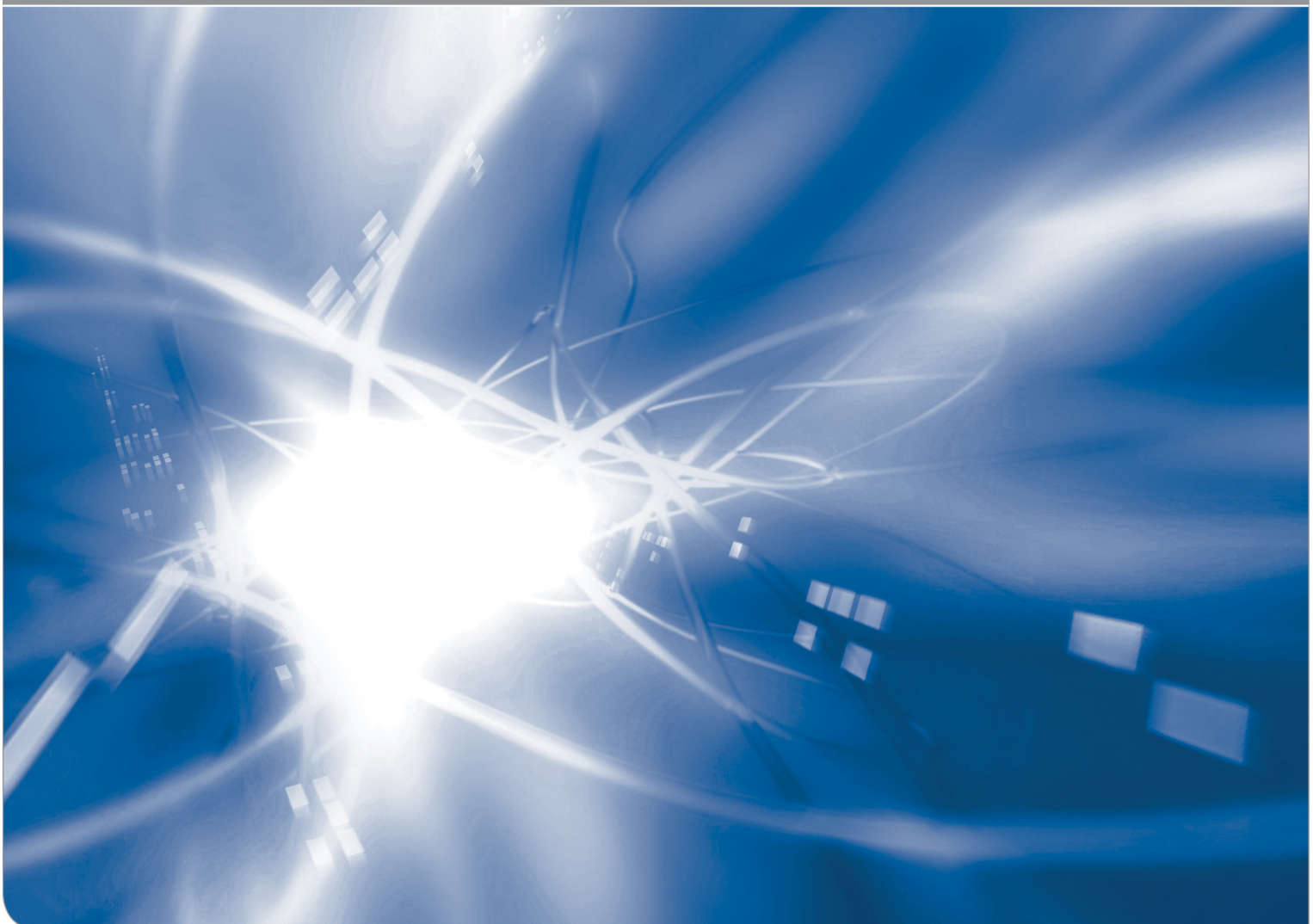


Schäden an Hallentragwerken aus Holz Beschreibung – Ursachen – Vermeidung

Open Access am KIT

von Matthias Frese¹, Ann-Kathrin Grün², Hans Joachim Blaß¹

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 31



¹ KIT Holzbau und Baukonstruktionen

² Gebr. Schütt KG (GmbH & Co.)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Holzbau und Baukonstruktionen

R.-Baumeister-Platz 1
76131 Karlsruhe
Germany
<http://holz.vaka.kit.edu>

Gebr. Schütt KG (GmbH & Co.)

Am Bahnhof 20
25572 Landscheide/Flethsee
Germany
www.schuett-holzbau.de

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de>

2015

ISSN: 2194-1629

Schäden an Hallentragwerken aus Holz Beschreibung – Ursachen – Vermeidung

Matthias Frese¹, Ann-Kathrin Grün² und Hans Joachim Blaß¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Holzbau und Baukonstruktionen

²Gebr. Schütt KG (GmbH & Co.), 25572 Landscheide/Flethsee

matthias.frese@kit.edu, a.gruen@schuett-holzbau.de, blass@kit.edu

Zusammenfassung. Berichtet wird über eine Schadensanalyse. Rund 700 Schäden in Hallentragwerken aus Holz und ihre begleitenden Umstände wurden erfasst und ausgewertet. Die Merkmale der geschädigten Konstruktionen, Art der Schäden und holzbauspezifische Ursachen werden in ihren anteiligen Zusammensetzungen dargestellt. Risse in Faserrichtung sind die häufigsten Schäden; mit Abstand folgen Fäule und Zug- bzw. Schubbrüche. Beziehungen zwischen Schäden und Ursachen zeigen, dass vor allem Konstruktionen, in denen Querkzugspannungen wirken, und solche, die Klimawechseln bzw. zu hohen Lasten ausgesetzt sind, durch Schäden auffällig wurden. Die Ursachen liegen weit überwiegend im konstruktiven Bereich. Um künftige Schäden zu vermeiden, muss dem Entwurf, der Berechnung und Detaillierung mehr Zeit gewidmet werden.

Abstract. *The paper reports results of a comprehensive failure analysis with the focus on timber structures located in Germany. Data of around 700 damages and corresponding circumstances were recorded, classified and evaluated. Statistical distributions of the structural characteristics and the kind of damages are described. The majority of the damages are cracks parallel to the grain, followed by decay, tension and shear failure. Nearly 1300 damage-cause-relations show that structural details resulting in stresses perpendicular to the grain, alternating climates and overloading rank as the main reasons for damages. Spending more time on proper design and on careful details is seen as the key consequence of this analysis.*

1 Einleitung

Vor neun Jahren kam es in Deutschland und in seinen Nachbarländern zu einer Serie von Einstürzen teilweise Jahrzehnte alter Dachtragwerke aus Holz. Obwohl das Versagen dieser Konstruktionen in den meisten Fällen unter Einwirkung von Schnee eintrat, konnte man nicht davon ausgehen, dass eine außergewöhnlich hohe Schneelast als einzige Ursache in Frage kam. Etliche Schadensfälle der jüngeren Vergangenheit zeigen, dass in der Regel eine Kombination mehrerer Ursachen in Betracht zu ziehen oder zwischen Auslösern und Ursachen zu differenzieren ist, um das Versagen eines Tragwerks zu erklären; mit wenigen Ausnahmen gilt das allgemein für Versagensfälle von technischen Systemen [1].

Es gab seinerzeit keine ganzheitliche statistische und systematische Betrachtung von Schadensfällen an Hallentragwerken aus Holz, aus der sich neue Konsequenzen für das Planen und Errichten von Holztragwerken ableiten ließen. Schadensfälle, die fallweise in der Fachliteratur diskutiert werden, sind zumeist Einzelbetrachtungen, aus denen sich solche Konsequenzen nicht in der wünschenswerten Breite entwickeln lassen. Aus diesen Gründen wurde im Jahr 2006 das Forschungsprojekt „Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz“ initiiert. Dessen Ziele waren das Schaffen von Grundlagen für eine ganzheitliche Betrachtung (Aufbau einer Datenbank mit Schadensfällen, Entwicklung einer Systematik zur Klassifikation, Beschreibung und Analyse von Schäden), das Benennen der Ursachen für Schäden und das Formulieren von Schlussfolgerungen. Förderer des Projekts war das Deutsche Institut für Bautechnik; die Projektergebnisse sind in einem über das Internet frei zugänglichen Forschungsbericht [2] dargestellt. Zwischenzeitlich bot sich die Möglichkeit, die Datenbank um etliche Schadensfälle zu erweitern und es erschien nutzbringend, eine neue Analyse des mittlerweile über 700 Schadensfälle umfassenden Datenmaterials vorzunehmen. Über diese, ihre Hintergründe und Ergebnisse wird im vorliegenden Aufsatz berichtet. Die Schlussfolgerungen bringen unter anderem in der Vergangenheit – bereits mehrfach – formulierte allgemeine Forderungen an zuverlässige Tragwerke in Erinnerung.

2 Datenerfassung

2.1 Herkunft der Daten

Die Daten der Schadensfälle stammen aus Sachverständigengutachten, einem älteren Datenbestand der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., aus Sammlungen der

Technischen Universitäten München und Graz sowie aus dem Archiv der Sanierungsaufträge des in Norddeutschland ansässigen Holzleimbauunternehmens Gebr. Schütt KG. Einige Fälle sind der Literatur entnommen oder wurden den Verfassern direkt mitgeteilt. Das Datenmaterial war daher uneinheitlich und wies qualitative Unterschiede auf. Die zusammengetragenen Daten stellen das Ergebnis einer nicht-kontrollierbaren Erhebung dar: verwendet wurde folglich, was verfügbar war und zugänglich gemacht wurde. Daraus ergeben sich mögliche Einschränkungen hinsichtlich des Repräsentativseins für Hallentragwerke allgemein und der Deutung der Ergebnisse. Die Mehrheit der ausgewerteten Schadensbeschreibungen betrifft Hallentragwerke aus Holz mit Standort Deutschland.

2.2 Datenklassifikation

Bauwerke bestehen in der Regel aus wiederkehrenden Einzelbauteilen. Diese wiederum sind mit ebenfalls wiederkehrenden Konstruktionsprinzipien zusammengefügt. Bauwerke einer bestimmten Gruppe, hier Hallentragwerke aus Holz, sind daher gut vergleichbar. Das vereinfacht die Datenerfassung und die gemeinsame Betrachtung ihrer Charakteristika, Schäden und deren Ursachen. Es wurde ein System entwickelt, mit dem ein Schadensfall zuverlässig in einem Datenspeicher erfasst wird. Die Merkmale eines Schadensfalls sind dafür nach thematischen Gesichtspunkten fünf Gruppen zugeordnet: Bauwerks-, Bauteil-, Baustoff- und Schadensmerkmale sowie Fehlerquellen. Bild 1 zeigt die Systematik mit einer Auswahl an Merkmalen und den zugehörigen bzw. beispielhaften Merkmalsausprägungen. Abgesehen von quantitativen bzw. metrischen Merkmalen wie der *Höhe über NN* werden die qualitativen Merkmale wie z. B. *Kreis* oder *Beheizung* mit einem festgelegten Vokabular, bestehend aus Schlagwörtern, erfasst. Die vollständige Systematik, s. [2], enthält über 60 qualitative und quantitative Merkmale sowie ein Vielfaches an Schlagwörtern, um einen Schadensfall prägnant zu beschreiben.

Die Bauwerksmerkmale vermitteln ein allgemeines Bild der geschädigten Hallentragwerke. Bauteil- und Baustoffmerkmale sind detailbezogen und stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit einem Schaden. Sie geben Auskunft über Tragsysteme, beschädigte Bauteile und das verwendete Material. Schadensparameter beschreiben das Schadensbild, auch hinsichtlich der Folgen für die Bauteil- oder Tragwerksstandsicherheit. Gemäß ihrer Bezeichnung treten Initialschäden zuerst auf. Sie grenzen sich dadurch weitgehend von Sekundärschäden ab, die z. B. durch einen Schaden an einem anderen Bauteil ausgelöst werden.

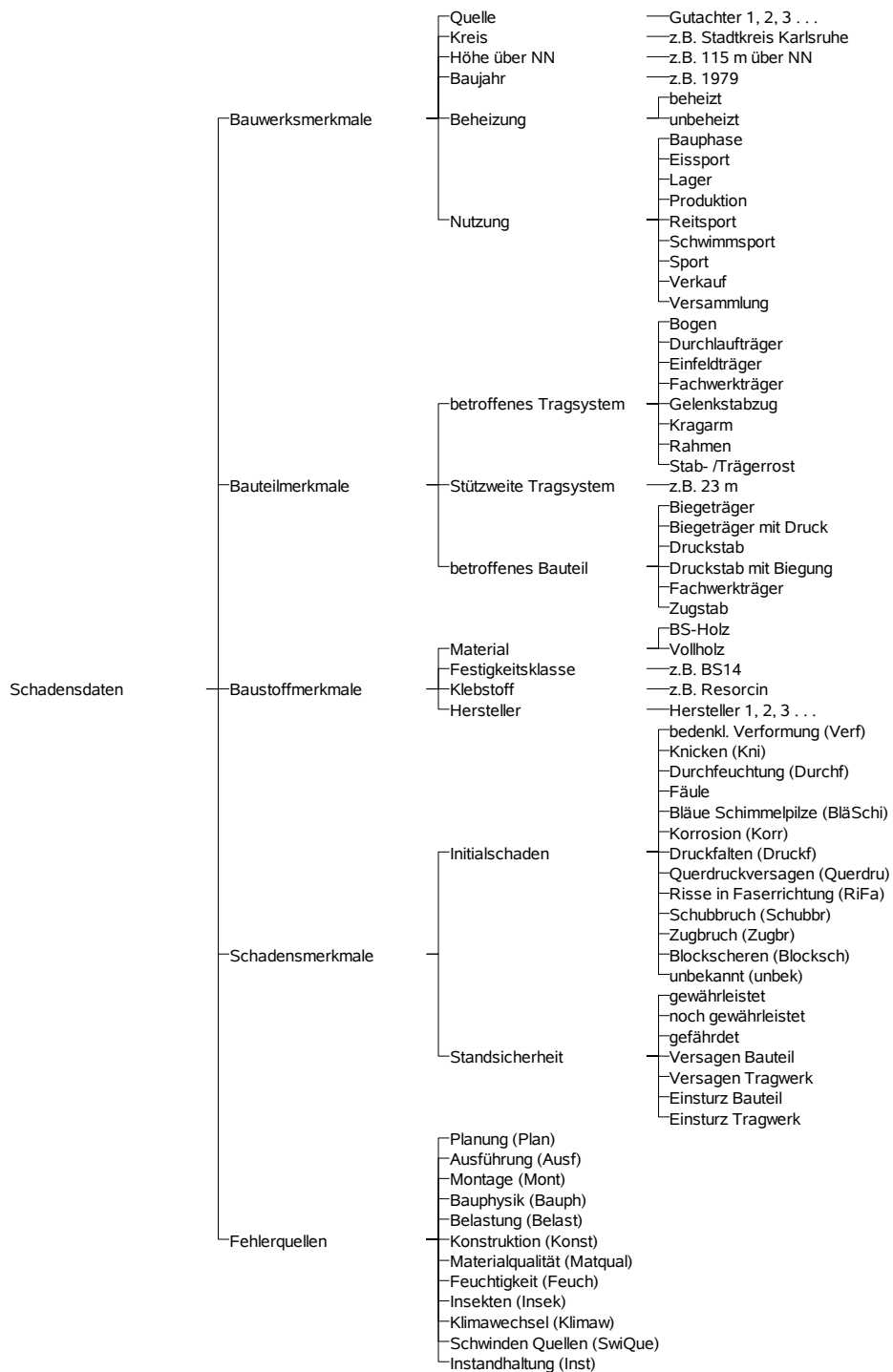


Bild 1: Auswahl an Schlagwörtern und an quantitativen Merkmalen, Abkürzungen in Klammern für Tabelle 12

Nicht jeder Initialschaden stellt notwendigerweise eine Versagensform dar; die Initialschäden *bedenkliche Verformung, Durchfeuchtung, Fäule, Bläue- oder Schimmelpilze, Korrosion* oder unbedenkliche *Risse in Faserrichtung* (vgl. Bild 2) führen in der Regel nicht zum Versagen eines Bauteils oder Tragwerks. Der *Zugbruch* schließt im Sinne der vorliegenden Systematik den Biegebruch ein, weil dieser zu-
meist durch ein lokales Zugversagen ausgelöst wird. Kapitale *Risse in Faserrichtung* (Bild 3/8), *Schub-* (Bild 2) und *Zugbrüche* haben eine besondere Bedeutung. Durch sie werden Festigkeitswerte von verbautem Voll- und BS-Holz in Bauteilgröße unter Beweis gestellt. Diese von Labormethoden unabhängige „Prüfung“ zeigt Stärken und Schwächen des Materials vor dem Hintergrund von Klimawechseln, Belastungshistorie und Bauteilgröße auf.



Bild 2: Initialschäden – Fäule (*oben links*), Bläue- oder Schimmelpilze (*oben rechts*), Risse in Faserrichtung (hier unbedenkliche Schwindrisse, *unten links*), Schubbruch (Trägerhälfte der Druckzone tritt am Hirnholz hervor, *unten rechts*)

Die Merkmalsausprägungen der *Standicherheit* sind Einschätzungen der Experten in deren Gutachten. Sie beziehen sich auf beschädigte Bauteile oder ganze Tragwerke. *Gewährleistet* steht für eine ausreichende Standicherheit; *noch gewährleistet* heißt, dass baldige Sanierungsarbeiten empfohlen werden; *gefährdet* sind Bauteile oder Tragwerke, bei denen ein gravierender Initialschaden vorliegt, der die Standicherheit unter das erforderliche Maß absinken lässt. Größere Instandsetzungsarbeiten sind dann erforderlich. Die Schlagwörter *Versagen Bauteil* oder *Versagen Tragwerk* stehen für den offensichtlichen Verlust der Standicherheit, nicht aber für einen Einsturz. Das Bauteil oder Tragwerk kann seine Funktion nicht länger erfüllen (Bild 3, oben). Um dem subjektiven Sicherheitsbedürfnis zunächst ge-



Bild 3: Risse in Satteldachbindern mit geneigtem Untergurt: sofortige Abstützung/Sicherung notwendig (*oben links und rechts*), fachgerecht ertüchtigte Binder (*unten*)

recht zu werden, müssen z. B. Abstützungs- oder Sicherungsmaßnahmen alsbald durchgeführt werden. *Einsturz Tragwerk* steht für den vollständigen Verlust eines Bauwerks, *Einsturz Bauteil* für einen Teilverlust. Eine Instandsetzung ist dann mit entsprechend großem Aufwand verbunden. Die Ausprägungen der Standsicherheit unterliegen einer Rangfolge, die durch das Spektrum zwischen standsicher und Einsturz gekennzeichnet ist.

Die Ausprägungen der Fehlerquellen entsprechen 12 Kategorien, denen die Ursachen für Initialschäden zugeordnet werden. Eine Auswahl solcher Ursachen enthält Tabelle 1. Die Fehlerquelle *Planung* betrifft die technische Planung einer Konstruktion, eines Bauteils bzw. Tragwerks. Charakteristisch für die Fehlerquelle *Bauphysik* ist allgemein ein ungünstiger Wärmetransport. *Konstruktion* umfasst konstruktive Eigenarten, die bei einem Schadensfall zu den unmittelbaren begleitenden Umständen zählen. *Bauphysik* und *Konstruktion* werden, obwohl sie ihren Ursprung bereits in der technischen Planung haben, wegen ihrer großen Bedeutung als eigene Fehlerquellen aufgeführt. *Ausführung* betrifft die qualitative Durchführung der Arbeiten auf der Baustelle und kennzeichnet ungünstige Abweichungen von der Planung. *Montage* erfasst Mängel bei der Montage von Bauteilen und Tragsystemen. *Belastung* bezieht sich auf jede Art von Überlastung. *Feuchtigkeit* meint Feuchtigkeitszutritt, der stets äußere Ursachen hat, und betrifft damit nicht schädliche Feuchtigkeit aufgrund von z. B. Wärmestrahlung (in Eissporthallen) oder mangelndem baulichem Holzschutz. *Klimawechsel* sind die Ursache für daraus resultierende Eigenspannungen in BS-Holz-Querschnitten, s. [3,4]. *Schwinden oder Quellen* meint die längerfristige richtungsgebundene Volumenänderung eines ganzen Bauteils. *Schwinden oder Quellen* wird nur in Kombination mit der Fehlerquelle *Konstruktion* genannt, wenn konstruktive Eigenarten das Schwinden behindern (Wo nichts schwindet, führt auch eine Behinderung nicht zum Schaden). Für einige Fehlerquellen lassen sich Verantwortliche benennen: *Planung*, *Bauphysik* und *Konstruktion* betreffen die gesamte Planungsphase eines Bauwerks und damit die Planer, *Ausführung* und *Montage* den Bauunternehmer. *Materialqualität* steht fast ausnahmslos im Zusammenhang mit Herstellern von BS-Holz und *Instandhaltung* mit Eigentümern oder Verfügungsberechtigten.

Tabelle 1: Kategorien der Fehlerquellen

Schlagwort	Ursachen
Planung	Verstöße gegen Vorschriften/allgemein anerkannte Regeln der Technik; Nichtbeachtung von Ingenieurwissen, z.B. in der Fachliteratur; Fehler in der statischen Berechnung
Ausführung	Verwendung von frischem Holz; fehlende Entwässerung aufgrund von falsch installierten Abläufen; falsche Anzahl oder falscher Durchmesser der Verbindungsmittel; Nichtbeachtung von Vorschriften hinsichtlich der Bauausführung; ungünstige Veränderungen des Tragsystems, der Querschnittsmaße oder der Festigkeitsklasse
Montage	Transportschäden; unzureichender Bauteilschutz gegen Witterungseinflüsse; fehlende Stützmaßnahmen während der Bauphase
Bauphysik	Wärmestrahlung (Eissporthallen); Sonneneinstrahlung; Bauteile, die Innen- und Außenklima ausgesetzt sind (z.B. Giebelbinder)
Belastung	Überlastung hinsichtlich ständiger Lasten, Nutz-, Schnee- und Windlasten sowie Wasseransammlung (auf Flachdächern)
Konstruktion	Ausgeklinkte Träger; Dübelkreise in Rahmenecken; Träger mit Durchbrüchen; mangelhafter baulicher Holzschutz; Zugspannungen quer zur Faser bei Queranschlüssen; Schwindbehinderung (z.B. Schlitzbleche); biegebeanspruchte gekrümmte oder geknickte Bauteile; ungewollte Einspannungen; hinsichtlich Berechnung und Ausführung schwer beherrschbare Konstruktionen
Materialqualität	Mangelhafte Qualität von Holz, Keilzinken oder Klebefugen hinsichtlich der erforderlichen Eigenschaften; Vorschädigungen
Feuchtigkeit	Hohe Holzfeuchte aufgrund von Dachundichtigkeiten oder Sprinkleranlagen in Reithallen
Klimawechsel	Zyklische Holzfeuchte-Änderungen bei BS-Holz aufgrund von Klimawechseln mit der Folge von wechselnden Feuchtegefällen im Querschnitt
Schwinden oder Quellen	Langfristige Ab- oder Zunahme der Holzfeuchte mit der Folge von Schwinden oder Quellen
Instandhaltung	Versäumnisse bei der Inspektion, Wartung und Instandsetzung

3 Darstellung der Bauwerke und ihrer Schäden

3.1 Allgemeines

Die Datenbank enthält 709 Datensätze. Jeder beschreibt im Kern einen einzigen inner- oder außerhalb eines Bauwerks unabhängigen Initialschaden und begleitend die Bauwerks-, Bauteil- und Baustoffmerkmale sowie die dem Initialschaden zugeordneten

Fehlerquellen. Mehrfachzuordnungen sind bei den Fehlerquellen die Regel. Da in manchen Bauwerken zwei und mehr Schäden vorhanden sind, verteilen sich die 709 Schäden auf insgesamt 529 Bauwerke. In 44 Fällen war die Zuweisung einer eindeutigen Merkmalsausprägung zu einem Initialschaden nicht möglich. In solchen Fällen wird ein Initialschaden als *unbekannt* bezeichnet. Aufgrund von fehlenden Angaben in den Schadensbeschreibungen wurden nicht für alle Merkmale bzw. Fehlerquellen entsprechende Ausprägungen festgelegt. Die Gesamtzahlen in den folgenden Tabellen und Diagrammen sind daher unterschiedlich.

3.2 Bauwerksmerkmale

Die Standorte der Bauwerke liegen hauptsächlich in den alten Bundesländern Deutschlands (Bild 4). Daten zu Schadensfällen in den neuen Bundesländern waren nur in Einzelfällen verfügbar. Grund ist die Teilung bis 1989, durch die der Austausch zwischen Sachverständigen bis zur Wiedervereinigung und auch noch lange danach eingeschränkt war. Rückschlüsse, dass Hallentragwerke aus Holz in den neuen Bundesländern keine vergleichbaren Schäden aufweisen, dürfen daher nicht abgeleitet werden. Die meisten Schäden stammen aus den vier Bundesländern mit den höchsten Bevölkerungszahlen: Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen sowie aus Schleswig-Holstein, dem Wirkungsbereich des unmittelbar kooperierenden Holzleimbauunternehmens Gebr. Schütt KG (Tabelle 2). Fast schon beunruhigend muss dabei sein, dass die gegenüber der Forschungsarbeit [2] von 550 (Werte in Klammern) um 159 Fälle erweiterte Analyse mehr als zu einer Verdreifachung der Schäden in Schleswig-Holstein und zu einem deutlichen Anstieg in Niedersachsen führt. Ein ebenso intensives Zusammentragen von Schadensereignissen in den übrigen Bundesländern würde folglich ähnliche Vervielfachungen erwarten lassen. Die im Zuge der Schadenserhebung bislang verfügbaren bzw. zugänglich gemachten und hier dargestellten Schäden sind daher sehr wahrscheinlich weit weniger als ein Drittel derjenigen, die im Sinne dieser Auswertung beschreib- und analysierbar wären. Hinsichtlich der Schneelast wurde die Geländehöhe der Bauwerke erfasst (Bild 5). Sie reicht von -1 m im Norddeutschen Tiefland bis 1145 m über NN im Mittelgebirgs-, Alpenvorland bzw. in den Alpen. Das Baujahr der Bauwerke umfasst einen Zeitraum von 1912 bis 2006 und beträgt im Mittel 1980 (Bild 6). 81 % der Hallentragwerke haben eine geschlossene Gebäudehülle. Die Verteilung der Nutzungsklassen (NKL) zeigt, dass NKL 1 überwiegt (Tabelle 3). Die Mehrzahl der Hallen ist beheizt. Hinsichtlich der Nutzung

finden sich unter den geschädigten Hallen häufig Sport-, Lager- und Produktionshallen und solche, die der Versammlung dienen.

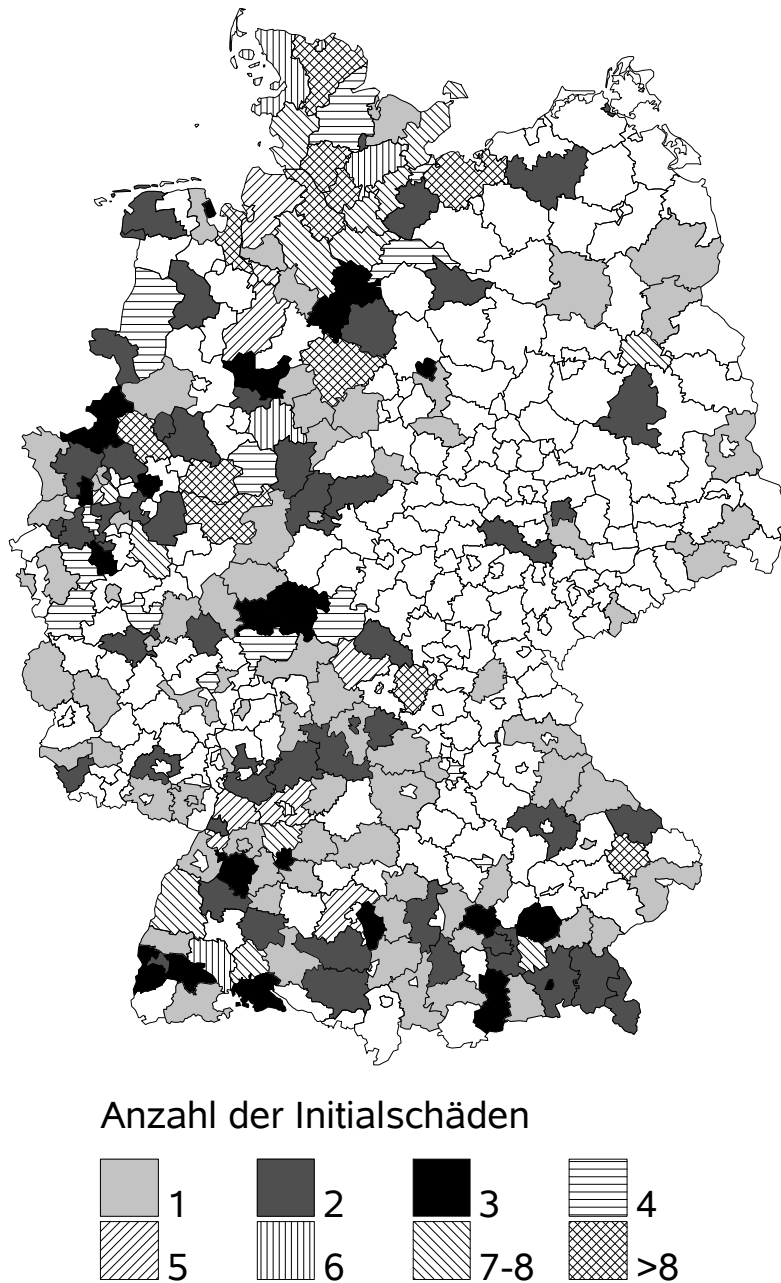


Bild 4: Verteilung der Initialschäden in einer Deutschlandkarte mit Kreisgrenzen

Tabelle 2: Initialschäden je Bundesland

Bundesland	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
Baden-Württemberg	91/709 (90/550)	12,8 (16,4)
Bayern	113/709 (108/550)	15,9 (19,6)
Hessen	30/709 (30/550)	4,2 (5,5)
Niedersachsen	107/709 (70/550)	15,1 (12,7)
Nordrhein-Westfalen	131/709 (120/550)	18,5 (21,8)
Schleswig-Holstein	101/709 (30/550)	14,3 (5,5)
Restliche (jeweils < 20)	76/709 (42/550)	10,7 (7,6)
keine Angabe	60/709 (60/550)	8,5 (10,9)

In Klammern: ursprüngliche Analyse von 550 Initialschäden

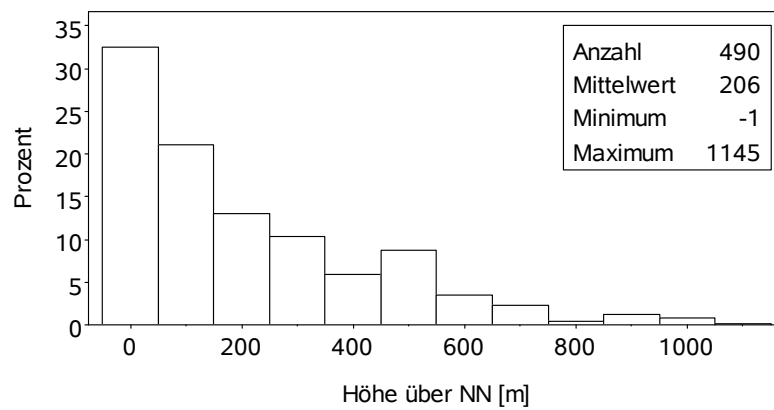


Bild 5: Häufigkeitsverteilung der Geländehöhe

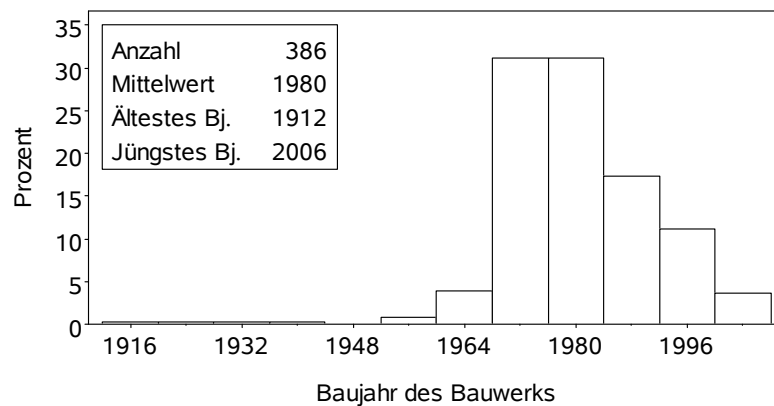


Bild 6: Häufigkeitsverteilung des Baujahres der Bauwerke

Tabelle 3: Nutzungsklassen der Bauwerke

Nutzungsklasse	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
1	374/529	70,7
2	69/529	13,0
3	28/529	5,3
keine Angabe	58/529	11,0

3.3 Bauteil- und Baustoffmerkmale

Schäden wurden hauptsächlich bei Ein- und Mehrfeldträgern (einschließlich solcher mit Gelenken) sowie bei Rahmen beobachtet (Tabelle 4). Die 19 aufgeführten Fachwerkträger stehen für nicht spezifizierte Tragsysteme, in denen nur einzelne Bauteile wie Gurte (Biegeträger), Druck- oder Zugstäbe betroffen waren. Die Mehrheit der betroffenen Tragsysteme ist statisch bestimmt; statisch unbestimmte Systeme sind selten (Tabelle 5). Die Anteile in den Tabellen 4 und 5 entsprechen folglich einander.

Tabelle 4: Betroffene Tragsysteme

Tragsystem	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
Einfeldträger	370/601	61,6
Kragträger	16/601	2,7
Mehrfeldträger	36/601	6,0
Gelenkstabzug	17/601	2,8
Rahmen	56/601	9,3
Bogen	13/601	2,2
Fachwerkträger	19/601	3,2
Sonstige	10/601	1,7
keine Angabe	64/601	10,7

Tabelle 5: Statische Bestimmtheit der Tragsysteme

Bestimmtheit	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
bestimmt	477/601	79,4
1fach unbestimmt	19/601	3,2
2fach unbestimmt	2/601	0,3
vielfach unbestimmt	6/601	1,0
keine Angabe	97/601	16,1

Die Verteilung der Tragsystem-Stützweite zeigt Bild 7. Der Modalwert ist 20 m und entspricht der typischen Stützweite bei Sport- und Reitsporthallen. Schäden an sehr weit gespannten Hallen wurden eher selten beobachtet, vgl. jedoch [5].

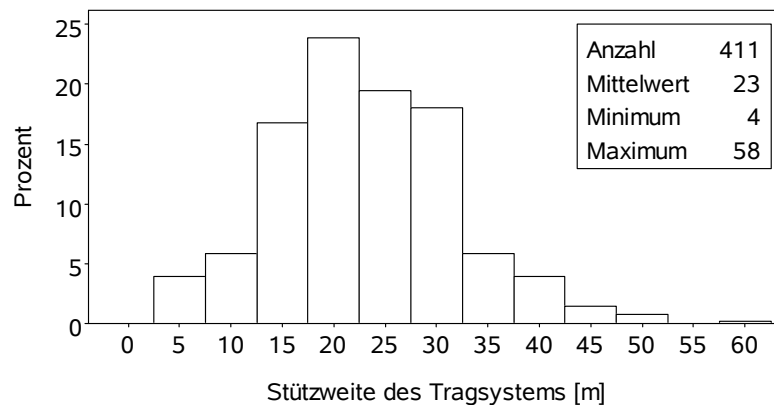


Bild 7: Häufigkeitsverteilung der Stützweite

Die Anteile der betroffenen Bauteile sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Biegeträger, die erwartungsgemäß häufig das Primärtragwerk bilden, sind dementsprechend oft von Schäden betroffen. Mit größerem Abstand folgen Biegeträger mit Druck (Rahmenriegel), Druckstäbe mit Biegung (Rahmenstiele) und Fachwerkträger. Unauffällig sind Druck- und Zugstäbe. Die anteilige Zusammensetzung der Bauteilformen in Tabelle 7 zeigt, dass nicht nur gekrümmte Bauteile und Satteldachträger, jeweils planmäßig durch Querkraft beansprucht, besonders häufig auffällig sind, sondern auch gerade Bauteile. Nahezu 90 % der geschädigten Bauteile sind aus BS-Holz (Tabelle 8). In den meisten Fällen handelt es sich um BS-Holz der Güteklasse I. Mit Abstand folgen BS14, dann Güteklasse II und zum Schluss bei Hallen jüngeren Baujahrs bereits einige wenige Bauteile der GL-Klassen. Den geschädigten BS-Holz-Bauteilen sind über 40 namentlich unterschiedliche Hersteller zugeordnet. Dabei ist anzunehmen, dass Werksgröße bzw. Produktionsleistung der einzelnen Hersteller und die Schadenshäufigkeit von Bauteilen aus ihrer Herstellung proportional zueinander sind. Schadenshäufungen im Zusammenhang mit bestimmten Herstellern sind mit Sicherheit auszuschließen. Die Vielzahl der Hersteller ist ein Indiz dafür, dass Schäden an BS-Holz ein produktspezifisches Problem darstellen.

Tabelle 6: Betroffene Bauteile

Betroffenes Bauteil	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
Biegeträger	425/601	70,7
Biegeträger mit Druck	46/601	7,7
Druckstab	9/601	1,5
Druckstab mit Biegung	47/601	7,8
Zugstab	13/601	2,2
Fachwerkträger	25/601	4,2
keine Angabe	36/601	6,0

Tabelle 7: Bauteilformen

Bauteilform	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
gerade	189/601	31,5
geknickt	10/601	1,7
gekrümmt	59/601	9,8
trapezförmig	31/601	5,2
fischbauchförmig	13/601	2,2
parallel ¹	3/601	0,5
Satteldach ²	15/601	2,5
Satteldach UG geneigt	149/601	24,8
Satteldach UG gerade	80/601	13,3
keine Angabe	52/601	8,7

¹ Ausschließlich Fachwerkträger, ² UG-Neigungen unbekannt

Tabelle 8: Baustoffe

Baustoff	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
BS-Holz	535/601	89,0
BS-Holz/Vollholz ¹	2/601	0,3
BS-Holz/Holzwerkstoff ¹	7/601	1,2
Vollholz	47/601	7,8
Holzwerkstoff	4/601	0,7
keine Angabe	6/601	1,0

¹ Kombination aus beiden

3.4 Schadensmerkmale und weiterführende Überlegungen

Tabelle 9 zeigt die Verteilung der Initialschäden auf die definierten Schadensbilder. Über 70 % entfallen auf Risse in Faserrichtung, die vorwiegend in BS-Holz-Bauteilen festgestellt wurden (vgl. Tabelle 8). 5-6 % entfallen jeweils auf Zug-, Schubbrüche und Fäule. In der Summe betreffen 5 % die Gebrauchstauglichkeit bzw. auch das Aussehen der Bauteile. Knicken und Korrosion liegen im Bereich von jeweils 1 %. Blockscheren und Querdruckversagen sind Einzelfälle. Druckfalten sind in der Datenbank nicht registriert. In 6 % der Fälle fehlten in den Schadensbeschreibungen belastbare Angaben, um ein Schadensbild eindeutig festzulegen.

Tabelle 9: Verteilung der Initialschäden

Initialschaden	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
bedenkliche Verformung	19/709	2,7
Knicken	6/709	0,9
Durchfeuchtung	12/709	1,7
Fäule	39/709	5,5
Bläue- oder Schimmelpilze	5/709	0,7
Korrosion	8/709	1,1
Druckfalten	0/709	0,0
Querdruckversagen	2/709	0,3
Risse in Faserrichtung	507/709	71,5
Schubbruch	29/709	4,1
Zugbruch	27/709	3,8
Zug- oder Schubbruch ¹	9/709	1,3
Blockscheren	2/709	0,3
unbekannt	44/709	6,2

¹ Eindeutige Unterscheidung nicht möglich

Die ausgeprägte Häufigkeit von Rissen in Faserrichtung in gekrümmten BS-Holz-Trägern mit öffnenden Biegemomenten (Bild 3) war Auslöser für weitergehende Überlegungen zu ihrer Entstehung [2,6]. Unter Berücksichtigung der Anisotropie der Schwind- und Quellmaße in der Ebene gekrümmter Bereiche (longitudinal/tangential-radial $\approx 1:24$) führen Holzfeuchte-Änderungen zu Krümmungsänderungen und bei ungünstigen Lagerungsbedingungen zu Querspannungen. Ein in der Rand- und Kernzone unterschiedlich ausgeprägtes Längsschwindverhalten der Lamellen

bedingt bei Holzfeuchte-Änderungen in kombinierten gekrümmten Trägern ebenfalls Querspannungen. Diese Spannungen wirken begünstigend auf die Entstehung von Rissen in gekrümmtem BS-Holz. Zur Verformungsberechnung von BS-Holz-Bauteilen in Abhängigkeit von Holzfeuchte-Änderungen sei auf [2,7,8] verwiesen.

Insbesondere Gutachten enthalten präzise Angaben über die relative Risttiefe (Bild 8) und die Holzfeuchte der betroffenen Bauteile. Das Diagramm in Bild 9 zeigt die Zusammenhänge zwischen beiden Werten. Die Darstellung ist kein Widerspruch dazu, dass Risse in Faserrichtung bevorzugt in solchen Bauteilen angetroffen werden, die der NKL 1 zuzuweisen sind bzw. die zum Zeitpunkt der Messung eine niedrige Holzfeuchte aufweisen.

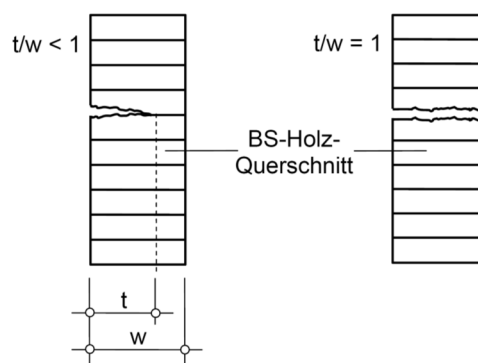


Bild 8: Relative Risttiefe in BS-Holz: teilweiser (*links*) und durchgehender Riss (*rechts*)

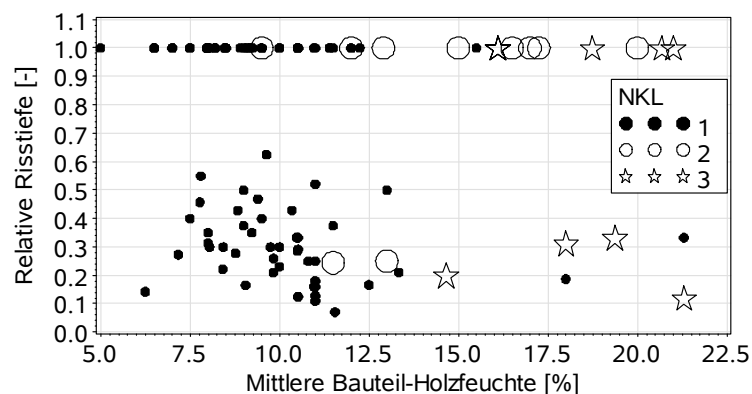


Bild 9: Zusammenhänge zwischen Risttiefe und Holzfeuchte

Bild 10 zeigt die Verteilung der Bauteilhöhe (im Bereich des Auflagers) von BS-Holz-Trägern mit Schubbrüchen. Bei 21 Trägern der über 29 registrierten Schubbrüche sind die Bauteilhöhen bekannt. Sie liegen zwischen 650 und 2400 mm. Die Verteilung reflektiert, dass hohe Bauteile mit einem großen schubbeanspruchten Volumen eine geringere wirksame Schubfestigkeit besitzen als weniger hohe. Es sind in den untersuchten Schadensbeschreibungen keine Schubbrüche an BS-Holz-Bauteilen mit einer Höhe unter 650 mm dokumentiert.

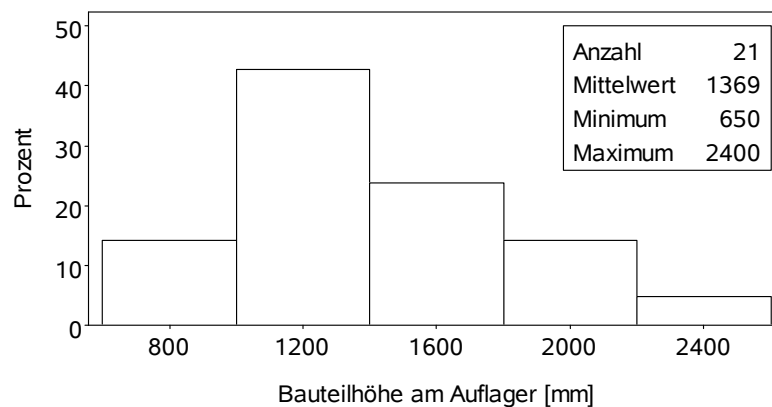


Bild 10: Häufigkeitsverteilung der Bauteilhöhe von BS-Holz-Bauteilen mit Schubversagen im Auflagerbereich

Tabelle 10 zeigt die Verteilung der Folgen, die die Initialschäden für die Standsicherheit der Bauteile oder Tragwerke nach sich ziehen. Bei einem knappen Viertel ist die Standsicherheit gewährleistet (einschließlich *noch gewährleistet*), bei einem weiteren Viertel gefährdet. Bei einem weiteren knappen Viertel kam es zum Versagen oder Einsturz. Für den Rest lagen keine Bewertungen vor. Die Ausprägungen (*noch*) *gewährleistet* und *gefährdet*, deren Anteile zusammen fast 50 % betragen, zeigen, dass nach fachkundigen Inspektionen offensichtlich Einschätzungen zur Standsicherheit von Bauteilen und Tragwerken ableitbar sind. Darauf können geeignete Maßnahmen aufbauen, die die Standsicherheit weiterhin gewährleisten und die Lebensdauer verlängern. Der gemeinsame Anteil der Bewertungen *noch gewährleistet*, *gefährdet* und *Versagen Bauteil bzw. Tragwerk* (54 %) belegt überdies für einen großen Teil der Hallentragwerke und ihrer Tragsysteme die Erfüllung grundlegender Anforderungen an Bauwerke im Schadensfall [9]. Eine Verteilung

ohne solche Bewertungen, die den zumeist un stetigen Übergang zwischen standsicher und Einsturz graduell unterteilen, würde bedeuten, dass Tragwerke ohne Vorankündigung ihre Standsicherheit verlieren und ein stürzen. Im Sinne des Abwendens eines Einsturzes kennzeichnen die vorgenannten Bewertungen genau den Handlungsspielraum, in dem noch rechtzeitig reagiert werden kann (vgl. Bild 3, oben). Tragwerke sind natürlichen und nicht natürlichen Abnutzungen unterworfen. Der Inspektion, vgl. [10], Wartung und Instandsetzung von Tragkonstruktionen auch aus Holz kommt insofern eine große Bedeutung zu. In der Planung muss daher die Zugänglichkeit zu tragenden Bauteilen für Inspektionen bestmöglich berücksichtigt werden. Entscheidend für den Erfolg einer Instandhaltungsmaßnahme ist allerdings nicht nur die geschuldete Sachkunde, sondern auch Unabhängigkeit der beauftragten Personen und Firmen.

Tabelle 10: Bewertungen zur Standsicherheit

Standsicherheit	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
gewährleistet	58/709	8,2
noch gewährleistet	109/709	15,4
gefährdet	178/709	25,1
Versagen Bauteil	96/709	13,5
Versagen Tragwerk	3/709	0,4
Einsturz Bauteil	16/709	2,3
Einsturz Tragwerk	41/709	5,8
keine Angabe	208/709	29,3

Von 127 Schadensfällen ist das Jahr und bei 100 der Monat, in dem ein für die Standsicherheit relevanter Initialschaden auftrat, genau bekannt. Solche Schäden sind insbesondere Risse in Faserrichtung, Zug- und Schubbrüche. Sie stehen im Zusammenhang mit Schnittkräften, die in der Regel unter Einwirkung von Schnee Höchstwerte erreichen und daher eine jahreszeitliche Abhängigkeit aufweisen. Während in Bild 11, oben, die Jahre, in denen ein Schaden eintrat, gleichmäßig verteilt sind (1956 ausgenommen), wird in Bild 11, unten, für Januar bis März eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit deutlich als für die übrigen Monate. Es besteht folglich Übereinstimmung mit der Annahme, dass trockenes (Innen-)Klima im

Winter und Vorfrühling zusammen mit Einwirkungen aus Schnee für die standsicherheitsrelevanten Initialschäden, insbesondere für Risse in Faserrichtung, zumindest mit auslösend sind.

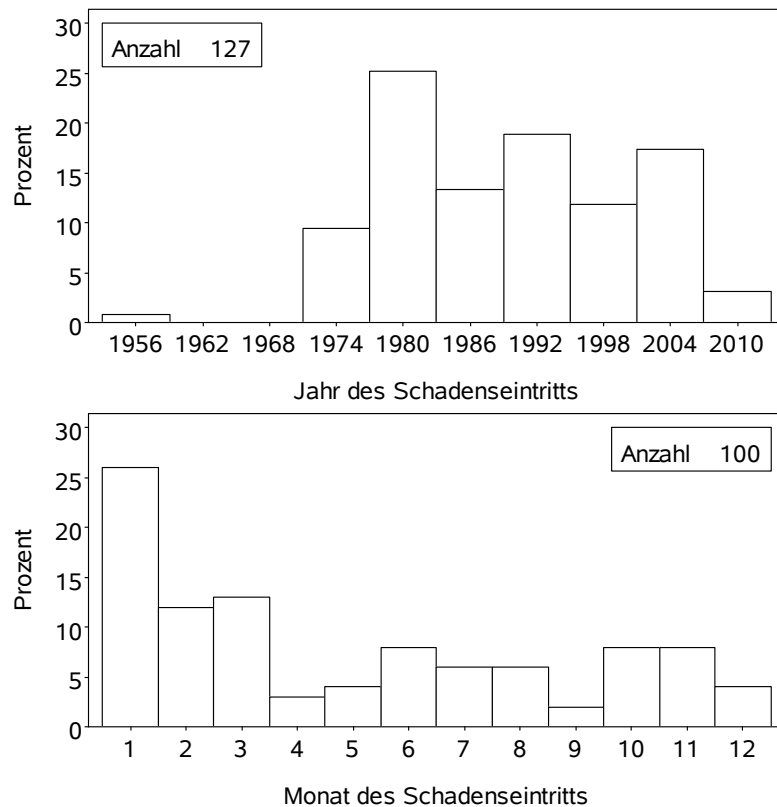


Bild 11: Häufigkeitsverteilung des Jahres (*oben*) und Monats (*unten*), in dem ein standsicherheitsrelevanter Initialschaden eingetreten ist

Davon unabhängig wurde in der überarbeiteten Schneelastnorm von 2005 [11] bzw. 2010 [12] – im Unterschied zur Fassung von 1975 [13] – der charakteristische Wert der anzusetzenden Schneelast für höhere Lagen fallweise deutlich angehoben, vgl. [14]. Werden diejenigen Hallentragwerke aus der Datenbank isoliert betrachtet, für die nach gegenwärtiger Normung eine effektiv um mehr als 25 % höhere Schneelast anzusetzen wäre als noch nach der Fassung von 1975, dann beträgt der Anteil der Bauteile und Tragwerke mit *Versagen* oder *Einsturz* das 2- bis 3fache im Vergleich mit der Auswertung der komplementären Hallentragwerke. Insofern war eine aus

heutiger Sicht überhöhte Schneebelastung in der Vergangenheit in einigen Fällen mit Ursache für Formen des Versagens und Einsturzes. Ein Anheben der charakteristischen Werte der Schneelast in höheren Lagen ist nachweislich der richtige Schritt zum Abbau einer hinsichtlich der geografischen Lage unausgewogenen Standsicherheit.

Bei über 35 % der standsicherheitsrelevanten Schäden lag eine Spanne von fünf Jahren zwischen Baujahr und Schadenseintritt, bei der Mehrheit der Fälle waren es zehn (Bild 12). Das frühe Eintreten von Schäden, beherrscht von Rissen in Faserichtung, ist die Folge der Holz Trocknung z. B. durch rasches Beheizen. Es resultieren daraus ungünstige Eigen- bzw. Querkzugspannungen.

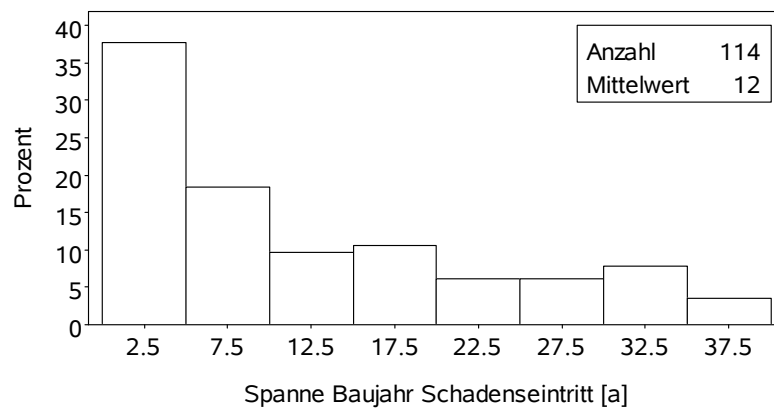


Bild 12: Häufigkeitsverteilung der Spanne zwischen Baujahr und Eintritt von standsicherheitsrelevanten Schäden

3.5 Fehlerquellen

Insgesamt verteilen sich 1282 Fehlerquellen auf 709 Schäden. Mit einem Schaden sind somit im Mittel fast zwei Quellen assoziiert. Wenn ein Kausalzusammenhang gegeben ist (vgl. Bild 13), wurde eine Fehlerquelle ohne Gewichtung einem Schaden zugeordnet, d.h. sie wird entweder ganz oder nicht mit einem solchen verknüpft. Auch gibt es keine Rangfolge innerhalb der Quellen, die ihnen eine spezifische quantitative Bedeutung zukommen lässt oder sie untereinander vergleichbar macht.



Bild 13: Umstände, die zu Schäden führen können: Während der *Planung/Ausführung* nicht realisierte Gabellagerung (*oben links*), der *Bauphysik* zuzuzählende mögliche Rissbildung in BS-Holz durch lokale Aufheizung/Austrocknung hinter geplanten Verglasungen (*oben rechts*), durch die *Montage* bedingte Bewitterung von BS-Holz (*unten links*) und *Konstruktion* von Dübelkreisen, in denen beim *Schwinden* Zwangsspannungen wirken (*unten rechts*)

Die einzelnen Anteile der Fehlerquellen zeigt Tabelle 11. Darin werden zunächst die Schwerpunkte der Ursachen für die hier analysierten Schäden deutlich: Hauptsächlich werden Schäden im Zusammenhang mit der *Konstruktion* (29 %) beobachtet. Das sind vor allem solche, in denen Querkzugspannungen wirken oder die einen mangelhaften baulichen Holzschutz aufweisen. *Klimawechsel* (12,6 %), *Schwinden oder Quellen* (9,8 %), nur alleine betrachtet, *Belastung* (9,5 %), *Materialqualität* (7,1 %), *Planung* (9,0 %), *Bauphysik* (6,3 %) und *Ausführung* (5,2 %) sind von mäßiger Bedeutung. Eine untergeordnete Rolle spielen ungünstige Einflüsse aus *Montage*, *Feuchtigkeit* und *Instandhaltung*.

Tabelle 11: Verteilung der allgemeinen Fehlerquellen

Fehlerquellen	Anzahl/Gesamt	Anteil [%]
Planung	115/1282	9,0
Ausführung	67/1282	5,2
Montage	27/1282	2,1
Bauphysik	81/1282	6,3
Belastung	122/1282	9,5
Konstruktion	372/1282	29,0
Materialqualität	91/1282	7,1
Feuchtigkeit	27/1282	2,1
Insekten	0/1282	0
Klimawechsel	162/1282	12,6
Schwinden oder Quellen	125/1282	9,8
Instandhaltung	12/1282	0,9
keine Angabe	81/1282	6,3

Abschließend schlüsselt die Kreuztabelle 12 alle Verknüpfungen zwischen Initialschäden und Fehlerquellen auf. Für die im Holzbau besonders nachteiligen Schäden wie *Fäule*, *Risse in Faserrichtung* sowie *Schub- und Zugbruch* lassen sich mittels der Kreuztabelle diejenigen Fehlerquellen als Hauptursachen festlegen, die die meisten Verknüpfungen aufweisen:

- Konstruktion (40 %) + Feuchtigkeit (20 %) → Fäule,
- Konstruktion (34 %) + Klimawechsel (16 %) → Risse in Faserrichtung,
- Konstruktion (19 %) + Belastung (17 %) + Materialqualität (14 %) → Schubbruch,
- Belastung (26 %) + Materialqualität (24 %) → Zugbruch.

Die gerundeten Prozentwerte in Klammern entsprechen denjenigen der Kreuztabelle. Kriterium für die Auswahl der vier Fehlerquellen-Kombinationen war, dass die Summe ihrer Anteile jeweils mindestens 50 % beträgt, wodurch die angegebenen Kombinationen ihre Bedeutung als Hauptursache erhalten. Zum Beispiel entfallen bei *Fäule* 40 % der Verknüpfungen auf die Fehlerquelle *Konstruktion* und 20 % auf *Feuchtigkeit*. Bei *Rissen in Faserrichtung* und *Schubbrüchen* tritt die *Konstruktion* mit 34 % bzw. 19 % hervor. Die Schadensursachen liegen daher insbesondere in der Wahl oder im Entwurf einer ungeeigneten Konstruktion, die durch

mangelhafte Planung und Detaillierung gekennzeichnet ist. Außergewöhnlich hohe Belastungen (im Sinne des probabilistischen Sicherheitskonzepts) und schlechte Materialqualität zählen zu den Hauptursachen der erfassten Schub- bzw. Zugbrüche.

Tabelle 12: Initialschäden und zugeordnete Fehlerquellen

	Plan	Ausf	Mont	Bauph	Belast	Konst	Mat- qual	Feuch	Klimaw	SwiQue	Inst	k.A. ²	Σ
Verf	1	9	2	2	9	2	1	0	0	1	0	1	28
	3,57 ¹	32,1	7,14	7,14	32,1	7,14	3,57	0	0	3,57	0	3,57	
Kni	2	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	8
	25	25	0	0	37,5	0	0	0	0	0	0	12,5	
Durchf	1	0	1	7	0	2	0	3	0	0	1	0	15
	6,67	0	6,67	46,7	0	13,3	0	20	0	0	6,67	0	
Fäule	2	1	0	6	1	22	1	11	0	0	7	4	55
	3,64	1,82	0	10,9	1,82	40	1,82	20	0	0	12,7	7,27	
BläSchi	0	1	0	5	0	0	0	2	0	0	0	0	8
	0	12,5	0	62,5	0	0	0	25	0	0	0	0	
Korr	0	2	0	3	0	1	0	3	0	0	0	0	9
	0	22,2	0	33,3	0	11,1	0	33,3	0	0	0	0	
Querdru	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5
	80	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	
RiFa	87	29	22	51	51	325	61	4	155	119	1	60	965
	9,02	3,01	2,28	5,28	5,28	33,7	6,32	0,41	16,1	12,3	0,1	6,22	
Schubbr	7	5	0	4	11	12	9	1	6	5	0	4	64
	10,9	7,81	0	6,25	17,2	18,8	14,1	1,6	9,38	7,81	0	6,25	
Zugbr	8	10	0	3	14	2	13	2	0	0	1	2	55
	14,6	18,2	0	5,45	25,5	3,64	23,6	3,6	0	0	1,82	3,64	
Schubbr o. Zugbr	1	0	0	0	8	3	2	0	1	0	0	0	15
	6,67	0	0	0	53,3	20	13,3	0	6,67	0	0	0	
Block- sch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
unbek	2	8	2	0	24	3	4	1	0	0	2	7	53
	3,77	15,1	3,77	0	45,3	5,66	7,55	1,89	0	0	3,77	13,2	
Σ³	115	67	27	81	122	372	91	27	162	125	12	81	1282
	8,97	5,23	2,11	6,32	9,52	29	7,1	2,11	12,6	9,75	0,94	6,32	100

Fehlerquellen (1. Zeile) und Initialschäden (1. Spalte); Anzahl (oben) und Prozentwerte (unten)

¹ Beispiel: $1/28 \cdot 100 = 3,57\%$, ² keine Angabe

³ Summen und prozentuale Anteile ebenfalls in Tabelle 11

3.6 Konsequenzen

Da die unmittelbare Einflussnahme der Ingenieure auf außergewöhnlich hohe Belastungen, z.B. durch Schneelasten weit oberhalb der charakteristischen Werte, und auf die Materialqualität gering ist, wird nach den Erkenntnissen dieser Analyse der eigentliche Schlüssel zur Schadensvermeidung in der Verbesserung des Konstruktionsprozesses gesehen, der Ausarbeitung eines Entwurfs mittels technischer Berechnungen und Überlegungen. Branchenübergreifende Hinweise zum erfolgreichen Konstruieren enthält die VDI-Richtlinie 2221 [15]. Die wichtigsten Schlussfolgerungen, die sich im Einzelnen für die verantwortlich am Bauprozess Beteiligten ergeben, sind folgende:

- Planer: Vermeidung von Querspannungen oder Dimensionierung von Querszugverstärkungen; Berücksichtigung des baulichen Holzschutzes mit kategorischem Verzicht auf frei bewittertes Fichten-BS-Holz; Kenntnis um den ungünstigen Einfluss von Klimawechseln und hohen Temperaturbelastungen auf Bauteile aus BS-Holz, vertiefende Hinweise hierzu in [3,4,16]; Berücksichtigung des Schwindens und Quellens auch hinsichtlich der bei BS-Holz künstlich geschaffenen Anisotropie der Schwind- und Quellmaße; Entwurf von Tragwerken, deren mögliche durch außerhalb von Normen liegende Einflüsse bedingte Schädigung begrenzt ist, näheres hierzu, den allgemeinen Hochbau betreffend, in [17-19]; Sicherstellung der Zugänglichkeit zu Bauteilen von Tragsystemen für Inspektionen sowie Berücksichtigung der Austauschbarkeit gefährdeter und starker Abnutzung unterliegender Bauteile; Einplanen von Monitoringverfahren [20-22]; schließlich Maßnahmen gegen Zeitdruck während der Planungs- und Ausführungsphase
- BS-Holz-Hersteller: Holz Trocknung bis zur Gleichgewichtsfeuchte, die im Bauwerk zu erwarten ist, s. [16]; ggf. Oberflächenschutz, um einen Feuchtigkeitsaustausch zwischen Holz und Umgebung zu verzögern, s. [3]
- Bauunternehmer: Sorgfältiger Schutz des Holzes während der Bauphase

4 Zusammenfassung

Etwa 70 % der hier analysierten unabhängigen Schäden sind Risse in Faserrichtung. Fäule, Schub- und Zugbrüche machen jeweils rund 6 % aus. Die übrigen 12 % betreffen die Gebrauchstauglichkeit. Schäden werden insbesondere im Zusammen-

hang mit Konstruktionen beobachtet, in denen Querkzugspannungen wirken. Klimawechsel, Ursache zyklischer Veränderungen der Holzfeuchte, sind von großer Bedeutung für Risse in Faserrichtung bei BS-Holz. Das Schwinden ganzer Querschnitte sowie Fehlerquellen bezüglich Belastung, Materialqualität, Planung, Bauphysik und Ausführung sind von mäßiger Bedeutung für Schäden. Eine untergeordnete Rolle spielen abträgliche Einflüsse aus Montage, Instandhaltung und externer Feuchtigkeit. Um Schäden zu vermeiden, muss insbesondere der Konstruktion hinsichtlich des Entwurfs, der Berechnung und Detaillierung mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Querkzugspannungen, die für ein lokales oder globales Gleichgewicht von Bauteilen erforderlich sind, sollten vermieden oder durch Verstärkungen aufgenommen werden. Die Schadensanalyse stützt insbesondere diese Feststellungen: Nur BS-Holz-Bauteile mit einem großen schubbeanspruchten Volumen wurden durch Schubbrüche auffällig; das Anheben der charakteristischen Werte der Schneelast im Nationalen Anhang des EC1 für höhere Lagen im Vergleich mit den Werten der Schneelastnorm von 1975 ist ein richtiger Schritt hinsichtlich einer von geografischen Merkmalen unabhängigen Standsicherheit.

Literatur

- [1] Schmitt-Thomas, K.G.: Integrierte Schadensanalyse – Technikgestaltung und das System des Versagens. 2. Aufl., Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [2] Blaß, H.J.; Frese, M.: Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz. Bd. 16, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010.
- [3] Möhler, K.; Steck, G.: Untersuchungen über die Rißbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung. Bauen mit Holz 82 (1980), S. 194-200.
- [4] Häglund, M.: Parameter influence on moisture induced eigen-stresses in timber. European Journal of Wood and Wood Products 68 (2010), S. 397-406.
- [5] Hansson, M.; Larsen, H.J.: Recent failures in glulam structures and their causes. Engineering Failure Analysis 12 (2005), S. 808-818.
- [6] Frese, M.: Wechselwirkung zwischen der Anisotropie der Schwind- und Quellmaße sowie Holzfeuchte-Änderungen in der Ebene von gekrümmtem Brettschichtholz. European Journal of Wood and Wood Products 69 (2011), S. 359-367.
- [7] American Institute of Timber Construction: Timber Construction Manual. 4th Ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

- [8] Larsen, H.J.; Riberholt, H.: Trækonstruktioner, Beregning. SBI-Anvisning 135, Denmark: Statens Byggeforskningsinstitut, 1983.
- [9] DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [10] Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz. Online-Publikation, 9.4.2015, http://www.brettschichtholz.de/publish/binarydata/pdfs/aktuelles/stghb_leitfaden-hallentragwerke-2014_print_140218.pdf.
- [11] DIN 1055-5:2005-07 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten.
- [12] DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.
- [13] DIN 1055-5:1975-06 Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Schneelast und Eislast.
- [14] Schroeter, H.: Erläuterungen und Beispiele zur Lastnorm DIN 1055 neu. Bautechnik 84 (2007), S. 559-571.
- [15] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. 1993.
- [16] Gamper, A.; Dietsch, P.; Merk, M.; Winter, S.: Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Bautechnik 90 (2013), S. 508-519.
- [17] Kersken-Bradley, M.: Unempfindliche Tragwerke – Entwurf und Konstruktion. Bauingenieur 67 (1992), S. 1-5.
- [18] Pötzl, M.: Robuste Tragwerke – Vorschläge zu Entwurf und Konstruktion. Bauingenieur 71 (1996), S. 481-488.
- [19] Harte, R.; Krätzig, W.B.; Petryna, Y.S.: Robustheit von Tragwerken – ein vergessenes Entwurfsziel? Bautechnik 84 (2007), S. 225-234.
- [20] Riedner, W.: Sicherheit und Überwachung von weitgespannten Hallensystemen. Bautechnik 84 (2007), S. 78-80.
- [21] Fellmoser, P.: Monitoring von Holzkonstruktionen. Bauingenieur 86 (2011), S. 541-543.
- [22] Pawlowski, R.; Henke, K.; Schregle, P.; Winter, S.: Überwachung von Bauwerksverformungen mittels digitaler Bildverarbeitung. Bauingenieur 88 (2013), S. 214-221.

KIT Scientific Working Papers
ISSN 2194-1629

www.kit.edu