserer Umwelt leisten müssen. Wie wir Klima- und Ressourcenschutz priorisieren und den Umgang mit Material, Boden und Gebäudebestand gestalten, ist für Lebensqualität und Gemeinwohl relevanter denn je. Gerade die jungen Architektinnen und Architekten stehen heute vor herausfordernden Aufgaben. Sie sind es, die die Transformation unserer Städte, Quartiere, Häuser und Gärten mit ihren kreativen Ideen und organisatorischen Fähigkeiten umsetzen werden. Und sie haben alle Chancen verdient. Ich freue mich sehr, dass mit der Auszeichnung für das Studierendenhaus der TU Braunschweig ein längst überfälliger, starker Impuls für mehr Nachwuchsförderung gesetzt wird.“

Dem Preisträger sei es gelungen, so die Jury, mit dem pavillonartigen Bau eine bemerkenswerte Architektur zu verkörpern, die einen bedeutsamen Schritt in der Entwicklung einer zeitgemäßen akademischen Lernumgebung markiere. Die besondere Stahl-Holz-Hybridkonstruktion sei kein einseitiges Statement zur Frage eines zukunftsfähigen Lernortes, sondern agiere aktiv im Einklang mit den sich wandelnden

Anforderungen der Zeit. Die junge, frische und kühne Architektur habe den Campus in Braunschweig auf bereichernde Weise verändert. Neben dem Deutschen Architekturpreis vergab die Jury weitere fünf Auszeichnungen mit jeweils 4.000 Euro und fünf Anerkennungen mit jeweils 2.000 Euro Preisgeld.

Die große Bandbreite der 191 zugelassenen Einreichungen von 164 Büros hat die Jury beeindruckt.

Der Deutsche Architekturpreis reicht bis in das Jahr 1977 zurück und wird seit 2011 vom BMWSB und der BAK gemeinsam ausgelobt und als Staatspreis für Architektur verliehen. Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) ist verantwortlich für das gesamte Verfahren des Staatspreises und koordiniert die Publikation und die Preisverleihung.

Mit dem Deutschen Architekturpreis werden für die Entwicklung des Bauens beispielhafte Bauwerke ausgezeichnet, die eine herausragende architektonische und baukulturelle Qualität aufweisen und im Neubau oder bei der Sanierung und Mo-

Quelle: Gustav Düsing & Max Hacke, Berlin, Foto: Iwan Baan

dernisierung historischer Bausubstanz von einem vorbildlichen Umgang mit Konstruktion und Material zeugen. Sie sind dem nachhaltigen Bauen in ökologischer, ökonomischer und soziokultureller Hinsicht ver-

pflichtet und tragen positiv zur Gestaltung des öffentlichen Raumes bei. Von den ausgezeichneten Bauwerken sollen zum einen Anregungen für zukünftige Planungen ausgehen, zum anderen sollen sie

die Bedeutung der Baukultur und des nachhaltigen Bauens der Öffentlichkeit näherbringen.

Weitere Informationen:
www.deutscher-architekturpreis.de

VERANSTALTUNGEN

EASTWOOD stärkt den Holzbau

Mit einem Besucher- und Ausstellerrekord ist der 3. Fachkongress EASTWOOD am 21. und 22. September 2023 in Leipzig zu Ende gegangen. Rund 200 Kongressteilnehmende folgten im Leipziger Nieperbau der HTWK Leipzig den Fachvorträgen der Referent:innen. Ergänzt wurde die Veranstaltung durch einen Netzwerkabend im Leipziger Zoo, der Gelegenheit zum fachlichen Austausch und Knüpfen neuer Kontakte bot.

Die Veranstaltung des jungen EASTWOOD-Netzwerks hat sich damit einen festen Platz im Holzbau-Kalender gesichert. Auf der Basis eines starken Praxisbezugs zeigte der Kongress Lösungsansätze für den Holzbau als unmittelbar wirksamer Klimaschutz und vermittelte neue Perspektiven für den digitalen Holzbau.

Das Thema Nachhaltigkeit im Holzbau wurde gleich in drei Vorträgen vertieft. Prof. Florian Nagler von Florian Nagler Architekten in München zeigte anhand einiger ausgesuchter Projekte, wie weit die Ansätze zum ressourcenoptimierten Bauen schon jetzt in die Planung einfließen. Vom Ende der Nutzungsphase eines Gebäudes her näherte sich Rebekka Steinlein von Concular in Berlin der Frage, inwieweit Bauteile und Materialien wiederverwendbar sind. „Rethinking Architecture“ überschrieb Antonino Vultaggio von HPP Architekten seinen Vortrag, in dem er das auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Mindset bei der Planung beschrieb.

Auch die Ingenieure in Leipzig und im Livestream kamen auf der EASTWOOD



Foto: Sven Reichhold

Der Hörsaal im Nieperbau der HTWK Leipzig bot die ideale Kulisse für die diesjährige EASTWOOD

2023 voll auf ihre Kosten. Falk Hoffmann-Berling stellte die großen Herausforderungen bei der Tragwerksplanung der WDL Luftschiffhalle in Mülheim in seinen Fokus. Vom t-lab in Kaiserslautern war Viktor Poteschkin angereist, der die konstruktiven Feinheiten eines neuen Werkstattgebäudes erläuterte, das reversibel gebaut wurde. Besonders gelungene Beispiele für die Kombination von Holz und Beton in Großprojekten brachte Henning Klattenhoff von Assmann aus Hamburg mit.

Die Zollinger-Bauweise wurde zu ihrem 100. Geburtstag von Prof. Wolfgang Rug noch einmal gewürdigt. Mit TimberPlan + zeigte Prof. Alexander Stahr die von ihm und seinem FLEX-Forschungsteam ange-stoßene und schon weitgehend umgesetzte Weiterentwicklung dieses Zollinger-Ansatzes hin zu vorgefertigten Elementen.

„Neue Möglichkeiten für den Werkstoff Holz“ zeigte Albrecht Löser, der für den Kulissenbau in Opernhäuser einen hochbelastbaren Träger aus Holzwerkstoffplatten vorstellte.

Bei einer so hochkarätigen Veranstaltung wie der EASTWOOD darf natürlich ein Vertreter aus dem Holzbau Deutschland Institut nicht fehlen. Dessen Geschäftsführer Johannes Niedermeyer erläuterte in seinem Vortrag die mitunter langwierige und detailreiche fachliche Arbeit des Instituts.

Die 4. EASTWOOD wird am 19./20. September 2024 in Leipzig stattfinden.

Weitere Informationen:
www.eastwood-leipzig.de

NACHRICHTEN

Formaldehydfreie Bio-Klebstoffe für die Holzwerkstoffherstellung

Einsetzbar für Holzwerkstoffplatten im Innenausbau



Quelle: Fraunhofer WKI

Holzwerkstoffplatte mit formaldehydfreiem Bio-Klebstoff für den Innenausbau

Holzwerkstoffe wie Spanplatten, OSB, Sperrholz oder Faserwerkstoffe (MDF, HDF) kommen als nachhaltiges Baumaterial in großen Mengen in der Bauwirtschaft zum Einsatz. Zur Herstellung werden bisher unter anderem Phenol-Formaldehydharze als Bindemittel (Klebstoff) eingesetzt. Diese Harze sind zum einen gesundheitskritisch und werden zum anderen aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Entspre-

chend sollten die gesundheitskritischen Bestandteile Phenol und Formaldehyd zersetzt werden. Dazu wird zum einen Lignin verwendet, das nach Cellulose am häufigsten vorkommende Biopolymer in pflanzlicher Biomasse. Lignin fällt in großen Mengen bei der Papierproduktion an und wird bisher überwiegend verbrannt. Aufgrund seiner phenolischen Substrukturen ist Lignin ein vielversprechender Rohstoff, um

petrochemisches Phenol zu substituieren. Als Ersatzstoff für Formaldehyd wird zum anderen Hydroxymethylfurfural (HMF) eingesetzt – ein Zuckerderivat. Gegenwärtig wird HMF großtechnisch aus Fructose hergestellt, kann aber auch aus natürlichen Zuckerpolymeren wie Stärke oder Cellulose produziert werden. Lignin und HMF werden zu wässrigen Kondensationsharzen umgesetzt, wobei die genaue Abstimmung des Verhältnisses von Lignin und HMF wichtig ist. Bei den bisherigen Versuchen ergab Kraftlignin die besten Ergebnisse hinsichtlich Aushärtungsverhalten und Zugfestigkeiten. In Press- und Zugversuchen wurden Scherzugfestigkeiten von mehr als 5 MPa erreicht. Die Presszeiten in

bisherigen Untersuchungen liegen im Bereich von 30 s bis 90 s. Die Presstemperaturen liegen bevorzugt im Bereich von 130 °C bis 150 °C, so die Forschenden.

Mit dem neu entwickelten, gesundheitlich unkritischen Lignin-HMF-Harz von Fraunhofer WKI erhöhen sich die Vorteile von nachhaltigen Holzwerkstoffen weiter. Dank der vollständig biobasierten Alternative zu petrochemischen Kondensationsharzen wird die Holzwerkstoffindustrie unabhängiger von fossilen Rohstoffen. Die Vermeidung von Formaldehyd bei der Harzherstellung führt außerdem dazu, dass die Holzwerkstoffe nur noch extrem geringe Mengen an Formaldehyd enthalten, die

natürlicherweise im Holz vorkommen. Für die Umstellung der Klebstoff- und der Holzwerkstoffproduktion auf die neuen Bio-Kondensationsharze fallen keine hohen Investitionskosten an. Die Holzwerkstoffbranche erhält damit eine wirtschaftlich attraktive Möglichkeit, gesetzliche Vorgaben und steigende Kundenanforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Gesundheitsschutz zu erfüllen.

Weitere Informationen:
www.wki.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2020/AdLigno_formaldehydfreie-bio-klebstoffe-aus-lignin-zuckerderivaten-und-huminen-fuer-holzwerkstoffherstellung.html

Kongresse – Symposien – Seminare – Messen

Änderungen vorbehalten – bitte beachten Sie die aktuellen Informationen der jeweiligen Veranstalter:innen.

Ort und Termin	Veranstaltung	Auskünfte und Anmeldung
Dortmund 23. November 2023	BDB-Symposium Holzbau	www.baumeister-online.de/veranstaltung/1-bdb-symposium-holzbau-im-baukunstarchiv-dortmund
München 28.–29. November 2023	BIM World MUNICH	www.bim-world.de
München/online 29. November 2023	5. Symposium Ingenieurbaukunst – Design for Construction	www.ingd4c.org
Offenburg 29. Februar–01. März 2024	Geotherm Expo & Congress	www.geotherm-offenburg.de
Dresden 13.–14. März 2024	Brückenbausymposium	https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Wuppertal 19. März 2024	RuhrGeo Tag	www.ruhrgeotag.uni-wuppertal.de
Graz 04.–05. April 2024	8. Christian Veder Kolloquium	www.tugraz.at/institute/ibg/events/christian-veder-kolloquium
Frankfurt am Main 03.–04. Juni 2024	Green Construction Excellence Forum	www.smart-bridges.com/excellence-forum/green-construction
Aachen 12.–13. Juni 2024	Baukongress – Die Zukunft des Bauens	https://baukongress.de
Leipzig 19.–20. September 2024	4. EASTWOOD	www.eastwood-leipzig.de