

# Statische Beurteilung historischer Tragwerke

Band 2 | Holzkonstruktionen

Stefan M. Holzer

Bauingenieur-Praxis





Stefan M. Holzer

Statische Beurteilung  
historischer Tragwerke  
Band 2 | Holzkonstruktionen





# **Statische Beurteilung historischer Tragwerke**

**Band 2 | Holzkonstruktionen**

Stefan M. Holzer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer  
Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
Institut für Mathematik und Bauinformatik  
85577 Neubiberg

Alle Fotos und Grafiken stammen vom Autor selbst oder wurden von ihm angefertigt, sofern nicht anders angegeben.

Titelbild: Dachwerk der Wallfahrtskirche St. Leonhard, Siegersbrunn b. München  
Fotograf: Stefan M. Holzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2015 Wilhelm Ernst & Sohn,  
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany  
1. korrigierter Nachdruck 2016

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.  
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: eiche.eckert° | Werbeagentur GbR, Kappelrodeck  
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin  
Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza  
Druck und Bindung: Strauss GmbH, Mörlenbach

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Print ISBN:** 978-3-433-03058-5  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60382-6  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60369-7  
**eMobi ISBN:** 978-3-433-60383-3  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60370-3

## Vorwort

Die historischen Holztragwerke Mitteleuropas nehmen in mehr als einer Hinsicht eine einmalige Stellung ein. Einerseits sind sie hervorragende Zeugnisse für fast tausend Jahre Bau- und Konstruktionsgeschichte und dokumentierten eindrucksvoll das Können und die technischen Fortschritte vergangener Generationen. Andererseits ist es durch bloßes genaues Hinsehen und unter Einsatz einiger weniger einfacher Hilfsmittel möglich, die Bau-, Last-, Schadens- und Reparaturgeschichte allein anhand des Tragwerks selbst detailliert aufzuschlüsseln. Auch für die statische Beurteilung ergeben sich daraus einzigartige Möglichkeiten, die keine andere Gruppe historischer Konstruktionen so bietet: Die bisherige lange Standzeit der Tragwerke (meist über zwei Jahrhunderte) gewährleistet, dass das Tragwerk mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit alle relevanten Lastfälle schon einmal erlebt hat. Jedes signifikante Ereignis in der Geschichte des Tragwerks hat an diesem unauslöschliche Spuren hinterlassen, die man nur abzulesen und zu interpretieren braucht. An die Stelle probabilistischer Standsicherheitsabschätzungen, wie sie beim Entwurf neuer Tragwerke erforderlich sind, können daher oft deterministische Betrachtungen treten. Die mitteleuropäische Zimmerkunst hat sich außerdem von den Anfängen bis etwa 1830 eines zugleich im Vokabular beschränkten und andererseits ungemein flexiblen und leistungsfähigen Konstruktionsrepertoires bedient, das es möglich macht, einige wenige typische Tragwerksarten zu identifizieren und deren Tragverhalten an exemplarischen Fallstudien zu analysieren. Das vorliegende Buch führt vor, wie die typischen Konstruktionen des mitteleuropäischen handwerklichen Holzbaus bis zu den Anfängen des Ingenieurholzbaus zu lesen und zu interpretieren sind. Ziel ist es, einen Beitrag zum möglichst unverfälschten Erhalt dieser faszinierenden Konstruktionen zu leisten. Trotz der langen Arbeit am Manuskript und dem Kampf mit einem fast unerschöpflichen Reichtum an Material kann das Buch natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Es ist aber hoffentlich gelungen, die wichtigsten Aspekte klar herauszuarbeiten.

Die Leser haben auf den zweiten Band viel länger warten müssen, als geplant war. Ihnen und ganz besonders auch dem Verlag Ernst & Sohn, vor allem Frau Claudia Ozimek, sei für die Geduld und das Durchhaltevermögen gedankt. Die Zusammenarbeit mit dem Verlag war stets angenehm.

Das vorliegende Werk hat nicht entstehen können ohne die Zusammenarbeit mit mehreren (ehemaligen) Mitarbeitern, die sich am Institut des Verfassers in Promotions- und Forschungsarbeiten mit historischen Holzbauten auseinandergesetzt haben. Ihnen allen sei herzlich gedankt, namentlich Herrn Dr. Bernd Köck, der barocke Holztragwerke untersucht und dem Verfasser einen wesentlichen Anstoß zum Schreiben dieses Werkes gegeben hat, Frau Anja Säbel M. Sc., die gemeinsam mit dem Autor die erhaltenen Holztragwerke des 19. Jahrhunderts in Süddeutschland erforscht hat, und Herrn Dr. Clemens Voigts, der dem Verfasser bei Rundgängen durch historische Dachwerke vielfach die Augen für unauffällige, aber wichtige Details geöffnet hat. Auch aus dem Kollegenkreis der Denkmalpfleger, Bauforscher

und Tragwerksplaner hat der Verfasser vielfache Hinweise und Anregungen erhalten, für die er dankt.

Besonderer Dank gilt schließlich auch meiner Frau und meinen beiden Töchtern, die unter der intensiven Arbeit am vorliegenden Werk mehr als einmal zu leiden hatten und unendliche Geduld und Nachsicht haben aufbringen müssen. Ihnen ist auch dieser zweite Band gewidmet.

München, im Februar 2015

Stefan M. Holzer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>1 Historische Tragwerke aus Holz</b> .....	1
<b>2 Holz als Werkstoff historischer Tragwerke</b> .....	11
2.1 Vom Baum zum Holztragwerk .....	11
2.2 Materialeigenschaften der wichtigsten Konstruktionshölzer .....	27
<b>3 Untersuchung historischer Holztragwerke</b> .....	35
3.1 Grundsätzliches Vorgehen bei der Tragwerksbeurteilung historischer Holztragwerke .....	35
3.2 Aufmaß .....	46
3.3 Datierung der Bau- und Reparaturphasen .....	57
3.4 Handnahe Untersuchung und zerstörungsfreie Prüfung, Zustandskartierung .....	61
3.5 Berechnungsannahmen für die Berechnungsbeispiele .....	68
<b>4 Deckentragwerke und flachgeneigte Pfettendächer</b> .....	75
4.1 Konstruktion historischer Deckentragwerke .....	75
4.2 Konstruktion historischer flachgeneigter Pfettendachwerke .....	79
4.3 Rechnerische Modellierung der Anschlüsse des „italienischen“ Pfettendachbinders .....	96
4.3.1 Versatzanschlüsse .....	96
4.3.2 Hängeisen .....	99
4.4 Typische Konstruktionen und deren Tragverhalten .....	101
4.4.1 Balken .....	101
4.4.2 Verzahnte Balken .....	101
4.5 Analyse „italienischer“ Pfettendachbinder: Tragverhalten und typische Schäden .....	108
4.6 Zusammenfassung .....	113
<b>5 Sparrendächer</b> .....	115
5.1 Binderlose Sparrendächer .....	115
5.1.1 Das grundlegende System des Sparrendaches .....	115
5.1.2 Systeme und Details des frühen Sparrendachwerks .....	126
5.2 Sparrendachwerke mit stehenden Stühlen .....	133
5.2.1 Das System des stehenden Stuhls .....	133
5.2.2 Anschlussdetails der Dachwerke mit stehendem Stuhl .....	141
5.3 Tragverhalten von Blatt- und Zapfenverbindungen mit Holznagel .....	145
5.3.1 Holznagel .....	145

5.3.2	Mechanisches Verhalten mittelalterlicher zimmermannsmäßiger Holzverbindungen .....	150
5.4	Typische Konstruktionen und deren Tragverhalten .....	160
5.4.1	Tragverhalten binderloser Dachwerke .....	162
5.4.2	Tragverhalten von Dachwerken mit stehendem Stuhl .....	165
5.4.3	Dachkonstruktionen ohne durchgehende Zerrbalkenlage .....	175
5.4.4	Tragverhalten eines Hallenkirchendachwerks .....	180
5.4.5	Vorläufiges Fazit zur Schnittgrößenermittlung .....	183
<b>6</b>	<b>Dachwerke des Spätmittelalters und der frühen Neuzeit</b> .....	<b>185</b>
6.1	Dachwerke mit liegendem Stuhl .....	185
6.1.1	Das System des „liegenden Stuhls“ .....	185
6.1.2	Entwicklungsgeschichte und Varianten des liegenden Stuhls .....	193
6.2	Hängewerke und ihre Kombination mit dem liegenden Stuhl .....	201
6.2.1	Hängesäule, Überzug und Binder .....	202
6.2.2	Anschlusspunkte von Hängesäulen .....	207
6.3	Dachwerke ohne durchgehende Zerrbalkenlage .....	215
6.4	Tragverhalten typischer Konstruktionen .....	220
6.4.1	Liegender Stuhl .....	220
6.4.2	Liegender Stuhl mit Hängewerk .....	224
6.4.3	Mehrstöckige Anordnung von stehenden und liegenden Stühlen .....	226
6.4.4	Dachwerk der Wandpfeilerkirche .....	227
6.4.5	Dachwerk der Saalkirche mit Gewölbe .....	231
6.4.6	Fazit der Berechnungsbeispiele .....	233
6.5	Weitere Konstruktionen .....	234
6.5.1	Sparrendachwerke mit Graten und Kehlen: vom Walm zum Turmhelm	234
6.5.2	Importe ausländischer Dachformen und Dachkonstruktionen .....	242
<b>7</b>	<b>Ausklang: Holzbau im 19. Jahrhundert</b> .....	<b>247</b>
7.1	Weiterleben der Tradition im Holzbau des 19. Jahrhunderts .....	251
7.2	Vom Holzgewölbe zum Bohlendach .....	254
7.3	Typische Elemente von Pfettendachwerken des 19. Jahrhunderts .....	263
7.4	Schlusswort .....	268
<b>8</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>271</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>291</b>

# 1 Historische Tragwerke aus Holz

Über Jahrtausende hinweg war Holz das wichtigste Baumaterial überhaupt. Die für Bauzwecke nutzbare Stammlänge großer Bäume reicht bis etwas über 20 m. Aus den größten Stämmen dieser Art konnten Balkenquerschnitte bis zu einer Höhe von maximal ca. 50 bis 60 cm gewonnen werden. Ein solcher Stamm weist eine Masse von maximal etwa 3 t auf, war also auch mit relativ einfachen Hebezeugen und Fuhrwerken zu bewegen. Aufgrund des günstigen Verhältnisses von Zugfestigkeit und Eigengewicht eignete sich das Holz zur Konstruktion biegebelasteter Träger größerer Spannweite, während die maximal erzielbare Spannweite steinerner Balken infolge der vergleichsweise geringen Zugfestigkeit von Naturstein (ca. 10% der Druckfestigkeit), des hohen spezifischen Gewichtes und der allgemeinen Schwierigkeit, große fehlerlose Blöcke zu gewinnen, auf wenige Meter begrenzt war. Somit war Holz das ideale Material zur Herstellung biege- und normalkraftbelasteter Träger.

Holz fand Verwendung bei der Herstellung von Tragwerken wie Decken und Dächern, aber auch für aussteifende und raumabschließende Konstruktionen, z. B. beim Bau von Häusern in Block- oder Fachwerkbauweise. Holz wurde aber auch verwendet für die Konstruktion von Fundamenten (Pfähle, liegende Roste, Pfahlroste), für vergängliche Hilfskonstruktionen wie Lehr- und Arbeitsgerüste und für den Maschinenbau (Mühlen; Baumaschinen wie Hebezeuge und Rammen). Die Mehrzahl aller Brücken in Mitteleuropa bestand ebenfalls aus Holz (Bild 1.1). Mit dem Bauwesen konkurrierte überdies der Schiffbau um das beste Konstruktionsholz.

Jenseits des konstruktiven Einsatzes von Holz wurden riesige Mengen an Brennholz insbesondere für das Verhütten von Erz, die Salzgewinnung aus Salzsole und das



**Bild 1.1** Holzbrücke des 18. Jahrhunderts (Argenbrücke Hiltensweiler).

Brennen von Kalk oder Tonwaren sowie für häusliche Zwecke wie Heizen und Kochen verbraucht. Mit dem Beginn der industriellen Revolution verschärfte sich die Situation. Der Bauholzbedarf war gegenüber dem Brennholzbedarf von weit untergeordneter Bedeutung. Örtlich führte die immense Nachfrage nach dem Brennstoff Holz in Kombination mit einer nicht nachhaltigen Waldbewirtschaftung schon zu Beginn der frühen Neuzeit zu Holzangel. Im 18. Jahrhundert setzte sich daher in Mitteleuropa die geregelte Forstwirtschaft durch. Den Höhepunkt erreichte der Holzangel um 1800. Der Holzangel wirkte sich auch direkt auf den Einsatz von Holz im Bauwesen aus. Er war eine der wichtigen Triebfedern, die die Entwicklung innovativer Bauweisen initiierten: Die traditionellen, meist statisch unbestimmten, redundanten und daher aus Sicht der Zeitgenossen um 1800 „holzverschwendenden“ Holzkonstruktionen wurden nun allmählich durch „holzsparende“, also entsprechend den statischen Erfordernissen dimensionierte und tendenziell statisch bestimmte Tragwerke abgelöst. Auch die wachsende Verwendung von Stahl, der ab dem frühen 19. Jahrhundert unter Einsatz von Koks anstelle von Holzkohle verhüttet werden konnte und damit kostengünstiger wurde, gehört in diesen Zusammenhang. Jedoch behielt das Holz insbesondere beim Bau von Brücken und Dachwerken bis weit in das 19. Jahrhundert hinein eine herausragende Bedeutung. Erst die Erfindung eines „zugfesten Steinmaterials“ in Form des bewehrten Betons beendete bei vielen Ingenieurbauaufgaben um 1900 die prominente Rolle des Holzes.

Holztragwerke erhalten sich über Jahrtausende, wenn sie vor den Einwirkungen der Feuchtigkeit geschützt sind. Dies ist der ausschlaggebende Grund dafür, dass der immer noch gewaltige Bestand historischer Holzkonstruktionen in ganz Europa vor allem in Form von Dachwerken vorliegt. Im ariden Klima der Sinaihalbinsel hat sich der spätantike Dachstuhl der dortigen Katharinenklosterkirche bis heute fast schadfrei erhalten. In Mitteleuropa lassen sich Feuchtigkeitseinflüsse nie ganz ausschließen; dennoch reichen auch im deutschsprachigen Raum erhaltene historische Dachwerke bis ins 12. Jahrhundert zurück und insbesondere aus dem 14./15. Jahrhundert und aus dem 17./18. Jahrhundert – Zeiten großer Bautätigkeit – sind noch unzählige derartige Konstruktionen erhalten. Zahlenmäßig fallen dagegen die Konstruktionen aus dem 13., 16. und 19. Jahrhundert stark ab.

Der Tragwerksplaner, der sich heute mit der Beurteilung historischer Holzkonstruktionen konfrontiert sieht, hat es somit meist mit einem mehr oder weniger weit gespannten Dachtragwerk zu tun (Bild 1.2). Deswegen ist das vorliegende Werk besonders auf die historische Entwicklung, die verschiedenen Konstruktionsarten und das Tragverhalten sowie die Standsicherheit historischer Dachwerke fokussiert. Die Vorgehensweise, die hier am Beispiel der Dachtragwerke erläutert wird, kann jedoch in vielerlei Hinsicht auch auf andere Bauwerke übertragen werden. Tragwerksplanerisch weniger anspruchsvolle Bauten wie Fachwerkhäuser weisen dieselben zimmermannsmäßigen Holzverbindungen und Konstruktionselemente auf. Bei der Sanierung eines alten Fachwerkhäuses sind allerdings in erster Linie der Bauphysiker und der Architekt gefragt, so dass dieses Thema aus dem vorliegenden Buch völlig ausgeklammert worden ist. Wer sich speziell mit der Renovierung, Umnutzung und Wiederherstellung von Fachwerkhäusern beschäftigt, findet anderweitig eine reiche Spezialliteratur. Wesentlich seltener als Dachwerke und Holzhäuser haben sich reine Ingenieurbau-





**Bild 1.2** Historisches Dachwerk (ehem. Abteikirche Fürstenfeldbruck, frühes 18. Jh.).

werke aus Holz über die Jahrhunderte erhalten. Derjenige Tragwerksplaner, der das Glück hat, sich mit einer historischen Holzbrücke des 18. oder 19. Jahrhunderts auseinanderzusetzen (Bild 1.1), wird allerdings dort dieselben Konstruktionsideen wie im Dachwerksbau wiederfinden und auch mit denselben Beurteilungskriterien wie bei Dachtragwerken arbeiten können. Daher konnte auch der historische Brückenbau aus dem vorliegenden Werk ausgespart bleiben.

Historische Holztragwerke verdanken ihre Gestalt zumeist nur zu einem geringen Teil der eigentlichen Tragwerksplanung. Bei der Wahl eines bestimmten Konstruktionssystems waren historisch nicht nur die erwarteten Beanspruchungen der einzelnen Konstruktionsglieder, sondern vielmehr herstellungstechnische Randbedingungen ein wesentliches, wenn nicht das ausschlaggebende Entscheidungskriterium. Da Maschinen und Hebezeuge bis weit ins 19. Jahrhundert fast ausschließlich durch tierische oder menschliche Muskelkraft bewegt wurden, musste das Tragwerk derart konzipiert werden, dass es aus möglichst gut handhabbaren Stücken vor Ort zusammengesetzt werden konnte. Die Konstruktion selbst diente, wenn irgend möglich, auch als ihr eigenes Bau- und Hebezeug. Aus diesem Grund ist es zum Verständnis der Struktur historischer Holzkonstruktionen unbedingt notwendig, auch die zeitgenössischen Techniken des Aufrichtens wenigstens im Ansatz zu kennen. Der moderne Tragwerksplaner, der es gewohnt ist, bei hochbelasteten Tragwerksteilen große Querschnitte anzuordnen, bei gering belasteten Teilen hingegen Material zu sparen, wird durch das optische Erscheinungsbild historischer Holzkonstruktionen oft unwillkürlich zu einem unzulässigen Umkehrschluss verleitet, nämlich zu der Annahme, die Kräfte flössen im historischen Tragwerk vor allem dort, wo Material konzentriert ist. Dies ist keineswegs immer der Fall. Binder in Dachwerken mit Stuhlkonstruktionen nehmen oftmals nur geringfügig höhere Lasten auf als die scheinbar „schwächeren“ Leergespärre. Oftmals reichen ebene Berechnungsmodelle zur Standsicherheitsbeurteilung bei weitem aus, obwohl das Tragwerk auf den ersten Blick eine komplizierte räumliche Stabstruktur zu sein scheint. Bei scheinbar viel-

fach statisch unbestimmten Tragwerken lässt sich häufig eine sehr einfache dominante Lastabtragung identifizieren, die durch eine statisch bestimmte Modellbildung ganz schnell abgeschätzt werden kann. Im vorliegenden Buch werden solche Effekte anhand von typischen Beispielen untersucht und exemplarisch durchgerechnet. Dem Tragwerksplaner soll damit ausdrücklich eine Anleitung zur einfachen, aber dennoch systemgerechten statischen Modellbildung gegeben werden. Dem historischen Tragwerk ist weder mit einer in Eingabe und Berechnung aufwendigen, unübersichtlichen und komplizierten räumlichen Finite-Elemente-Modellierung noch mit einer auf unzulässigen Vereinfachungen beruhenden pauschalen Aburteilung als „einsturzgefährdet“ gedient, sondern nur mit einer Analyse, die so einfach wie möglich, aber auch so realitätsnah wie nötig ist.

Historische Holztragwerke sind häufig auch schon in historischer Zeit schadhaft geworden, zum Beispiel deswegen, weil die Dachdeckung nicht richtig dicht war, der Bauunterhalt zu wünschen übrig ließ oder aber die ursprüngliche Konstruktion schlecht konzipiert war. Der letztgenannte Fall ist gar nicht so selten, und er erfordert ein grundsätzlich anderes Handeln als die Ertüchtigung eines an sich sinnvoll konzipierten Tragwerks, das nur durch irgendeinen unglücklichen Umstand schadhaft geworden ist. Auf Schäden hat man sehr häufig mit Reparaturen in Form behelfsmäßigen Flickwerks reagiert und damit den Zustand des geschädigten Tragwerks mittelfristig nicht verbessert, sondern vielmehr weiter verschlechtert. Manchmal war der partielle Neubau des Tragwerks, unter Umständen unter Verwendung alten Materials, unumgänglich. Manchmal wurden aber auch Subsidiärkonstruktionen oder andere Verstärkungsmaßnahmen realisiert, die auf der Höhe des Fachwissens ihrer Zeit entwickelt wurden und bis heute wirksam sind. Historische Schäden und Reparaturen sind auch für den modernen Tragwerksplaner wichtige Hinweise auf die Schadensgeschichte und können zur Identifikation der Schadensursachen und zur Konzeption einer angemessenen Ertüchtigung wesentlich beitragen. Um in einem historischen Tragwerk überhaupt verschiedene Bau- und Reparaturphasen erkennen zu können, ist ein Grundwissen über die geschichtliche Entwicklung der Techniken der Holzbearbeitung, der zimmermannsmäßigen Holzverbindungen, der eisernen Verbindungsmittel und der Tragsysteme notwendig; dieses Grundwissen wird im vorliegenden Werk vermittelt. Damit wird der Tragwerksplaner in den Stand versetzt, wenigstens ansatzweise das Bauwerk „lesen“ zu können und auf Grundlage einer korrekten Analyse des Ist-Zustandes eine Reparatur oder Ertüchtigung zu planen.

Nichts ist bei einem historischen Holztragwerk schwieriger zu definieren als der Begriff des „Schadens“. Manche Schäden, zum Beispiel Verlust von Konstruktionsteilen durch Fäulnis oder Pilz- und Insektenbefall, sind auch für den Laien sofort erkennbar und erfordern natürlich eine sofortige Elimination der Schadensursachen und eine Reparatur. Andere ebenso leicht erkennbare Schäden können aus tragwerksplanerischer Sicht jedoch als unbedenklich klassifiziert werden. Zum Beispiel haben konzeptionelle Mängel des ursprünglichen Tragwerksentwurfs oftmals zur lokalen Überlastung einzelner Verbindungen oder Bauteile geführt. Beispiele sind ausgerissene Blattverbindungen an zugbelasteten Balken. Da das historische Tragsystem fast immer redundant ist, kann man jedoch oft auch mit diesem Schaden



**Bild 1.3** „Sanierung“ eines historischen Holztragwerks oder moderne Kopie mit wenigen alten Versatzstücken?

leben und das Tragwerk hat in vielen Fällen seit Jahrhunderten mit dem Schaden existiert. Eine kraftschlüssige Reparatur führt in solchen Fällen zu einer Änderung des Lastabtrags, kann Überlastungen an anderer Stelle induzieren und hilft dem historischen Tragwerk daher unter Umständen wenig. Allerdings ist Bauherren, aber auch vielen Handwerkern und Architekten nichts schwerer zu vermitteln als die Idee, dass ein derartiger augenfälliger „Schaden“ nicht behoben werden muss. Auf keinen Fall sollte die Sanierung eines historischen Holztragwerks dazu führen, dass nach der Maßnahme ein „perfektes“ Tragwerk im Sinne eines modernen Nachbaus in der alten Form vorliegt, eventuell angereichert durch einige quasi museal präsentierte originale Versatzstücke (Bild 1.3).

Ganz besonders auffällig sind oft Risse und Klaffungen im historischen Holztragwerk. Da die eigentlichen Schwachpunkte des historischen Tragwerks immer die Anschlüsse sind und nicht die Balken des Stabtragwerks, sind Schwindrisse im Vollholzbalken meist ohne statische Relevanz, wenn sie nicht gerade mitten durch den Anschluss verlaufen. Laien sehen die Schwindrisse jedoch sofort und werden durch sie häufig beunruhigt. Leider wird immer wieder Geld für die „Sanierung“ von statisch völlig unbedenklichen Schwindrissen verschwendet und damit das optische Erscheinungsbild historischer Tragwerke beeinträchtigt.

Klaffungen an Verbindungen historischer Holztragwerke können unterschiedlichste Gründe haben. Sie können auf einzelne Überlastereignisse oder auf das Schwinden des relativ feucht abgebundenen Holzes zurückgeführt werden. Sehr oft haben Klaffungen ihren Grund aber auch einfach in Arbeitsungenauigkeiten oder montage-technischen Randbedingungen. Nur mit einer Kenntnis der historischen Arbeitsabläufe lassen sich Klaffungen an Verbindungen zielsicher beurteilen. Der Autor des vorliegenden Buches hat selbst vor vielen Jahren aus Unkenntnis die montagebedingten Klaffungen an den Zapfenanschlüssen eines Kehl balkendachs als überlastungs-

bedingte Schäden fehlinterpretiert und möchte andere Tragwerksplaner vor vergleichbaren Irrtümern bewahren.

Ein besonders schwieriges Kapitel ist die Anwendung moderner Normen auf historische Holztragwerke. Im Sinne moderner Normen sind fast alle historischen Tragwerke „schadhaft“. Zum einen weisen viele Verbindungen Spuren von Überlastungen auf, zum Beispiel dauerhafte Eindrückungen im Holz quer zur Faser. Auch die Vorschriften für die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks sind oftmals nicht erfüllt, weil das historische Tragwerk durch Schwinden und Kriechen bei gleichzeitig hohen lokalen Ausnutzungsgraden erhebliche dauerhafte Verformungen aufweist. In solchen Fällen ist es im Sinne des Erhaltes des historischen Bestands zwingend erforderlich, sich zu überlegen, ob die „rechnerisch versagte“ Verbindung tatsächlich standsicherheitsbedrohend ist oder vielmehr immer noch eine Resttragfähigkeit aufweist, die das Herabstürzen von Bauteilen verhindert und das System als Ganzes in seinem Bestand sichert. Eine rechnerische Simulation des Tragwerks, in dem schadhafte Verbindungen noch zu einem entsprechenden Anteil als wirksam angesetzt werden, hilft hier oft weiter. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit kann beim historischen Bauwerk stets entfallen, da es durch seine jahrhundertelange Nutzung seine Gebrauchstauglichkeit unter Beweis gestellt hat und an ein historisches Tragwerk geringere Anforderungen hinsichtlich des Nutzungskomforts gestellt werden müssen als an einen Neubau. Glücklicherweise sind die meisten historischen handwerklichen Holzverbindungen heute nicht mehr üblich und werden daher von den Normen nicht behandelt. Dies eröffnet dem Tragwerksplaner die Möglichkeit, auf Grundlage eigener verantwortungsbewusster Einschätzung die Funktionstüchtigkeit historischer Anschlüsse zu bewerten.

Jede rechnerische Analyse eines historischen Holztragwerks kann und muss am Objekt selbst auf ihre Plausibilität geprüft werden. Wenn die Berechnung lokal erhebliche Überlastungen ergibt, müssen an der betreffenden Stelle auch entsprechende Verformungen sichtbar sein. Sind sie es nicht, dann ist der unterstellte Lastabtrag unzutreffend und das Berechnungsmodell muss entsprechend angepasst werden. Auf keinen Fall darf das Ergebnis der Berechnung präjudiziert werden, indem z. B. einzelne Konstruktionselemente bei der Analyse einfach weggelassen werden mit dem Argument, sie trügen zur Standsicherheit ohnehin nichts bei. Leider werden diese Selbstverständlichkeiten keineswegs bei jeder Sanierungsmaßnahme berücksichtigt. Dem Autor des vorliegenden Buches ist mehr als ein Beispiel bekannt, bei dem offenkundig unbeschädigte historische Verbindungen durch Hinzufügen neuer Verbindungsmittel „ertüchtigt“ worden sind, manchmal auch noch in völlig überdimensionierter Weise (Bild 1.4). Zu den schlimmsten Fehlern, die man begehen kann, gehört in diesem Zusammenhang die Verfolgung eines am System orientierten Sanierungskonzeptes: Liegt an einem einzelnen Gespärre eines Dachwerks an einem Anschluss ein Schaden vor, werden auch an allen anderen Gespärren des Daches die entsprechenden Anschlüsse ertüchtigt, obwohl sie unter Umständen völlig ungeschädigt sind. Richtig ist es, jedes Gespärre als Individuum zu kartieren, zu beurteilen und zu ertüchtigen.

Das vorliegende Buch ist keine umfassende Anleitung zur Bestandsuntersuchung eines historischen Holztragwerks. Insbesondere wird hier nicht der Versuch unternommen,



**Bild 1.4** Maßstabsprengende „Reparatur“ eines völlig unbeschädigten historischen Anschlusses.

die verschiedenen biologischen Schäden an Holz zu diskutieren. Dazu gibt es anderweitig genügend Spezialliteratur (als Einstieg z. B. [Mönck/Erlor 2004]). Ohnehin wird die Bestimmung der genauen Spezies des Schädlings oftmals nur dem Experten gelingen (z. B. Identifikation spezieller Pilzarten einschließlich des Echten Hauschwamms, mit dem ja oft genug argumentiert wird). Die Untersuchung eines historischen Holztragwerks erfordert in der Regel eine interdisziplinäre Kooperation, die Fachleute aus so unterschiedlichen Bereichen wie der historischen Archivforschung, der archäologischen Bauforschung, der Architekturgeschichte, der Denkmalpflege, der Restaurierung und eben der Tragwerksplanung zusammenbringt. Der Tragwerksplaner sollte zu allen anderen Projektbeteiligten Kontakt halten, weil auch die Befunde des Archivforschers, des Kirchenmalers oder des Bauarchäologen wichtige Hinweise für die Aufschlüsselung der Bau-, Schadens- und Reparaturgeschichte enthalten können, die dem Tragwerksplaner bei der Beurteilung der Standsicherheit weiterhelfen können. Im Idealfall bündelt der Tragwerksplaner mindestens zum Teil diese Aufgaben in eigener Person und führt die unterschiedlichen Informationen zusammen.

Bei der Untersuchung historischer Dachtragwerke begibt man sich häufig in eine biologisch und chemisch verseuchte Umgebung. Der Staub auf den Balken kann erhebliche Rückstände chemischer Schädlingsbekämpfungsmittel enthalten, die Balken sind unter Umständen mit längst verbotenen Mitteln behandelt oder mit gesundheitsschädlicher Brandschutzfarbe bestrichen. Durch die Aktivitäten der Bauwerksuntersuchung und Sanierung wird der Staub aufgewirbelt und eingeatmet oder die schädlichen Stoffe werden durch Hautkontakt aufgenommen. Zwar nimmt man in der Praxis diese Einflüsse oft auf die leichte Schulter, doch sind oftmals Schutzmaßnahmen dringend anzuraten. Auch Kot von ungebetenen Dachbewohnern wie Tauben und Fledermäusen, der manchmal kniehoch im Dachraum liegt, ist erheblich gesundheitsgefährdend. Es ist daher keineswegs eine unsinnige Geldverschwendung, ein durch Kot, Kadaver, chemische Mittel oder einfachen Schmutz belastetes Dach-

werk zu Beginn der Voruntersuchung zunächst gründlich reinigen zu lassen. Das Arbeiten im Dach, das ohnehin vielfach beschwerlich ist, wird dadurch ein Stück weit bequemer, was der Qualität der Ergebnisse durchaus förderlich ist. Auch das Auffinden von Befunden wird durch eine vorherige Reinigung des Objekts oftmals erheblich erleichtert. Zum Reinigen des Dachwerks gehört auch das Entfernen bzw. Aussortieren von Gerümpel und die Herstellung einer Zugänglichkeit, ggf. verbunden mit der teilweisen Entfernung von Boden- oder Dachflächenverschalungen.

Das Bauen mit Holz, das uns bis heute eine derart große Zahl an historischen Tragwerken hinterlassen hat, steht zugleich auch am Anfang des modernen Ingenieurwesens. Früher als in allen anderen Bereichen des Bauwesens ist im Holzbau neben die traditionelle Wissensvermittlung durch die mündliche Anleitung und das Vor- und Nachmachen auch die Wissensvermittlung durch Fachbücher getreten. Schon ab der Mitte des 17. Jahrhunderts erschienen sowohl in Deutschland als auch in Frankreich die ersten „Zimmermannsbücher“. Es handelt sich dabei zumeist um reich illustrierte Werke mit relativ wenig Text, in denen die Abbildung exemplarischer Konstruktionen und die Zuordnung der entsprechenden Fachterminologie im Vordergrund stehen. Angaben darüber, wie sich der Planer das Tragverhalten der Struktur vorstellt, fehlen zumeist. Auch die Techniken der praktischen Realisierung des Bauwerks vor Ort werden so gut wie nie erläutert, weil dieses „Know-how“ auf der Baustelle vom Meister an den Lehrling vermittelt wurde. Im Verlauf des 18. Jahrhunderts treten jedoch zunehmend auch modern anmutende tragwerksplanerische Überlegungen in der Holzbau-Fachliteratur auf. Ab der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts schließlich wird immer häufiger der Versuch unternommen, Holzkonstruktionen auch rechnerisch zu dimensionieren. Die Grundlage dafür hatten Experimente zur Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Holz ab dem 18. Jahrhundert und die Entwicklung der Biegetheorie des Balkens durch Eytelwein (1808) und Navier (1826) gelegt.

Die historische deutschsprachige Literatur zum Holzbau verwendet ein präzises und wohldefiniertes Vokabular, das zwar oft vom modernen Deutsch im Sinne einer „dialektalen“ oberdeutschen Prägung abweicht, aber nichtsdestoweniger im ganzen Sprachraum recht einheitlich eingesetzt worden ist. Während der Zeit des Entstehens des Zimmermannstraktats war „Oberdeutschland“ in den Augen der Zeitgenossen in dieser Technologie führend, was nicht zuletzt der blühenden Baukonjunktur der Barockzeit mit ihren vielfältigen technologischen Ansprüchen verdankt wurde. Die weit überwiegende Mehrheit der Holzbau-traktate ist dementsprechend in Süddeutschland oder von süddeutschen und österreichischen Autoren verfasst worden und auf diese Weise wurde die kodifizierte Fachsprache etabliert; niederdeutsche Begriffe fehlen als Folge in der Literatur zum Zimmerhandwerk fast ganz. In Frankreich lässt sich übrigens genau die umgekehrte Richtung beobachten: Die vorwiegend in Nord- und Westfrankreich im 17. Jahrhundert aufkommende Fachliteratur führte im Süden zur Verdrängung etablierter Fachterminologie.

Im vorliegenden Buch wird zur Benennung der einzelnen Bauteile und Anschlüsse soweit möglich auf das in sich stimmige und logische historische Vokabular zurückgegriffen, zumal dieses Handwerkern oftmals bis heute geläufig ist und auch von

der älteren und neueren Fachliteratur meist verwendet wird. Zum Verständnis historischer Archivalien ist das historische Vokabular ohnehin unabdingbar notwendig. Daher erachtet der Autor den Versuch, dem als historische Erscheinung in sich abgeschlossenen handwerklichen Holzbau eine moderne, artifizielle neue Terminologie aufzuoktroieren (vgl. [Eißing et al. 2012]), für wenig hilfreich. Die „Hängesäule“ bleibt im vorliegenden Buch die Hängesäule (vertikal und zugbeansprucht, wie das Wort suggeriert), auch wenn [Eißing et al. 2012] sie mit einem ungleich blasserem Ausdruck als „Zugholz“ ansprechen wollen – nicht zu verwechseln mit dem „Zugbalken“, der das Wort „Zerrbalken“ oder „Bundtram“ ersetzen soll! Das in der Art eines Bildwörterbuchs konzipierte Buch [Eißing et al. 2012] ist übrigens trotz dieser Einwände von Interesse und Wert, da es einen umfassenden Katalog der Erscheinungsformen des mitteleuropäischen historischen Holzbaus bietet und z. B. in der Fachterminologie der handwerklichen Holzverbindungen oder des Blockbaus uneingeschränkt nutzbar ist. Umfassende Kataloge historischer Holzverbindungen findet man darüber hinaus auch in [Gerner 1992], [Gerner 1999], [Mader 1999].

Der vorliegende Band 2 ist so konzipiert, dass die für den Tragwerksplaner wichtigsten historischen Holzkonstruktionen in der Reihenfolge aufsteigender Komplexität behandelt werden. Die einzelnen Tragwerksformen werden dabei nicht immer in der Reihenfolge ihres Auftretens in Mitteleuropa untersucht, da z. B. das relativ einfache flachgeneigte Pfettendach mediterraner Prägung erst im frühen 19. Jahrhundert nach Deutschland exportiert worden ist. Geschichte läuft selten nur einsinnig und linear ab. Die geschichtliche Entwicklung der Tragwerkstypen, die jedes einzelne Kapitel einleitet, informiert insbesondere über die Motivationen und praktischen Schwierigkeiten, die zur Weiterentwicklung der jeweiligen Tragwerksformen geführt haben. Auch wenn manch einem Tragwerksplaner Hintergrundwissen über historische Herstellungsprozesse auf den ersten Blick weniger wichtig erscheinen mag, so werden doch auch diese Themen behandelt, weil sich aus ihnen oftmals wichtige Hinweise für den Ingenieur ableiten lassen. Die Hinweise, wie die Spuren der Herstellungstechnik an einer historischen Struktur zu „lesen“ sind, werden speziell im Hinblick auf die Erfordernisse der statischen Beurteilung gegeben.

Das Buch ist nicht nach einer zunächst naheliegenden Struktur Material – Holzverbindungen – Strukturen organisiert, weil der Blick auf die Gesamtstruktur von Anfang an im Fokus stehen soll und z. B. Holzverbindungen immer in direktem Zusammenhang mit ihrem Auftreten an bestimmten Stellen des Tragwerks behandelt werden. So können die Auswirkungen von Änderungen an der statischen Modellbildung oder von typischen Schäden sofort und direkt gezeigt werden. Die Beschreibung der Tragwerksform, ihre Geschichte und die Beschreibung der Herstellungstechnik, der Blick auf die Details und die rechnerische Untersuchung und Beurteilung exemplarischer Gesamtstrukturen treten auf diese Weise so eng zusammen, wie es nur irgend möglich ist. Außerdem führt diese Vorgehensweise automatisch zu einer Konzentration auf das wirklich Wichtige, ohne zum Versuch zu verleiten, dürre „Kataloge“ von Konstruktionsformen zu präsentieren, deren Ausarbeitung insbesondere beim Thema „Holzverbindungen“ ansonsten gefährlich nahe liegt. Insgesamt soll eine vereinfachende „Typisierung“ der Tragsysteme vermieden werden. Als Nachteil der gewählten Vorgehensweise ist zu vermerken, dass das

Nachschlagen der Angaben zu einem speziellen Verbindungstyp dadurch mühsamer wird. Das Register wird dabei aber zur schnellen Orientierung verhelfen.

Band 2 ist auf die in Mitteleuropa auftretenden Tragwerksarten konzentriert; das historische Dachwerk des deutschen Sprachraums hat aber insbesondere auf den osteuropäischen Raum, bis nach Polen und Ungarn, ausgestrahlt und man wird dort dieselben Tragwerke wie in Deutschland vorfinden. Richtung Westen und Süden grenzen an den deutschen Sprachraum jedoch Gebiete, die deutlich andere Holzbau-traditionen entwickelt haben, vor allem ab dem Spätmittelalter. Die typischen niederländischen und französischen Dachkonstruktionen (insbesondere das steilgeneigte Pfettendach) treten in Deutschland nur vereinzelt als Importe auf und können hier nur gestreift werden. Die italienischen Dachwerke wurden hingegen im 19. Jahrhundert auch in Deutschland vielfach nachgeahmt und werden daher ausführlicher behandelt.



## 2 Holz als Werkstoff historischer Tragwerke

### 2.1 Vom Baum zum Holztragwerk

Die wichtigsten Holzarten, die in Mitteleuropa im historischen Holzbau eingesetzt worden sind, sind die Nadelhölzer Fichte und Tanne sowie von den Laubhölzern die Eiche. Andere Holzarten wie Kiefer (vor allem in Norddeutschland) oder Lärche sind seltener anzutreffen. Im Mittelalter wurde keine nachhaltige Waldwirtschaft betrieben, es waren jedoch erhebliche Eichen- und Tannenbestände vorhanden, die bei der Gewinnung von Bauholz bevorzugt wurden. Gegen Ende des Mittelalters wurden diese bevorzugten Hölzer allmählich rarer und so ist in historischen Holzkonstruktionen ab etwa 1500 vorwiegend Fichtenholz anzutreffen, während schwieriger zu beschaffende Holzarten wie Eiche oder Lärche für Spezialzwecke, z. B. für hochbelastete Konstruktionselemente oder für Holz im Kontakt mit Wasser oder der Witterung reserviert wurden (vgl. z. B. [Eißing 2009, S. 35]). In Süd- und Westeuropa ist neben den genannten Holzarten auch noch das Holz der Edelkastanie als historisches Bauholz weit verbreitet. In Deutschland kommt die Edelkastanie nur an wenigen Orten vor und hat daher keine Bedeutung als historisches Bauholz.

Verbautes Eichenholz ist im Tragwerk leicht an seiner dunklen Farbe, den sehr engen Jahrringen und einer gewissen „Knorrigkeit“ bzw. Astansätzen zu erkennen (Bild 2.1 links). Nadelholz hat wesentlich weitere Jahrringe als Laubholz und weist als verbautes Holz im Dach eine helle, gräuliche oder gelbliche Farbe auf. Eichenholz hat eine hohe Dichte und einen hohen Gerbsäuregehalt; es ist besonders tragfähig und auch resistent gegen Schädlingsbefall und war deswegen stets ein bevorzugtes Baumaterial. Nadelholz (Bild 2.1 rechts) kann zu sehr gleichmäßigen, geraden, scharfkantigen Balken verarbeitet und oft in großen nahezu astfreien Längen gewonnen werden. Tannen und Fichten liefern als Bauholz nutzbare Stammlängen von bis über 20 m. Wegen des langsameren Wachstums und der daher schmalen Jahrringe sowie der höheren Dichte, Steifigkeit und Festigkeit wurde insbesondere bei hochbeanspruchten Holzbauteilen Nadelholz aus Hochlagen gegenüber Holz aus dem Flachland tendenziell bevorzugt. So stammt das Holz historischer Tragwerke im Alpenvorland meist aus den Alpen. Die Unterscheidung zwischen Fichten- und Tannenholz, die im Prinzip anhand der Harzgallen im Fichtenholz möglich ist, fällt im Dachwerk oftmals nicht leicht, sie ist für die statische Beurteilung aber auch ohne Relevanz. Es reicht aus, wenn der Tragwerksplaner Hartholz (Holz langsam wachsender Laubbäume) mit engen Jahrringen von Weichholz (Nadelholz) mit weiten Jahrringen unterscheiden kann, da die physikalischen Eigenschaften der üblichen Bauhölzer vorwiegend von der Zugehörigkeit zur diesen Gruppen abhängen, innerhalb der Gruppen jedoch wenig variieren.

Die als Bauholz bestimmten Bäume wurden in historischer Zeit im Wald meist im Herbst oder Winter geschlagen, wenngleich neuere dendrochronologische Untersuchungen gezeigt haben, dass in Zeiten florierender Baukonjunktur durchaus auch in den Sommermonaten erhebliche Holzmengen eingeschlagen wurden [Eißing



**Bild 2.1** Verbautes Eichenholz (links; Klosterkirche Corvey, 17. Jh.) und Nadelholz (rechts, Salvatorkirche München, Ende 15. Jh.) im Vergleich. Man beachte die Abbundmarken und den Schwindriss.

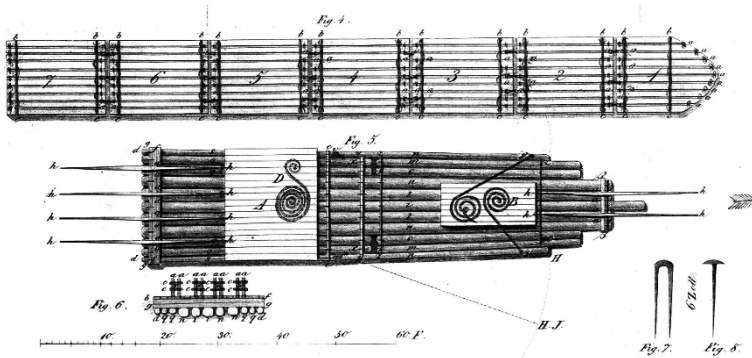
2009, S. 31–33]. Jahrhundertlang hatte man sich beim Einschlag des Holzes von der Winterfällung und sogar von der Orientierung an den Mondphasen Vorteile versprochen (siehe z. B. [Jousse 1702, S. 8–9]); genaue Untersuchungen von Duhamel du Monceau im 18. Jahrhundert (vgl. [Duhamel du Monceau 1764, S. 315–403]) erwiesen dann allerdings, dass diese Vorteile nicht existierten. Die Winterfällung blieb dennoch beliebt, bot sie doch den ganz unbestreitbaren Vorzug, dass im Winter billiges Arbeitspersonal zur Verfügung stand, das im Sommer mit anderen landwirtschaftlichen Arbeiten beschäftigt war, und dass der Boden im Winter gefroren oder schneebedeckt war und somit das Rücken der gefällten Stämme erleichterte ([Hassenfratz 1804, S. 108] und [Wolfram 1833, S. 104]). Außerdem konnte der Transport auf dem Wasserweg zum Bestimmungsort dann während des Frühjahrshochwassers erfolgen, so dass das Bauholz pünktlich zu Beginn der günstigsten Bauzeit auf der Baustelle zur Verfügung stand. Die Transportkosten des Baumaterials dominierten bis ins 19. Jahrhundert die Baukosten gegenüber den eigentlichen Verarbeitungskosten deutlich. Der Wassertransport war in der Regel wesentlich einfacher und kostengünstiger als der Landtransport, der unter den schlechten Landverkehrswegen litt.

Brennholz wurde typischerweise in Form einzelner Stämme oder Stammstücke „getriftet“, was erhebliche Anforderungen an die Infrastruktur stellte (Triftweiher zur Erzeugung eines Schwall, Triftkanäle usw.) und überdies mit Verlusten und Schäden verbunden war. Bauholz hingegen wurde auf dem Wasser in gebundenen Flößen transportiert (Bilder 2.2 und 2.3; vgl. [Duhamel du Monceau 1767, S. 30–48], ganz ausführlich aber insbesondere [Hassenfratz 1804, S. 176–196] und [Jägerschmidt 1827–28]). Diese Flöße bestanden je nach Größe des verfügbaren Flusses und der Transportstrecke aus einigen Dutzend bis zu mehreren hundert oder gar tausend Stämmen. Es wurden einerseits Rundhölzer geflößt, jedoch teilweise auch Stämme, die bereits im Wald wenigstens grob in Balkenform gebracht worden waren (vgl. die angegebenen französischen Quellen). Auch Fertigprodukte wie Bohlen oder Dielen wurden geflößt (Bild 2.2; vgl. auch [Lutz 2005, S. 125–131]).



**Bild 2.2** Flößerei von Kanthölzern und Bohlen [Cesariano 1521, fol. 45r].

Zur Konstruktion der Flöße (Bild 2.3) wurden mehrere Stämme nebeneinander gelegt und durch quergelegte Stangen und Seile verbunden. Der Begriff „Seil“ ist hierbei nicht ganz korrekt, denn zur Floßbindung wurden in der Regel „Wieden“ eingesetzt. Eine Wiede ist ein dünnes Stämmchen oder ein Ast, der ausgekocht wird, wobei das Stützmaterial Lignin aus dem Holz herausgelöst wird. Der Stamm wird sodann verdrillt und verliert durch diese mechanische Beanspruchung seine Biege- und Schubsteifigkeit nahezu völlig, nicht jedoch seine Zugfestigkeit. Er kann daher als flexibler Strick eingesetzt werden und sieht auch optisch wie ein Strick aus. Da Äste als „Abfallmaterial“ bei der Holzfällung ohnehin anfielen und Wieden sehr widerstandsfähig sind, waren Wieden das standardmäßige Bindematerial der Flößerei. Um die Wieden an den Stämmen zu befestigen, wurden die Stämme in der Nähe der beiden Enden durchbohrt und die Wieden wurden durch die Bohrungen



**Bild 2.3** Konstruktion von Kantholz- und Rundholzflößen [Jägerschmidt 1827–28, Tafel 28, Detail].

hindurchgefädelt oder in ihnen verkeilt. In anderen Fällen wurden Holznägel in die Stämme geschlagen, um daran die Wieden oder die Querhölzer der Flöße zu befestigen.

Der Holztransport auf dem Wasserweg hat oftmals deutlich sichtbare Spuren am verbauten Holz hinterlassen. Bei der Bearbeitung der Stämme zu Balken blieben die Floßnägel bzw. Floßkeile und Wieden im Holz oder wurden nur oberflächlich abgeschlagen (Bild 2.4; diese Keile stehen heute oft etwas über die Balkenoberfläche vor, weil das Holz sich in radialer Richtung durch Schwinden verkürzt hat, während der Keil in Längsrichtung kaum geschwunden ist). Somit ist der Floßtransport auch an verbautem Bauholz noch anhand sonst unerklärlicher Bohrungen oder Holznägel bzw. Holzkeile, die nicht im Bereich eines Anschlusses angeordnet sind, nachzuweisen. Manchmal ist neben dem Floßnagel auch noch ein Rest der im Bohrloch verkeilt Wiede in der Bohrung vorhanden (Bild 2.5). Floßkeile dürfen nicht irrtümlich als Spuren abgegangener Konstruktionselemente oder Anschlüsse interpretiert werden! Meist geben sich die Floßnägel durch ihre von den sonstigen Holznägeln abweichende Form und durch gehäuftes Auftreten in der Nähe der Balkenenden schnell zu erkennen (Bild 2.4). Floßkeile bestehen immer aus Hartholz. Das gehäufte Vorkommen der Floßkeile an den Balkenkanten in Bild 2.4 ist möglicherweise ein Indiz für bereits im Wald grob in Balkenform gebrachte Stämme. In den Bohrungen findet sich manchmal als zusätzliches Zeugnis der Flößung Sand oder getrockneter Flussschlamm. Der Floßtransport von Bauholz verlor in vielen Bereichen Mitteleuropas erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts an Bedeutung, also nicht schon mit dem Aufkommen der Eisenbahn. Zum Beispiel war in München bis in diese Zeit fast alles Bauholz Floßholz. An Orten, an denen kein Flößereinfluss vorhanden war oder große Waldungen in der Nähe lagen, wurde das Holz natürlich auf dem Landweg transportiert.

In der Regel wurde das Holz sofort in dem auf den Einschlag und die Flößung folgenden Sommer verbaut; bei Großprojekten hortete man allerdings auch gelegentlich das Holz aus mehreren Einschlagperioden oder beschaffte gelagertes Holz aus dem Holzhandel. Das Floßholz lag durchaus auch des Öfteren schon längere Zeit im Wasser, bevor es verkauft und verbaut wurde (vgl. die detaillierten Untersuchungen hierzu in der in jeder Hinsicht exemplarischen Arbeit [EiBing 2009, S. 51–64]). Die wichtigsten Bearbeitungstechniken setzten mehr oder weniger voraus, dass das Bauholz in „saftfrischem“ Zustand verarbeitet wurde, also nicht schon vorher aus-



**Bild 2.4** Floßkeile im Dachwerk der ev. St.-Ulrich-Kirche Augsburg (1710).



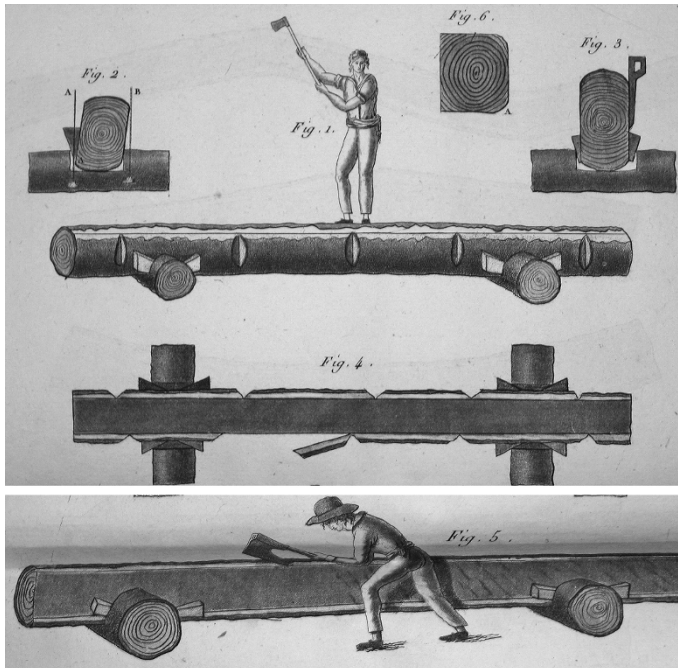
**Bild 2.5** Floßkeile mit Resten der im Bohrloch verkeilten Wieden (Frauenkirche Günzburg und Hofgut Öttershausen, 18. Jh.).

getrocknet war. Trotz der seit dem späten 18. Jahrhundert in den Fachbüchern häufiger werdenden Forderung nach vorheriger Trocknung des Bauholzes (z. B. in [Voch 1780, S. 54–56]), verbaute man daher auch noch im 19. Jahrhundert meist frisches Holz, wie man anhand der engen Übereinstimmung dendrochronologisch ermittelter Fälljahre und archivalisch überlieferter Bauzeiten leicht nachweisen kann.

Zunächst mussten die Stämme zu Balken verarbeitet werden. Dies geschah in Mitteleuropa bis ins 19. Jahrhundert fast immer durch Bebeilen (Bild 2.6; genaueste historische Beschreibungen des Arbeitsvorgangs bei [Jousse 1702, S. 11–12], [Duhamel du Monceau 1764, Bd. II, S. 630–633], [Koller 1800, Bd. 1, S. 320–321], [Hassenfratz 1804, S. 119–130], [Sax 1814, Bd. III, S. 6–7] und [Cavalieri San-Bertolo 1831, Bd. I, S. 96]). Ideal für das Bebeilen ist feuchtegesättigtes Floßholz. Der entrindete Stamm wird horizontal aufgebockt und fixiert. An Fuß- und Kopfende wird der gewünschte Balkenquerschnitt aufgezeichnet. Auf der Mantelfläche des Stammes werden sodann mit der Zimmermannsschnur vier Linien markiert, die die Längskanten des herzustellenden Balkens angeben. Die Schnur wird dazu vorher mit Rötel eingefärbt. Auch alle anderen Bearbeitungslinien wurden bis zum 19. Jahrhundert durch die Zimmerer mit Rötel hergestellt.

Sind die Kanten des Balkens markiert, so stellt sich der Zimmerer mit dem Beschlagbeil oben auf den aufgebockten Stamm und schlägt in die beiden Seiten des Stammes senkrecht zur Stammachse in regelmäßigen Abständen Kerben (Bild 2.6). Die stehengebliebenen Schwarten zwischen diesen Kerben werden sodann mit dem Beil abgeschlagen, die Oberflächen danach ggf. mit dem Breitbeil oder einem Zug-eisen geglättet. Damit sind die ersten zwei vertikalen Seitenflächen des Balkens fertig. Zur Herstellung der fehlenden beiden Flächen wird der aufgebockte Balken um seine Achse um 90° gedreht und der Vorgang wiederholt.

Das Bebeilen hat oft zu erstaunlich glatten Oberflächen geführt. An verbauten Balken sind jedoch nicht selten als Spuren der Bearbeitungstechnik zu tief geratene Kerben der Querschläge zu sehen (Bild 2.7). Bei genauem Hinsehen und vor allem bei Streiflicht zeigt sich bei bebeiltem Holz zudem, dass die Balken eine leicht wellige Oberfläche aufweisen (Bild 2.7). Die Welligkeit der Oberfläche hängt vom verwendeten Werkzeug ab, ist aber auch darauf zurückzuführen, dass sich beim Abspalten der Schwarten zwischen den Querschlägen die Schwarten längs des nie

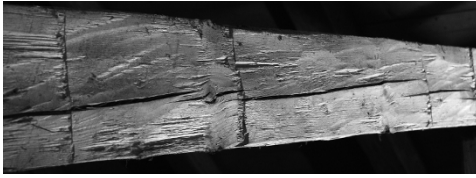


**Bild 2.6** Bebeilen eines Stammes zu einem Balken [Hassenfratz 1804].

Abweichend von der Darstellung fand das Entrinden in der Regel schon im Wald statt.

perfekt geradlinigen Faserverlaufs vom Balken abtrennen. Der Erhalt des Faserverlaufs wurde in historischer Zeit als ein Vorzug des Bebeilens gegenüber dem Sägen von Balken betrachtet, man hielt bebeilte Balken für tragfähiger als vierseitig gesägte. In der Nähe des Wipfelendes des Stammes („Zopf“) sind historische bebeilte Balken oft stark waldkantig, weisen also keine scharfe Kante auf, sondern zeigen die Stammrundung. Auch wurde oft ein Stück des Stammes im Bereich der Astansätze des Wipfels mitbenutzt. Insgesamt ist historisches Bauholz oft stärker ästig, als man dies heute gewohnt ist. Je länger die Balken sind, desto häufiger und auffälliger sind solche Mängel. Manchmal sind die Balken auch nicht exakt prismatisch, sondern folgen mindestens in der Breite der Verjüngung des Stammes (bei konstanter Balkenhöhe). Beim Aufmaß langer Hölzer wie z. B. Sparren ist dies zu beachten. In solchen Fällen liegt das Zopfende des Stammes in der Regel oben, während man bei horizontalen Balkenlagen bei benachbarten Balken oft wechselweise rechts und links das Wipfelende findet. Bei bereits getrocknetem Holz ist das Bebeilen mit großer Mühe verbunden und führt nicht zu den erwünschten relativ glatten Oberflächen; trocken verarbeitetes Holz ist daher leicht zu erkennen. Meist ist es ein Hinweis auf Wiederverwendung von Material aus Vorgängerkonstruktionen.

In historischen Baukonstruktionen finden sich vorzugsweise Balken, die aus dem vollen Holz hergestellt sind, also den Kern des Querschnitts in der Mitte enthalten.



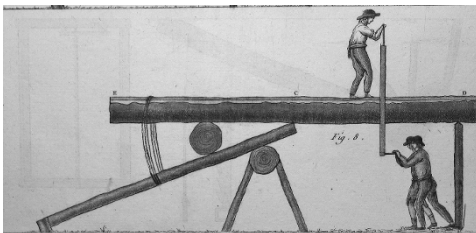
**Bild 2.7** Bebeilungsspuren an einem verbauten Fichtenholzbalken.

In der Regel nur für untergeordnete Zwecke (Windverbände und andere aussteifende Elemente) verwendete man auch längs aufgetrenntes Holz. Als Halbholz wird ein einmal längs aufgesägter Balken, als Viertels- oder Kreuzholz ein Teilstück eines kreuzförmig mit zwei Sägeschnitten in vier gleiche Teile zerlegten Balkens bezeichnet (Bild 2.8). Für Halb- und Viertelsbalken ist der bebeilte Vollholzbalken das Ausgangsprodukt. Halb- bzw. Viertelsbalken weisen daher nur eine bzw. zwei gesägte Oberflächen auf. Das Längssägen von Holz war bis zum 19. Jahrhundert ein arbeitsaufwendiger, langsamer und teurer Arbeitsvorgang und wurde daher meist vermieden, wenn nicht gerade Bohlen oder Bretter benötigt wurden. Da maschinell (zunächst mit Wind-, Wasser-, dann mit Dampfkraft) betriebene Sägegatter mit mehreren Sägeblättern sich erst ab dem 18. Jahrhundert nennenswert ausbreiteten und nur in Westeuropa häufiger waren (vgl. [Hoffmann 1802, S. 110–119]), musste vorher von Hand gesägt werden. Dies gilt vor allem für die Herstellung von Vollholzbalken, während Bohlen, Dielen und Latten durchaus in Schneidmühlen hergestellt wurden. Die geringeren Querschnitte und Längen waren hierbei der ausschlaggebende Faktor, der das maschinelle Sägen ermöglichte.

Zur Herstellung eines Längssägeschnitts von Hand (Bild 2.9) sind drei Arbeiter notwendig (Beschreibungen des Arbeitsvorgangs bei [Duhamel 1764, Bd. II, S. 657–661], [Hassenfratz 1804, S. 131–135]). Der Stamm wird über eine Grube gelegt oder wippenartig auf einen Bock gelegt. Zum Längssägen dient eine Rahmensäge, bei der ein einzelnes Sägeblatt in einen Rahmen eingespannt ist. Ein Arbeiter steht auf dem Stamm, hält die Säge in Position und zieht sie nach erfolgten Schnitt nach oben.



**Bild 2.8** Spuren einer manuellen Längssägung an einem Viertelholz aus Eiche (Corvey, 17. Jh.).



**Bild 2.9** Längssägen eines Balkens [Hassenfratz 1804].



**Bild 2.10** Maschinell gesägtes Holz des späten 19. Jahrhunderts (St. Anna im Lehel, München).

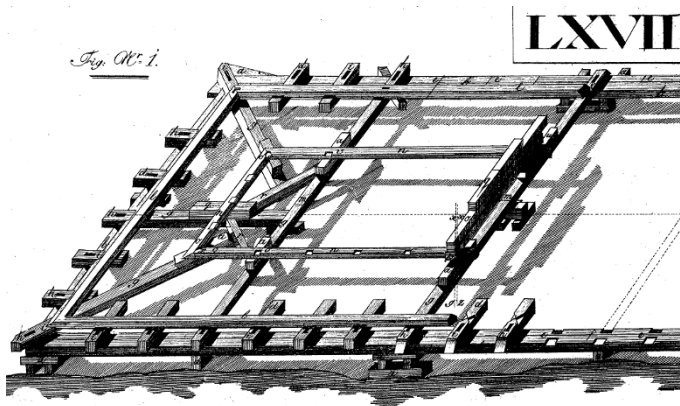
Zwei weitere Arbeiter stehen unten auf dem Boden und ziehen die Säge mit Muskelkraft und ihrem Körpergewicht nach unten, wobei der Einschnitt erfolgt. Die Sägeschnitte erfolgen dabei leicht schräg zur Stammachse. Sobald der Stamm zur Hälfte längs aufgetrennt ist, wird er umgeklappt und der Sägeschnitt vom anderen Stammende her fertiggestellt. Das Sägen mit der Längssäge hinterlässt auf dem fertigen Balken charakteristische Merkmale in Form der meist leicht bogenförmigen Spuren der Sägeschnitte und in Gestalt der in Balkenmitte in die andere Richtung umspringenden Sägespuren (Bild 2.8). Maschinell gattergesägte Balken aus modernem Holz sind hingegen durch exakt parallele, dicht nebeneinander liegende, gleichmäßige Sägespuren gekennzeichnet, die fast senkrecht zur Stabachse verlaufen, und sind allseitig gesägt. Da Sägespuren auch unter Schutzanstrichen im Streiflicht meist leicht zu erkennen bzw. ohne Schwierigkeit von Beileungsspuren zu unterscheiden sind, sind sie ein wichtiges Hilfsmittel, um moderne Auswechselungen oder Ergänzungen in historischen Dachwerken zu identifizieren. Vierseitig maschinengesägte Balken stammen in Süddeutschland in der Regel frühestens aus dem letzten Drittel des 19. Jahrhunderts (Bild 2.10). Die Beobachtung von gesägten Balken gibt somit wichtige Hinweise für die Rekonstruktion der Schadens- und Reparaturgeschichte.

Der nächste Schritt vom Stamm zum Bauteil eines Holztragwerks ist der Abbund. Mit Abbund wird das Ablängen der Hölzer und das Ausarbeiten der Holzverbindungen bezeichnet. Bild 2.11 zeigt den Architekten, den Zimmermeister und seine Gesellen bei der Arbeit sowie die wichtigsten Werkzeuge wie Breitbeil (zum Glätten der Balkenoberflächen), Schrotsäge (zum Ablängen der Balken), Löffelbohrer (zum Her-



**Bild 2.11** Abbinden eines Dachwerks [Schillinger 1745].



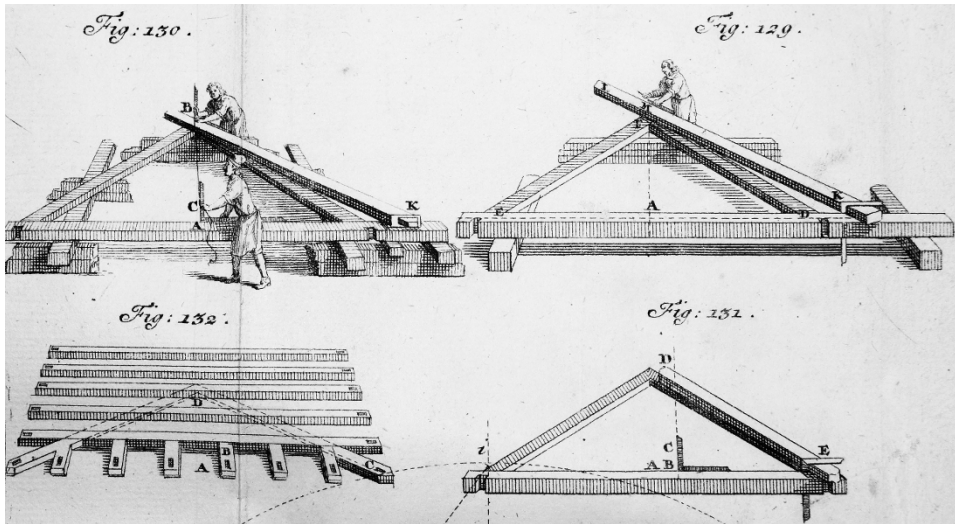


**Bild 2.12** Fertig abgebundenes Dachwerk in „Zulage“ auf dem Abbundplatz [Koller 1800].

stellen der Nagellöcher), Stoßaxt und Kreuzaxt (zum Herstellen von Zapfenlöchern), Klüpfel und Stemmeisen sowie Bauklammern zum temporären Fixieren der bearbeiteten Bauteile und die Messinstrumente Zollstock und Winkel. Der Abbund selbst erfolgte auf dem Abbundplatz, einem freien Gelände in der Nähe der Baustelle, der zum Bearbeiten der Hölzer und zum Auslegen aller Elemente in der zum Einbau bestimmten Ordnung genügend Platz bot (Bild 2.12).

Der historische Zimmerer arbeitete nur bei der Planung des Tragwerks mit Zeichnungen auf Papier. Auf dem Abbundplatz erfolgten die geometrischen Konstruktionen im Maßstab 1:1 am originalen Bauteil. Die zugehörigen Verfahrensschritte, die mit dem Abmessen von Längen bzw. dem Bestimmen von Winkeln über (ganzzahlige) Längenverhältnisse, mit dem Anlegen der Balken und mit dem Anlegen des Zimmermannswinkels und dem Antragen der Verbindungsgeometrie auf der Balkenoberfläche einhergingen, waren in den Zimmermannstraktaten kodifiziert und wurden in den Zünften gelehrt (Bild 2.13). Zum Aufzeichnen der herzustellenden Sägeschnitte und Bohrungen auf der Balkenoberfläche wurde in der Regel Rötel verwendet (Bleistift erst im 19. Jh.). Nicht selten sieht man an ausgeführten Bauten noch längs der Mittelachse der Balken verlaufende rote Schnurschläge oder Vorzeichnungen für Zapfenlöcher oder andere Anschlussdetails. Für sich wiederholende Konstruktionsteile wurde manchmal eine Vorlage angefertigt („Lehrgeespärre“ bzw. Mustergeespärre); alle anderen gleichartigen Teile wurden sodann durch Anlegen an das Lehrgeespärre kopiert. Bei komplizierten Konstruktionen wurden im Lehrgeespärre alle maßgeblichen Bauteile in ihrer Geometrie festgelegt (z. B. Normal-, Grat- und Kehlsparren bei Dächern über L-Grundriss), es handelte sich in diesem Fall beim Lehrgeespärre also um ein Unikat, das später im Bauwerk keine Verwendung finden konnte (Bild 2.13).

Das Ausarbeiten der Verbindungsdetails erfolgte mit Sägeschnitten, mit dem Stemmeisen und der Stoßaxt sowie mit dem Löffelbohrer (Bild 2.11). Zum Stemmen von Zapfenlöchern kam auch die Kreuzaxt zum Einsatz. Wie die Bilder 2.11 und 2.13 zeigen, wurden die Konstruktionseinheiten auf dem Abbundplatz liegend von oben



**Bild 2.13** Anlegen von Balken an das Lehrgespärre zur Konstruktion eines Gratsparrens [Schübler 1731].

her bearbeitet. Diejenige Seite der Balken, die beim Abbund oben liegt, wird als Bundseite bezeichnet. Werden Balken verschiedener Dicke miteinander verbunden, so liegt die Bundseite aller Balken einer Konstruktionseinheit normalerweise in derselben Ebene. Die Balken werden also nicht zentrisch miteinander verbunden. Zentrische Verbindungen zwischen Balken verschiedener Dicke setzten sich erst im 19. Jahrhundert durch. Die Bundseite ist auch für bauarchäologische und tragwerksplanerische Untersuchungen die Referenzseite einer handwerklichen Holzkonstruktion. Aufmaß und Untersuchung konzentrieren sich auf die Bundseite.

Trotz des an eine moderne Vorfertigung erinnernden Verfahrens der Vorbereitung aller Konstruktionshölzer auf dem Abbundplatz war eine Austauschbarkeit der einzelnen Elemente nicht gegeben, und jedes Element musste als Einzelstück behandelt werden. Da trotz aller Sorgfalt beim Ausarbeiten der Verbindungen jede Verbindung in minimalen Details individuell geriet, war es notwendig, die zu verbindenden Bauteile provisorisch zusammenzustecken und die Passgenauigkeit der Verbindungselemente zu prüfen bzw. anzugleichen. Um die Übersicht zu behalten, wurden vom Zimmerer alle fertigen Hölzer entsprechend der geplanten Bestimmung am fertigen Objekt auf dem Abbundplatz zurechtgelegt („Zulage“ oder „Werksatz“). Historische Planzeichnungen stellen entsprechend dieser Arbeitsweise oft nicht den Grundriss der fertigen Konstruktion dar, sondern die Draufsicht auf die Zulage, die auch die Anschlussdetails zeigt. Um auch beim späteren Einbau die korrekte wechselseitige Zuordnung der einzelnen Konstruktionshölzer sicherzustellen, wurden diese sofort nach Prüfung ihrer Passgenauigkeit auf dem Abbundplatz markiert. Diese Montagezeichen werden als Abbundmarken bezeichnet.

Abbundmarken sind auch für den Tragwerksplaner wichtige Indizien zur Entschlüsselung der Bau- und Reparaturgeschichte eines historischen Holztragwerks. Im Mit-