

Teil 1

Festigkeitsuntersuchung an verbauten Konstruktionshölzern

Investigation to determine the strength of structural timber

Masterarbeit
im Masterstudiengang
Denkmalpflege / Heritage Conservation

Der Otto- Friedrich- Universität Bamberg und
der Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg

Verfasser: B. Eng. Frank Ebner
Dittelbrunner Straße 4 ½
97422 Schweinfurt
Matrikelnummer: 1882199

Erster Betreuer: Dr.-Ing. Dipl.-Holzwirt Thomas Eißing,
Otto-Friedrich- Universität Bamberg

Zweiter Betreuer: Prof. Dr. Olaf Huth,
Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mir bei dem Gelingen der vorliegenden Arbeit geholfen haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Holzwirt Thomas Eißing für die Betreuung und seine Begeisterung für die Holzthematik. Meinem Zweitkorrektor Herrn Prof. Dr. Olaf Huth spreche ich meinen Dank für seine Korrekturen aus. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing Christian Fischer von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg- Schweinfurt dafür, dass ich die Biegeprüfungen im dortigen Baustofflabor durchführen konnte. Herrn Andreas Hack, der die Biegeprüfung mit mir durchgeführt hat, gilt natürlich auch mein Dank.

Für Ratschläge und Unterstützung bedanke ich mich noch bei Herrn Dr.-Ing. Rainer Görlicher von KIT in Karlsruhe, bei Herrn Frank Rinn von RINNTECH in Heidelberg und bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gunter Linke von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Dem staatlichen Bauamt Bamberg und dem Büro B+D Ingenieure Bayreuth danke ich für die Unterstützung bei der Objektuntersuchung. Beim Benediktinerkloster Ettal bedanke ich mich für die ruhigen Wochen, in denen ich mich meiner Arbeit widmen konnte.

Meinen Korrekturlesern danke ich für die Hinweise. Johannes Aumüller danke ich für die helfenden Hände bei den praktischen Teilen. Zuletzt danke ich meiner Familie und Freunden für die Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	1
2.1	Forschungsstand	1
2.2	Holzkundliche Grundlagen	1
2.2.1	Anatomie des Holzes	1
2.2.1.1	Makroskopischer Aufbau	1
2.2.1.1.1	Allgemeiner Aufbau	1
2.2.1.1.2	Jahrringe	2
2.2.1.1.3	Ästigkeit	2
2.2.1.2	Mikroskopischer Aufbau	3
2.2.2	Bestandteile von Holz	4
2.2.3	Alterung von Holz	4
2.2.4	Physik des Holzes	6
2.2.4.1	Feuchtigkeitsverhalten	7
2.2.4.1.1	Allgemeines	7
2.2.4.1.2	Bestimmung der Feuchte	8
2.2.4.1.3	Quell- und Schwindverhalten	9
2.2.4.2	Dichte	9
2.2.4.2.1	Allgemeines	9
2.2.4.2.2	Einflüsse auf die Dichte	10
2.2.4.2.3	Dichteprofile	10
2.2.4.2.4	Dichtebestimmung	11
2.2.4.2.5	Einfluss der Dichte auf andere Eigenschaften	11
2.2.4.3	Elastizitätsmodul	11
2.2.4.3.1	Allgemeines	11
2.2.4.3.2	Einflüsse auf den Elastizitätsmodul	13
2.2.4.3.3	Dynamischer Elastizitätsmodul	13
2.2.4.3.4	Korrelationen	14
2.2.5	Festigkeit	14
2.2.5.1	Einflussfaktoren	14
2.2.5.2	Zugfestigkeit	17
2.2.5.2.1	Druckfestigkeit	17
2.2.5.2.2	Biegefestigkeit	19
2.2.5.3	Scherfestigkeit	20
2.2.5.3.1	Normprüfkörper zu Bauteil	21

2.2.5.4	Rheologische Eigenschaften	21
2.2.6	Schädlinge im Holz	21
2.2.6.1	Tierische Schädlinge	21
2.2.6.1.1	Trockenholzinsekten.....	21
2.2.6.1.1.1	Hausbockkäfer	21
2.2.6.1.1.2	Gewöhnlicher Nagekäfer (Anobium Punktum).....	22
2.2.6.1.1.3	Splintholzkäfer.....	22
2.2.6.1.2	Faulholzinsekten.....	22
2.2.6.1.2.1	Trotzkopf	22
2.2.6.1.2.2	Rothalsbock	22
2.2.6.1.2.3	Gescheckter Nagekäfer („Echte Totenuhr“).....	22
2.2.6.2	Pilze.....	23
2.2.6.2.1	Weißer Porenschwamm	23
2.2.6.2.2	Echter Hausschwamm	23
2.2.6.2.3	Brauner Kellerschwamm	23
2.2.6.2.4	Blättling	23
2.2.7	Schallausbreitung im Holz	23
2.2.7.1	Allgemeines.....	23
2.2.7.2	Einflüsse auf die Schallausbreitung	24
2.2.7.3	Zusammenhang zu anderen Eigenschaften	25
2.2.7.4	Verfahren.....	25
2.2.7.4.1	Schalllaufzeitmessung	25
2.2.7.4.2	Echo- Ultraschall	26
2.2.7.4.3	Schall- Tomographie	26
2.2.8	Holzgütesortierung	26
2.2.8.1	Baumkante.....	26
2.2.8.2	Äste.....	27
2.2.8.3	Jahrringbreiten.....	27
2.2.8.4	Faserneigung	27
2.2.8.5	Risse	27
2.2.8.6	Druckholz	28
2.2.8.7	Insektenfraß	28
2.2.8.8	Mistelbefall.....	28
2.2.8.9	Krümmung	28
2.2.8.10	Markröhre.....	28
2.2.8.11	S15 bzw. LS 15	28

2.3	Normen	29
2.3.1	Kennzeichnung der Sortierung	29
2.3.2	Sicherheitssystem nach Eurocode 5	30
3	Gerätetechnik.....	33
3.1	Feuchtebestimmung mit der Widerstandsmethode.....	33
3.2	Bohrwiderstandsmessgerät	33
3.2.1	Verfahren.....	33
3.2.2	Einflüsse auf den Bohrwiderstand.....	34
3.2.2.1	Rohdichte	34
3.2.2.2	Holzfeuchtigkeit	35
3.2.2.3	Äste und Risse	35
3.2.2.4	Holzschädigung	35
3.2.2.5	Bohrtrend.....	36
3.2.2.6	Abnutzung	36
3.2.2.7	Verdrillung	36
3.2.2.8	Verlaufen	37
3.2.2.9	Beispielhafte Bohrdiagramme.....	37
3.3	Impulstomograph.....	38
3.3.1	Gerätehandhabung.....	38
3.3.2	Fehlerquellen	38
3.4	Messungenauigkeit	38
3.4.1	Allgemeines.....	38
3.4.2	Messfehler bei Querschnittsmessungen	39
3.4.3	Messfehler bei Rohdichte über Bohrwiderstand	39
3.4.4	Messfehler bei Ermittlung der Schalllaufzeit.....	39
3.4.5	Messungenauigkeit im dynamischen E- Modul	39
4	Biegeversuch	40
4.1	Allgemeines	40
4.2	Versuchsdurchführung.....	40
4.3	Prüfkörperauswertung	42
4.4	Ergebnisdiskussion	43
4.4.1	Statistische Grundlagen.....	43
4.4.1.1	Korrelationskoeffizient (r).....	43
4.4.1.2	Bestimmtheitsmaß (R^2)	44
4.4.1.3	Varianz (s^2).....	44
4.4.1.4	Standardabweichung (s)	44

4.4.1.5	Variationskoeffizient (v)	44
4.4.2	Auswertung	45
4.4.3	Fehlerdiskussion	47
5	Anwendungsbeispiele	49
5.1	Vorgehensweise	49
5.1.1	Bauzustandserfassung	49
5.1.2	Festigkeitsabschätzung	49
5.1.2.1	Druckfestigkeitsuntersuchung	49
5.1.2.2	Biege- und Zugfestigkeitsuntersuchung	49
5.2	Dominikanerkirche	50
5.2.1	Vorgehensweise	50
5.2.1.1	Gespärre 37, westlicher Ständer	50
5.2.1.2	Ständer der Holztonne	53
5.3	Kapelle St. Walburga	56
5.3.1	Statik Dachwerk	57
5.3.1.1	Lastannahmen	57
5.3.1.2	Auswertung	58
5.3.2	Zustandserfassung	59
5.3.3	Instandsetzungsvorschlag	60
6	Zusammenfassung	61
	Quellenverzeichnis.....	63
	Literatur	63
	Normen	65
	Eidesstattliche Erklärung	67

1 Einleitung

Historische Holzkonstruktionen sind etwas Besonderes. Dabei enthält nahezu jedes althergebrachte Gebäude hölzerne Bestandteile. Dafür muss es sich nicht um ein Fachwerk oder gar Blockhaus handeln. Nahezu jede Flachdecke und jedes Dachwerk wurde bis ins 19. Jahrhundert als Holzkonstruktion errichtet. Daraus ergibt sich eine immense Zahl von mehr oder weniger erhaltenswerten Holzbauteilen. Diese Konstruktionen haben häufig bereits mehrere Jahrhunderte überdauert. In diesem Zeitraum lässt sich für die statische Beurteilung mit großer Sicherheit sagen, dass bereits alle relevanten Lastfälle auf das Tragwerk eingewirkt haben. Jedes Ereignis hinterlässt Spuren an der Konstruktion, die nur interpretiert werden müssen. Für die statische Beurteilung bedeutet dies, dass die Tragkonstruktionen genau begutachtet und dokumentiert werden müssen.

Leider lässt sich zu häufig beobachten, dass genau diese Zustandsanalyse, von der Dokumentation ganz zu schweigen, unzureichend ist. Dabei besteht die Zustandsanalyse aus mehreren Aspekten. Einem Konstruktionsgeschichtlichen, bei dem die Bau- bzw. Schadensgeschichte interpretiert wird. Der klassische Schadensbefund ist für eine spätere Instandsetzung der Konstruktion wesentlich. Für die statische Betrachtung unabdingbar ist die Überprüfung des statischen Systems. Vor allem Dachwerke sind häufig so komplex, dass man sich dem realen Lastabtrag nur annähern kann. Vernachlässigt wird dabei in der Regel, die Holzfestigkeiten zu untersuchen. Im einfachsten Fall lassen sich Balken nach visuellen Sortierkriterien einer Festigkeitsklasse zuordnen. Bei aufwändigeren Untersuchungen kann noch Gerätetechnik hinzugenommen werden. Dafür bietet sich unter anderem das Bohrwiderstandsmessgerät an, da mit ihm sowohl die Rohdichte über den Holzquerschnitt, als auch verdeckte Schädigungen erkannt werden können. Die Rohdichte allein reicht jedoch für eine Festigkeitsabschätzung nicht aus. Wird die Rohdichte mit der longitudinalen Schalllaufzeit kombiniert, lässt sich das dynamische E-Modul ermitteln, mit dem eine Festigkeitsabschätzung vorgenommen werden kann¹.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob sich die Festigkeit von historischen Holzbalken mit der Kombination von visuellen Sortierkriterien, Rohdichte und Ermittlung der longitudinalen Schalllaufzeit abschätzen lässt. Weiterhin wird die dafür nötige Zustandskartierung aufgegriffen. Nachdem es sich bei der Festigkeitsabschätzung von verbauten Hölzern um kein Thema des Allgemeinwissens handelt, beleuchtet der erste Teil der Arbeit holzkundliche Grundlagen, wie dem Holzaufbau, Eigenschaften, Schädlingen und der Sortierung. Es schließt sich eine Biegeversuchsreihe mit 21 Balken in Bauteilgröße daran an.

Die praktische Anwendung wird Anhand von zwei Objekten mit verschiedenen Fragestellungen gezeigt. Im ersten Objekt, der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg wird ein pilzgeschädigtes Holz auf seine Resttragfähigkeit untersucht. Bei zwei intakten Hölzern wird die Druckfestigkeit abgeschätzt. In der Kapelle St. Walburga wird der Zustand des Dachwerkes erfasst und in Kombination mit der statischen Berechnung und der Festigkeitsabschätzung hochbelasteter Bereiche, ein Instandsetzungsvorschlag erarbeitet.

¹ Görlacher und Eckert (1999), S. 47

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Forschungsstand

Für die holzphysikalischen Grundlagen lassen sich die Werke von Franz Kollmann, Leopold Vorreiter und Peter Niemz zitieren. Dabei ist Vorreiter als Einstieg zu empfehlen, da er recht kompakt und mit umfangreichen Erklärungen des Hintergrundes die Thematik Holz abarbeitet. Kollmann und Niemz gehören wohl zu den Standardwerken. Dabei bietet sich Niemz an, um den aktuellen Stand der Holzforschung zu erarbeiten. Leider kommen bei ihm die technologischen Kennwerte der bautypischen Hölzer (Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche, Douglasie, Eiche) zu kurz. Dafür kann wiederum Kollmann empfohlen werden, der in sehr umfangreicher Art und Weise das Thema Holz bearbeitet hat. Zusätzlich gibt es in den einschlägigen Fachzeitschriften wie „Holztechnologie“, „Holz als Roh- und Werkstoff“ oder auch „Bauen mit Holz“ eine Vielzahl an Aufsätzen zu den Grundlagen. Claus Mattheck hat das Themenfeld Holz einfach und verständlich aufbereitet. Er behandelt zwar kaum Bauholz, aber die Anatomie stehender Bäume.

Die systematische Erforschung von Holzeigenschaften beginnt mit der Gründung des „Forest Products Laboratory“ in Madison/ Wisconsin in den USA 1910², dem Gründungen von Holztechnologischen Instituten in aller Welt folgen. Die Kennwerte werden dabei bis heute vor allem an genormten, fehlerfreien, kleinen Prüfkörpern getestet. In den letzten 30 Jahren wurden Prüfungen an fehlerfreien Altholzprüfungen in größeren Umfang durchgeführt.

Für die in dieser Arbeit behandelte Fragestellung sind jedoch die Publikationen interessant, in denen alte Balken in Originalmaßstab geprüft werden. Dabei lässt sich feststellen, dass nach wie vor Arbeiten fehlen, in denen eine umfangreiche Menge an alten Hölzern mit Bauteilabmessungen geprüft wurden. Nier³ hat in seiner Dissertation 52 Nadelhölzer untersucht. Ehlbeck und Görlacher⁴ 25 Balken, Rug und Seemann⁵ 70 alte Sparren und von Schickhofer und Brandner⁶ wurden 62 Balken aus einer 1939 errichteten Messehalle untersucht. Gunter Linke untersucht derzeit im Rahmen seiner Dissertation an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus neue und alte Hölzer⁷. Er versucht dabei, die Sortierung von Hölzern aufgrund verschiedener Parameter, z.B. der Schalllaufzeit zu verbessern. Dabei behandelt er auch die Festigkeitssortierung verbauter Hölzer.

² Köstler, Kollmann und v. Massow (1960) zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 29

³ Nier (1994)

⁴ Ehlbeck und Görlacher (1987), zitiert in Erler (2004), S. 70

⁵ Rug und Seemann (1989), zitiert in Erler (2004), S. 70

⁶ Schickhofer und Brandner (2011)

⁷ Linke, Rug, Pasternak (2018)

Bei der In- Situ Festigkeitsprüfung an verbauten Konstruktionshölzern können verschiedene Verfahren durchgeführt werden. Mit dem Bohrwiderstandsmessgerät^{8 9 10} wird sowohl der innere Zustand als auch die Rohdichte gemessen. Für die Schadenserkenkung eignet sich ebenfalls das Ultraschallechoverfahren¹¹. Über die Impulsschalllaufzeit^{3 12 13} lässt sich das dynamische E-Modul berechnen oder ein Schalltomogramm anlegen. Weiterhin ist es noch möglich, Belastungsproben vorzunehmen.

Für die Durchführung von Prüfungen an verbauten Hölzern muss immer erst die Konstruktion aufgenommen werden. Dabei muss der Zustand der Konstruktion in einer nachvollziehbaren Weise dokumentiert werden. Hierfür gibt es unzählige Ansätze und noch mehr Veröffentlichungen. Erwähnenswert sind die von Rinn¹⁴, Meisel¹⁵ und der Beratungsstelle für Handwerk und Denkmalpflege in Fulda¹⁶ um nur einige zu nennen.

⁸ Rinn (2012a, 2012b, 2015a, 2006, 2008, 2015b)

⁹ Görlacher und Eckert (1999, 1996), Görlacher (1987)

¹⁰ Rug und Held (1995a, 1995b)

¹¹ Hasenstab (2005), Hasenstab und Krause (2005a, 2005b)

¹² Görlacher und Eckert (1996)

¹³ Rinn (2008, 2006, 2004)

¹⁴ Rinn (2008, 2006), Rinn und Fischer H.-B. (1996)

¹⁵ Meisel (2015)

¹⁶ Thümmeler und Kugele (2008)

2.2 Holzkundliche Grundlagen

2.2.1 Anatomie des Holzes

Die wesentlichen Strukturmerkmale werden in Tabelle 1 stichpunktartig zusammengestellt. Die qualitativen Zusammenhänge zwischen einzelnen Strukturparametern werden in Abbildung 1 dargestellt. Im Anschluss wird näher auf einzelne Teilbereiche eingegangen.

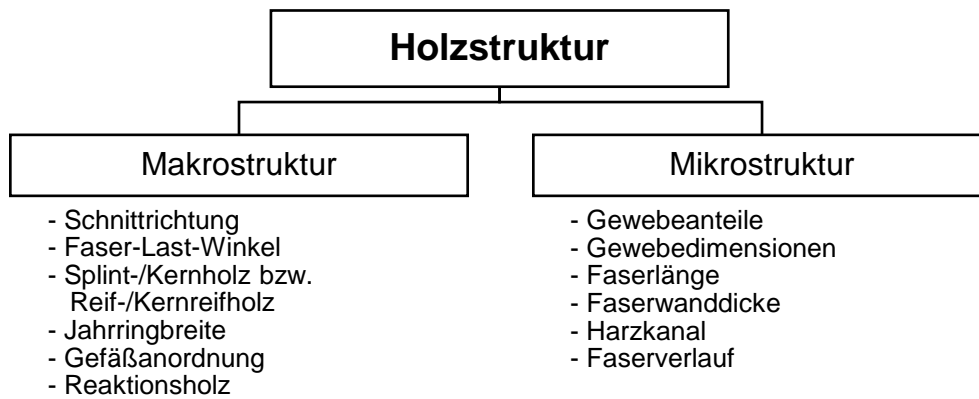


Tabelle 1: Strukturmerkmale von Holz, aus Niemz 2017, S. 47, Bild 4.9

2.2.1.1 Makroskopischer Aufbau

2.2.1.1.1 Allgemeiner Aufbau

„Holz ist ein durch die Lebenstätigkeit von Pflanzen, vornehmlich von Bäumen, organisch gewachsener Körper...“¹⁷. Dabei wird das Holz nach Holzart sowie dem Baumteil (Wurzel-, Schaft-, Kronen-, Astholz) unterschieden. Dem unteren Schaftbereich kommt aufgrund des größeren Durchmessers, wie auch der geringeren Ästigkeit im Vergleich zu den oberen Baumbereichen der wirtschaftlich wichtigste Teil zu. Ast-, Wurzel-, und Kronenholz werden und wurden im Bauwesen kaum verwendet. Gegen die Verwendung im Konstruktiven spricht der Anteil des Reaktionsholzes¹⁸, der beim Trocknen für starke Rissbildung und Verwerfungen sorgt. Der Holzabschnitt wird in Früh- und Spätholzjahrringe, sowie das Splint-, Reif- und Kernholz¹⁹ unterteilt.

Bei der Holzart unterscheidet man Nadelholz von Laubholz.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch den makroskopischen Aufbau eines 4-jährigen Kiefernstammes. Einen Stammabschnitt kann man in drei senkrecht zueinanderstehende Schnitte teilen. In den Querschnitt (Hirnschnitt) senkrecht zur Wuchsrichtung, den Radialschnitt durch die Längsachse und den Tangentialschnitt als Schnitt parallel zur Wuchsachse durch eine Sehne des Stammkreises (Abbildung 2).

Der Stamm besteht dabei von außen nach innen aus der Borke (Außenrinde), dem Bast (Innenrinde), dem Kambium²⁰, dem Kern- und Splintholz und im Inneren der Markröhre.

¹⁷ Vorreiter (1949), S. 81

¹⁸ Reaktionsholz = Laubholz bildet Zugholz und Nadelholz Druckholz in Bereichen großer Belastung aus. Reaktionsholz weist unter anderem ein größeres Schwindverhalten auf. Aus Lohmann (2010)

¹⁹ Kernholz = innere Holzteil im stehenden Stamm, in dem alle Wasser leitenden und speichernden Zellen außer Funktion gesetzt bzw. abgestorben sind. Reifholzbäume bilden wie Kernholzbäume einen trockeneren Kern aus, der sich aber farblich nicht vom Splint unterscheidet, z.B. Fichte. Splintholz = der äußere Teil des Holzes, mit lebenden Parenchymzellen. In ihm findet die Wasserleitung statt. Splintholz ist in der Regel weniger Dauerhaft wie Kernholz. Aus Lohmann (2010)

²⁰ Kambium = Schicht zwischen Holz und Rinde, die durch Zellteilung das Dickenwachstum erzeugt. Aus Lohmann (2010)

Bei Kernholzbäumen kann zwischen dem farbigen Kern und dem Splint unterschieden werden (z.B. Eiche, Kiefer, Lärche). Reifholzbäumen bilden zwar ebenfalls einen Kern aus, aber er ist farblich nicht zu trennen (z.B. Fichte, Tanne). Bei Splintholzbäumen bildet sich kein Kern (z.B. Ahorn, Birke, Erle).

2.2.1.1.2 Jahrringe

Die Jahrringbreite hat bei Nadelhölzern, ring- und halbporigen Hölzern²¹ einen großen Einfluss auf die Holzdicke. Abbildung 3 zeigt den Querschnitt eines ring-, halbring- und zerstreutporigem Holz. Ein Jahrring besteht aus einem Spät- und einem Frühholzanteil. Die Dichte des weitlumigen Frühholzanteil kann bis zu 1/3 des dichteren Spätholzanteils betragen²². Die Jahrringverteilung innerhalb eines Stammes ist nicht gleich, so unterscheiden sich die Jahrringbreiten durch:

- den Querschnitt, große Breite in Marknähe und engere im äußeren Bereich (Alterstrend)
- die Stammhöhe
- die Himmels- bzw. Windrichtung.

Bei idealen Wuchsbedingungen bildet sich bei ringporigen Hölzern (z.B. Eiche, Esche, Ulme) ein breiterer Spätholzbereich, was eine erhöhte Dichte zur Folge hat²³ (Abbildung 4). Bei Nadelhölzern (z.B. Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Douglasie) erhöht sich mit steigender Jahrringbreite der leichtere Frühholzanteil. Bei Kiefer und Lärche lässt sich ein Maximum der Dichte bei einer Breite von 1 mm erkennen (Abbildung 5). Für das Bauwesen interessant sind dabei nur Nadelhölzer mit einer Jahrringbreite über 1 mm. Damit kann bei Nadelholz vereinfacht davon ausgegangen werden, dass mit steigender Jahrringbreite die Rohdicke sinkt. Für die Sortierung nach DIN 4074 gilt bei den Nadelhölzern außer Douglasie eine mittlere Jahrringbreite von 6 mm für Hölzer mit normaler Festigkeit und 4 mm für höhere Ansprüche. Bei Laubholz gibt es keine Forderung nach der Jahrringbreite.

2.2.1.1.3 Ästigkeit

Äste sind im Holz eine normale Erscheinung. Die Häufigkeit und Größe entscheidet aber maßgeblich über die Festigkeit und sind deswegen für die Sortierung nach DIN 4074 wichtig. Bei der Sortierung wird bei großen Einzelästen der Durchmesser und bei Astansammlung die Summe der Astdurchmesser gemessen. Die Ästigkeit beschreibt das Verhältnis vom kleinsten Durchmesser des größten Einzelastes zur zugehörigen Bauteilhöhe.

Nach DIN 4074²⁴ wird dabei nicht zwischen abgestorbenen überwalmtten Ästen (Schwarzast) und festverwachsenen Ästen (Weißast)²⁵ unterschieden. Im Balken selbst machen die einzelnen Astarten kaum einen festigkeitsrelevanten Unterschied²⁶. Selbst Astlöcher werden dabei wie Äste behandelt.

Äste bilden sich von der Markröhre ausgehend. Dabei wächst um den Ast eine Kambiumschicht²⁰⁵, die wie beim Hauptstamm für das Dickenwachstum zuständig ist. Die Fasern im

²¹ Ringporig = „die im Frühholz gebildeten Gefäße sind viel größer als die später gebildeten und sind dadurch deutlich als Ring im Jahrring zu erkennen.“ Halbringporig = „die Gefäße im Frühholz sind nur unwesentlich größer als im Spätholz, auch fehlt den Frühholzgefäßen die ringförmige Anordnung“. Zerstreutporig = „Über den gesamten Jahrringquerschnitt sind die Poren etwa gleich groß und gleichmäßig verteilt.“

Lohmann (2010), S. 1002

²² Kollmann (1982), S. 345

²³ Müller pflanzte früher sogenannte Wassereichen in der Nähe eines Bachlaufes um für die hochbelasteten Bauteile der Mühle, immer ausreichend qualitativ hochwertiges Eichenholz zur Verfügung zu haben. Mündliche Information von Thomas Eißing (2018).

²⁴ DIN 4074-1:2012-06 und DIN 4074-5:2008-12

²⁵ Baron (2009), S. 16

²⁶ Forest Products Laboratory (2010), S. 6-3

Hauptstamm orientieren dabei um die Äste herum (Abbildung 6).

Obwohl die Fasern bei Druck im Astbereich in die schwächere Richtung quer zur Faser belastet werden, nimmt die Druckfestigkeit nicht im gleichen Maße ab wie die Zugfestigkeit. Das liegt vor allem daran, dass die Rohdichte der Äste bei Laubholz um 5 bis 6 % höher und bei Nadelholz gar bis zu 150 % höher ist²⁷. Im Balken wird die Zugfestigkeit stark durch Äste gemindert. (Abbildung 7 und 8). Für die Biegebelastung ergibt sich daraus, dass Äste im Zugbereich zu einer wesentlichen Minderung führen, während Äste im Druckbereich nur eine geringere Festigkeitsminderung zur Folge haben. Damit lässt sich erklären, warum bei Biegebalken die Äste in den Druckbereich gedreht werden sollen.^{28 29}

Für die Schubbelastung ergeben sich nach den Versuchen von Ehlbeck und Görlacher³⁰ im Auflager- und Stützbereich nahezu keine Festigkeitsänderungen.

2.2.1.2 Mikroskopischer Aufbau

Nadelhölzer haben zwei Zellen- bzw. Faserarten. Die längs gerichteten Tracheiden, die mit bis zu 95 % den größten Volumenanteil besitzen³¹ und die Parenchymzellen. Die weitlumig dünnwandigen Frühholztracheiden dienen vor allem der Wasserversorgung. An den Wänden befinden sich bis zu 300 große Hoftüpfel, um den Flüssigkeitsaustausch zwischen den Tracheiden zu gewährleisten. Die Hauptaufgabe der Spätholztracheiden ist die Festigung des Baumes, wodurch sie dicker und englumig sind. Dafür besitzen die Spätholztracheiden lediglich wenige Hoftüpfel. Die Parenchymzellen dienen hauptsächlich der Speicherung von Reservestoffen und durchziehen das Holz in radialer Richtung (Holzstrahlen). Abbildung 9 zeigt den Querschnitt durch ein Nadelholz.

Bei Laubholz finden sich drei Arten von Zellen- bzw. Faserarten. Die Tracheen oder Gefäße, die in ihrem Aufbau dem der Frühholztracheiden ähneln, die Parenchymzellen und die Libriformfasern. Die Anordnung der Tracheen bzw. Poren im Querschnitt ist typisch für eine Holzart. Über diese Verteilung werden ring-, halb-, und zerstreutporige Hölzer unterschieden. Der Unterschied zwischen den Tracheen des Laubholzes und den Tracheiden des Nadelholzes liegt in der Leistungsfähigkeit. Tracheen können an Sommertagen eine Steiggeschwindigkeit von bis zu 50 m/h, Tracheiden lediglich von 5 m/h erzeugen³². Die unterschiedliche Steiggeschwindigkeit liegt am Aufbau. Tracheen liegen übereinander und erzeugen so eine bis zu mehreren Metern lange Röhre, während Tracheiden sich seitlich überlappen und damit die Einzelröhren nur einige Millimeter betragen. Dabei wirken die Tüpfel wie Ventile.

Die Parenchymzellen sind in ihrer Speicherfunktion ähnlich derer im Nadelholz, die Formenvielfalt ist bei Laubholz allerdings größer.

Die Festigkeit im Laubholz wird entscheidend von den Libriformzellen geprägt. Diese schmalen, spitzzulaufenden Zellen bilden die Hauptmasse des Holzes.

Abbildung 10 zeigt den Querschnitt durch ein Laubholz.

²⁷ Görlacher (1990) zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 343

²⁸ Mönck und Rug (2000), S. 20

²⁹ Kollmann (1982), S. 798

³⁰ Ehlbeck und Görlacher 1993 zitiert in Baron (2009), S. 16

³¹ Kollmann (1982), S. 10

³² Baron (2009), S. 17

2.2.2 Bestandteile von Holz

Die Hauptbestandteile von Holz sind Zellulose, Hemizellulose und Lignin³³. Es finden sich in den Zellwänden und in den Hohlräumen der Zellmatrix weitere chemische Stoffe wie Harze, Wachse und Fette. Deren Anteil beträgt lediglich 0,5 – 10%³⁴. Die Menge und Art der Zusatzstoffe beeinflusst die Pilzresistenz, das Sorptions- sowie Quell und Schwindverhalten in nicht unerheblichem Maße³⁴.

der Holzkörper besteht zu etwa 40 bis 60 % aus Zellulose³⁵. Aus den Zelluloseketten bilden sich durch Bündelung die Microfibrillen³⁶. Die Zellulosestränge sind in Achsrichtung sehr zugfest. Hemizellulose hat einen Anteil von 27 bis zu 37 % an der Holzmasse³⁵. Sie stellt dabei einen sich verzweigenden amorphen Bereich innerhalb der Mikrostruktur mit enger Verbindung zur Zellulose dar. Durch die Verzweigungen wird das Lignin fester an die Zellulose gebunden.

Lignin ist die „Kittsubstanz“³⁷, durch die die Zellulose und die Hemizellulose fest in die Holzstruktur eingebunden werden. Nadelhölzer bestehen zu etwa 21 % und Laubhölzer zu etwa 27 % aus Lignin³⁸. In Abbildung 11 wird der prinzipielle Aufbau eines Jahrringes vereinfacht dargestellt. Die Zellulose sind in der Grafik zugfeste Schläuche und das Lignin druckfeste Steine. In Querrichtung befindet sich ein Holzstrahl, der ebenfalls aus Ligninsteinen und Zelluloseschläuchen besteht. Zusammengefasst bestimmt das Lignin die Druckfestigkeit und die Zellulose die Zugfestigkeit.

2.2.3 Alterung von Holz

Unter Alterung versteht man die Veränderung von Eigenschaften unter natürlichen oder künstlichen Bedingungen über einen längeren Zeitraum³⁹. Die Alterung von Vollholz ist relativ wenig erforscht und die bisherigen Ergebnisse sind teilweise widersprüchlich. Der aktuelle Wissenstand findet sich in der Dissertation von Kránitz^{40 41}. Wenn nachfolgend keine andere Angabe gemacht ist, beziehen sich die Informationen zu den Eigenschaften von gealtertem Holz auf Kránitz⁴⁰.

Wie sich Holz mit der Zeit verändert, ist von den Lagerbedingungen abhängig. Im Allgemeinen gilt Holz unter trockenen Bedingungen als praktisch unbegrenzt haltbar. Einflüsse für die Alterung sind Bewitterung, UV-Licht und Langzeitbelastungen. Auf eine Vorschädigung anderer Organismen wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen.

Die hygroskopischen Eigenschaften von gealtertem Holz sind bisher wenig untersucht. Nach bisherigem Wissenstand nimmt die Wasseraufnahmefähigkeit geringfügig ab. Einhergehend damit nimmt aber das Quell- und Schwindmaß ab⁴². Bei den chemischen Eigenschaften sinkt der Anteil an Hemizellulose und Zellulose geringfügig ab.

Relativ gut untersucht sind die Festigkeitseigenschaften von altem Holz.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Eigenschaftsänderungen bei alten Hölzern.

³³ Kollmann (1982), S. 125

³⁴ Niemz und Sonderegger (2017), S. 46

³⁵ Kollmann (1982), S. 125

³⁶ Wagenführ und Scholz (2008) zitiert in Baron (2009), S. 18

³⁷ Kollmann (1982), S. 154

³⁸ Baron (2009), S. 21

³⁹ Niemz und Sonderegger (2017), S. 258

⁴⁰ Kránitz (2014)

⁴¹ Kránitz et al. (2014)

⁴² Lohmann (2010), S. 32

Die Eigenschaften wurden an fehlerfreien Proben überprüft.

Die Tabelle lässt zum einen erkennen, dass die Ergebnisse nicht eindeutig sind. Zum anderen lassen sich Tendenzen erkennen. Die Festigkeiten (Druck, Biegung, Zug und Schub) und der E-Modul verändern sich nicht oder kaum mit dem Alter. Die Ergebnisse für die Schallgeschwindigkeit sind nicht eindeutig. Eindeutig ist dagegen, dass die Zähigkeit abnimmt und die Neigung zu kurzfasrigen Sprödbrüchen mit zunehmendem Alter steigt.

	Autoren	Holzart	Alter [Jahren]	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit	Schubfestigkeit	E-Modul	Schallgeschw.	Zähigkeit	Härte
Nadelholz	Horie (2002)	<i>Picea jezoensis</i> <i>Abies sachalinensis</i>	30 – 80	≈				≈			
	Rug und Seemann (1989)	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i>	40 - 400	≈	≈						
	Nier (1994)	<i>Picea abies</i> <i>Abies alba</i> <i>Pinus sylvestris</i>	46-306	≈	≈				↓		
	Attar-Hassan (1976)	<i>Pinus strobus</i>	140	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
	Froidevaux et al. (2012b)	<i>Picea abies</i>	200-500			↓					
	Görlacher (1999)	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i>	100-500	≈	≈		≈				
	Ando et al. (2006)	<i>Pinus densiflora</i>	270				≈				
	Noguchi et al. (2011)	<i>Pinus densiflora</i>	300					↑	↑		
	Schulz et al. (1984)	<i>Picea abies</i>	300	↑	↑	↑				↓	
	Erhardt et al. (1996)	<i>Pinus sylvestris</i>	300-400					≈			
	Kawai et al. (2008)	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	500-1600					↑			
	Deppe and Ruhl (1993)	<i>Pinus sylvestris</i>	600		≈						
	Yokoyama et al. (2009)	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	Bis 1600	≈ / ↓						↓	
	Lang (2004)	<i>Picea abies</i> <i>Pinus sylvestris</i>	?		≈			↓		↓	
	Baron (2009)	<i>Abies alba</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Larix decidua</i>	?	≈					≈	≈	
Laubholz	Rug and Seemann (1989)	<i>Quercus sp.</i>	70		≈						
	Kohärier and Okamoto (1955)	<i>Zelkova serrata</i>	240-650	↓	↓		↓	↓		↓	↓
	Narayanamurti et al. (1961)	<i>Pterocarpus</i>	500	↓	≈			↓			
	Narayanamurti et al. (1958)	<i>Tectona grandis</i>	1500		↑						

Tabelle 2: Zusammenfassung der Änderungen von mechanischen Eigenschaften durch Alterung. Aus: Kránitz (2014), S. 40

Mechanische Vorbeanspruchung hat lediglich bei extrem hohen Belastungen einen festigkeitsmindernden Einfluss auf Holz⁴³. Im Durchschnitt liegen Konstruktionshölzer deutlich unter der zulässigen Spannung, wodurch dieser Einfluss vernachlässigt werden darf. Die Relaxation⁴⁴ bzw. Kriechverformungen haben bei den Hölzern dagegen einen größeren Einfluss. Abbildung 12 zeigt Aufnahmen von geschädigten Microstrukturen im Holz unter dem Rasterelektronenmikroskop. Dabei gilt, dass die Schädigungen im Regelfall auf kleine Teilbereiche begrenzt sind.

Bei nicht fehlerfreien Bauteilen ist zu beachten, dass diese häufig in ihrer Nutzdauer von verschiedenen Einflüssen in ihrer Tragfähigkeit geschwächt werden. Einflüsse sind: tierische Schädlinge, Pilze, Vorschädigung durch Überlastung oder auch Querschnittsschwächungen.

2.2.4 Physik des Holzes

Holz besitzt durch seine gerichteten Fasern ein anisotropes⁴⁵ Baustoffverhalten. Das bedeutet, dass die Eigenschaften in Abhängigkeit der betrachteten Richtung zur Faserrichtung (axial, radial oder tangential) unterschiedlich sind. Zusätzlich ist Holz ein inhomogener⁴⁶ Werkstoff, dessen Eigenschaften nicht gleichmäßig über das Bauteil verteilt sind.

Stellvertretend sind im Folgenden einige Eigenschaften genannt, die der Anisotropie unterliegen.

Physikalische Eigenschaften				
Hygroskopische Eigenschaften	Festigkeits-/Elastizitätseigenschaften	Akustische Eigenschaften	Thermische Eigenschaften	Elektrische Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> - Quellen und Schwinden - Diffusion und Trocknung - kapillare Wasseraufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug-, Druck-, Biege-, Scherfestigkeit - E-Modul und Querdehnung - Schubmodul 	<ul style="list-style-type: none"> - Schalleitfähigkeit und Schallgeschwindigkeit - Schalldämpfung und Schalldämmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeleitfähigkeit - Wärmedehnung - Brandverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrischer Widerstand - Elektrische Leitfähigkeit

Tabelle 3: Beispiele zur Anisotropie von Holz; von Niemz (1993) und Wagenführ (2007) zitiert in Baron (2009), S. 22

⁴³ Niemz und Sonderegger (2017), S. 260

⁴⁴ Relaxation = zeitlich verzögerte Verformung aufgrund einer äußeren Einwirkung; aus Lohmann (2010), S. 990

⁴⁵ Anisotropie = „Abhängigkeit der Eigenschaften eines Materials von der Richtung“; aus Lohmann (2010), S. 44

⁴⁶ Inhomogenität = „ungleichmäßige Verteilung der Eigenschaften innerhalb eines Stammes“ bzw. Querschnittes; aus Lohmann (2010), S. 636

2.2.4.1 Feuchtigkeitsverhalten

2.2.4.1.1 Allgemeines

Holz ist ein kapillarporöser⁴⁷ Werkstoff. Es besteht je nach Rohdichte im Durchschnitt zu 50 bis 60 % aus Poren. Diese Hohlräume können sich mit Wasser füllen. Entweder wird Wasser aus der Luft absorbiert oder über kapillare⁴⁸ Transportwege angezogen. Holz ist also ein hygroskopischer⁴⁹ Stoff, der durch Aufnahme oder Abgabe von Wasser die Einstellung eines Gleichgewichtes mit seiner Umgebung anstrebt.

Für die eingelagerte Feuchtigkeit werden drei Grenzzustände unterschieden⁵⁰:

- Darrtrocken: Es ist kein Wasser mehr im Holz vorhanden, die Holzfeuchte beträgt 0%.
- Fasersättigung (Fasersättigungsbereich): Das gesamte Microsystem (alle Hohlräume in den Zellwänden) sind mit Wasser gefüllt, die Holzfeuchte beträgt zwischen 22 und 35 %.
- Wassersättigung: Das Micro- und das Makrosystem sind maximal mit Wasser gefüllt. Die Holzfeuchte beträgt je nach Dichte zwischen 770 % (Balsa) und 31 % (Pockholz).

Für den Feuchtegehalt gilt die Formel:

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_0}{m_0} * 100$$

Gl. 1

ω Feuchtegehalt [%]

m_{ω} Masse des feuchten Holzes [kg]

m_0 Masse des darrtrockenen Holzes [kg]

Man spricht bei den Wasseranteilen von dem:

- freien Wasser (Anteil des Wassers oberhalb des Fasersättigungsbereiches)
- gebundenen Wasser (Anteil des Wassers unterhalb des Fasersättigungsbereiches).

Die Wasseraufnahme durch Sorption kann in drei Teile gegliedert werden:

- Chemisorption: Holzfeuchte $\omega = 0$ bis 6 %;
bei einer relativen Luftfeuchte⁵¹ < 20 %
- Adsorption: Holzfeuchte $\omega = 6$ bis 15 %;
bei einer relativen Luftfeuchte < 60 %
- Kapillarkondensation: Holzfeuchte $\omega > 15$ % bis Fasersättigungsbereich;
Bei einer relativen Luftfeuchte 60 bis 100 %.

Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % wird der Fasersättigungsbereich erreicht. Dieser ist abhängig von der Holzart. Er sinkt mit der Rohdichte und Erhöhung der Temperatur.

In Tabelle 4 ist der Fasersättigungsbereich einiger einheimischer Holzarten aufgezählt.

⁴⁷ Niemz und Sonderegger (2017), S. 69 und S. 85

⁴⁸ Kapillarität = Wassertransport durch langgestreckte Zellen mit kleinem Innendurchmesser über die Adhäsionskräfte. Besitzt für Holz mit seinem weit verzweigtem Kapillarsystem große Bedeutung für den Feuchtetransport. Aus Lohmann (2010), S. 658

⁴⁹ Hygroskopizität = Eigenschaft „Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen und Sorptiv zu binden“; aus Lohmann (2010), S. 630

⁵⁰ Niemz und Sonderegger (2017), S. 69

⁵¹ relative Luftfeuchte = „gibt an, wie viel Prozent der maximal möglichen Wasserdampfmenge momentan in der Luft vorhanden ist. Die maximal mögliche Aufnahme ist temperaturabhängig. Die Angabe der relativen Luftfeuchte bezieht sich immer auf eine Temperatur. Aus Lohmann (2010), S. 231

Fasersättigungs- bereich	Holzart
32 bis 35 %	Zerstreutporige Laubhölzer ohne Farbkern (Linde, Weide, Pappel, Erle, Buche, Birke, Hainbuche); Splint von verkernten, ring- und halbringporigen Laubhölzern
30 bis 34 %	Nadelhölzer ohne Farbkern (Tanne, Fichte); Splint von Farbkernhölzern (Kiefer, Lärche)
26 bis 28 %	Nadelhölzer mit Farbkern und mäßigem Harzgehalt (Kiefer, Lärche, Douglasie)
22 bis 24 %	Nadelhölzer mit Farbkern und hohem Harzgehalt (Weymouthskiefer, Arve, Eibe, sehr harzreiche Kiefer und Lärche)
22 bis 24 %	Ring- und halbringporige Laubhölzer mit meist ausgeprägtem Farbkern (Robinie, Edelkastanie, Eiche, Esche, Nussbaum, Kirschbaum)

Tabelle 4: Feuchtegehalt verschiedener einheimischer Holzarten im Fasersättigungsbereich; von Trendelenburg & Mayer-Wegelin (1955) zitiert in (Niemz und Sonderegger 2017), S. 89

Da die Feuchte von Holz im Gleichgewicht mit seiner Umgebung steht, gibt Tabelle 5 die Ausgleichsfeuchten im Holz für verschiedene Bauzustände nach dem nationalen Anhang des Eurocode 5⁵² wieder. Darin werden Nutzungsklassen in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte definiert.

Nutzungsklasse	1	2	3
Gleichgewichtsfeuchte	(5 bis 15) % ^a	(10 bis 20) % ^b	(12 bis 24) % ^c

^a In den meisten Nadelhölzern wird in der Nutzungsklasse 1 eine mittlere Gleichgewichtsfeuchte von 12 % nicht überschritten.

^b In den meisten Nadelhölzern wird in der Nutzungsklasse 2 eine mittlere Gleichgewichtsfeuchte von 20 % nicht überschritten.

^c Die Nutzungsklasse 3 schließt auch Bauwerke ein, in denen sich höhere Gleichgewichtsfeuchten einstellen können.

Tabelle 5: Gleichgewichtsfeuchten von Holz, aus DIN EN 1995-1-1-NA:2013-08, S. 20, Tabelle NA.6

2.2.4.1.2 Bestimmung der Feuchte

Um die Holzfeuchte bestimmen zu können gibt es wiederum mehrere Verfahren. Bei der Darrmethode wird eine Probe bestimmter Größe bei 103 °C getrocknet. Dabei wird die Probe vor und nach dem Trocknen gewogen. Die Massedifferenz entspricht der enthaltenen Feuchtigkeit. Für in situ Prüfungen ist dieses Verfahren kaum geeignet, da bei der Probenahme das Bauteil empfindlich gestört wird.

Für Messungen vor Ort werden Holzfeuchtemessgeräte verwendet, die den elektrischen Widerstand zwischen zwei eingeschlagenen Elektroden messen. Über den elektrischen Widerstand lässt sich enthaltene Feuchtigkeit berechnen. Die Einflussgrößen auf den Widerstand zusätzlich zur Feuchte sind dabei die Temperatur, Holzart/Dichte und die Schnitttrichtung. Abbildung 13 gibt den elektrischen Widerstand in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes für verschiedene Hölzer und Holzwerkstoffe an. Die Elektroden können je nach Gerät bis zu mehreren Zentimetern ins Holz gerammt werden, was den Vorteil mit sich bringt, die Feuchteverteilung im inneren Bereich zu messen.

⁵² DIN EN 1995-1-1/NA:2013

2.2.4.1.3 Quell- und Schwindverhalten

Durch die Feuchtigkeitsaufnahme quillt und schwindet Holz bei Feuchtigkeiten unterhalb des Fasersättigungsbereiches. Dabei ist auch das Quell- bzw. Schwindmaß der Anisotropie unterworfen. Abbildung 14 zeigt exemplarisch das Quell- und Schwindverhalten von verschiedenen Hölzern. Dabei ist klar zu erkennen, dass die Schwindmaße längs α_l ; radial α_r , tangential α_t und des Volumens α_v unterschiedlich sind. In Tabelle 6 werden die Quell- und Schwindmaße des nationalen Anhangs des Eurocode 5⁵³ mit denen aus der Literatur verglichen. Die Längsschwindmaße sind jeweils vernachlässigbar, wobei bei Eiche der Unterschied zwischen den Literatur- und Normwerten bereits 80 % beträgt. Interessanter wird der Vergleich in Radial- und Tangentialrichtung. Im Eurocode 5⁵⁴ wird hier nicht zwischen den Richtungen unterschieden, sondern nur von Quellen und Schwinden rechtwinklig zur Faser gesprochen. Im Eurocode 5 wird im Allgemeinen nicht zwischen radial und tangential unterschieden, da im Neubau bei der Berechnung noch nicht klar ist, wie die Orientierung des Bauteils ist. Die Werte der Bemessungsnorm entsprechen bei Nadelholz in etwa dem Mittelwert aus Radial- und Tangentialquellung nach Halász & Scheer⁵⁵. Bei Eiche allerdings entspricht der Wert in etwa dem oberen tangentialen Schwindmaß. In der Vorgängernorm der DIN 1052:2008⁵⁶ wurden für die einheimischen Bauhölzer (Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Douglasie, Eiche) dasselbe Schwindmaß rechtwinklig zur Faser von $0,24 \frac{\%}{\%}$ angegeben. Warum für den Eurocode 5 der Wert bei Eiche erhöht wurde, wird nicht erklärt.

Richtung	Fichte/ Kiefer		Eiche	
	Mittelwerte der Quellung [%] bei Änderung der Holzfeuchte um 1 %			
	Halász & Scheer ⁵⁷	Eurocode 5 ⁵⁸	Halász & Scheer	Eurocode 5
längs	0,014	0,01	0,018	0,01
radial	0,19	0,25	0,18	0,35
tangential	0,36	0,25	0,34	0,35

Tabelle 6: Quell- und Schwindmaße

2.2.4.2 Dichte

2.2.4.2.1 Allgemeines

Die Holzdichte steht mit vielen anderen Holzeigenschaften in Verbindung und eignet sich somit als wichtiger Anzeiger dieser Eigenschaften. Dabei werden verschiedene Dichten unterschieden. Für Holz sind drei interessant, die Rohdichte ρ_w , die Darrdichte ρ_0 und die Reindichte ρ_r .

Die Dichte beschreibt das Verhältnis von Masse zu Volumen. Es gilt:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Gl. 2

ρ Dichte [kg/m^3]
 m Masse [kg]
 V Volumen [m^3]

⁵³ DIN EN 1995-1-1

⁵⁴ DIN EN 1995-1-1:2010-12

⁵⁵ Halász & Scheer (1996) zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 101

⁵⁶ DIN 1052:2008-12

⁵⁷ Halász & Scheer (1996) zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 101

⁵⁸ DIN EN 1995-1-1 NA, Tabelle NA.7

Die am häufigsten verwendete Dichte ist die Rohdichte. Bei ihr wird die Masse des Holzes einschließlich des in den Poren enthaltenen Wassers durch das äußere Volumen des Holzes einschließlich Poren geteilt. Da die im Holz enthaltene Feuchte Schwankungen unterliegt und unterhalb des Fasersättigungsbereiches sich auch das Volumen ändert, wird die Rohdichte bei wissenschaftlichen Untersuchungen in Abhängigkeit des definierten Klimas angegeben. Die Rohdichte im Normalklima (20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte) heißt Normalroh-dichte. Meist wird die Rohdichte bei 12 % Feuchte angegeben, was der Ausgleichsfeuchte im beheizten Innenraum entspricht. Die Abhängigkeit der Rohdichte vom Feuchtegehalt beschreibt Ab-bildung 15.

Die Darrdichte ρ_0 ist der Quotient der Masse und dem Volumen des darrgetrockenen⁵⁹ Holzes. Da die Darrdichte unabhängig vom hygroskopischen Verhalten ist, kann sie als Materialkon-stante angesehen werden. Um von der Rohdichte ρ_w in die Darrdichte ρ_0 umrechnen zu kön-nen, muss sowohl das Quell- bzw. Schwindmaß wie auch der Feuchtegehalt der Rohdichte be-rücksichtigt werden.

Bei der Reindichte wird die Masse des darrgetrocknen Holzes durch das Volumen der Zellwand ohne Poren geteilt. Sie ist für alle Hölzer fast gleich beträgt im Mittel 1500 kg/m³⁶⁰. Die Reinwichte ist abhängig vom Anteil der Zellulose (1580 kg/m³) und des Lignins (1380 kg/m³ bis 1460 kg/m³). Abbildung 16 gibt die Häufigkeitskurven für die Rohdichte deutscher Holz-arten an.

2.2.4.2.2 Einflüsse auf die Dichte

Die Dichte ist abhängig von der Holzart, dem Standort und der Lage im Baum. Dabei ergeben sich noch weitere Faktoren. Ein Holz ist umso dichter, je größer:

- der Spätholzanteil ist (bei Laubholz breite Jahrringe, bei Nadelholz schmale Jahrringe).
Die Dichte des Spätholzes ist wesentlich höher als die des Frühholzes (Tabelle 7).
- die Anzahl und Größe der Äste ist
- der Anteil an Druck-, bzw. Zugholz ist.

	Darrwichte in [g/cm ³] von						
	Fichte (Schweden)	Tanne	Kiefer (Ostdeutsch)	Kiefer (Schweden)	Douglasie	Lärche (Deutsch)	Esche
Frühholz	0,340	0,277	0,333	0,300	0,282	0,360	0,569
Spätholz	0,650	0,625	0,824	0,900	0,837	1,040	0,753

Tabelle 7: Darrwichte von Früh- und Spätholz, aus Vorreiter (1949), S. 127, Tabelle 53

2.2.4.2.3 Dichteprofile

Jede Holzart besitzt ihr eigenes Dichteprofil. Sowohl die Häufigkeitsverteilung ist holzarten-spezifisch (Abbildung 16), als auch die Dichteverteilung über den Querschnitt (Abbildung 17) und dem Stamm (Abbildung 18). Die Dichte innerhalb eines Stammes nimmt mit zunehmen-der Baumhöhe ab. Bei langen Bauteilen kommt dieser Zusammenhang zum Tragen. Abbil-dung 18 zeigt die Dichteverteilung verschiedener Nadelhölzer über den Stamm. In den Gra-phen ist die Dichteabnahme mit der Höhe und der Dichtezunahme vom Mark nach außen zu erkennen. Bei Untersuchungen⁶¹ wurde festgestellt, dass die mittleren Biegefestigkeiten aus dem oberen Stammbereich (12 – 20 m) im Vergleich zum unteren (2 – 10 m) um 13 % bei

⁵⁹ Darrtrocken = Zustand des Holzes bei Trocknung bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz;
aus Lohmann (2010), S. 377

⁶⁰ Niemz und Sonderegger (2017), S. 141

⁶¹ Glos und Schulz (1986) zitiert in Baron (2009), S. 23

Fichte und 24 % bei der Kiefer gesunken waren. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der zum Zopf hin sinkenden Rohdichte.

2.2.4.2.4 Dichtebestimmung

Die Dichte kann über verschiedene Verfahren bestimmt werden. Als klassisches Verfahren ist die gravimetrische Dichtebestimmung nach DIN 52182⁶² zu nennen. Dabei werden kleine Prüfkörper, z.B. 20 mm x 20 mm x 30 mm ausgearbeitet, deren Gewicht über Wiegen und das Volumen abgemessen wird.

Nachdem es bei bestehenden Bauten wenig sinnvoll erscheint, an den interessanten, also den hochbelasteten Stellen, Proben auszusägen, gibt es weitere weitere Verfahren zur Probengewinnung. Bohrproben aus Hohlbohrern eignen sich ebenfalls zur Dichtebestimmung. Diese Methode bietet sich vor allem dann an, wenn sowieso Proben gezogen werden, z.B. für dendrochronologische Untersuchungen⁶³. Problematisch dabei ist allerdings, dass die Proben dann nicht aus den Bereichen gezogen werden, die aus statischer Sicht interessant sind. Zusätzlich ist bei beiden zerstörenden Verfahren die Probe nicht mehr ungestört. Beim Aussägen oder Bohren der Probe entsteht Reibungswärme, wodurch der Feuchtegehalt sinkt, was die Aussagekraft der Probe schmälert.

Als zerstörungsfreie bzw. -arme Verfahren bieten sich die Bohrwiderstandsmessung und die Eindringwiderstandsmessung an. Bei der Bohrwiderstandsmethode, die im Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben wird, wird die Rohdichte über die Leistungsaufnahme bzw. Drehmoment eines Bohrers bestimmt.

Bei der Eindringtieftiefenmessung wird ein Schlagstift mit einer definierten Kraft in das Holz getrieben. Die Eindringtiefe lässt Rückschlüsse auf die Dichte zu⁶⁴. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass nur die äußere Schicht gemessen wird. Zumindest für biegebeanspruchte Bauteile gilt, dass die äußeren Fasern auch die höher belasteten sind.

Beide zerstörungsarme Verfahren haben den Vorteil, dass die Prüfung der Rohdichte im Bereich der größten Beanspruchung eines Bauteiles stattfinden kann. Dabei ist dem Bohrwiderstandsverfahren eindeutig den Vorzug zu geben, da es einen Dichteverlauf über den gesamten Querschnitt zeigt.

2.2.4.2.5 Einfluss der Dichte auf andere Eigenschaften

Die Dichte ist als Indikator für andere Eigenschaften gut geeignet. Sie steht mit nahezu allen Eigenschaften in Zusammenhang. Niemz zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen verschiedenen Eigenschaften und der Rohdichte in Abbildung 19 an. Bei Betrachtung der schematischen Zusammenhänge zwischen der Rohdichte und der Festigkeit könnte man folgern, dass man von der Rohdichte direkt auf Festigkeiten schließen könne. Dies ist auch richtig, aber nur für fehlerfreie Proben. Fehler wie die beispielsweise die Ästigkeit, können dabei den festigkeitssteigernden Effekt höherer Rohdichte völlig überlagern.

2.2.4.3 Elastizitätsmodul

2.2.4.3.1 Allgemeines

Die Elastizität bezeichnet die Eigenschaft eines Körpers, durch Belastung hervorgerufene Formänderung, nach der Entlastung wieder zurückzuverformen. Bei großen Belastungen wird

⁶² DIN 52182:1976-09

⁶³ Dendrochronologie = „Verfahren zur Bestimmung des Fälldatums eines Baumes anhand der Jahrringe.“ Aus Lohmann (2010), S. 241

⁶⁴ Görlacher und Eckert (1999), S. 44

eine plastische (bleibende) Verformung hervorgerufen, wobei sich selbst bei großen Verformungen der elastische Anteil zurückverformt. Dabei gilt näherungsweise das Hook'sche Gesetz:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Gl. 3}$$

E Elastizitätsmodul $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
 σ Spannung $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
 ε Dehnung [%]

Da es sich bei Holz um einen anisotropen Werkstoff handelt werden mehrere Elastizitätsmodule unterschieden, E_T , E_R und E_L (Belastung tangential, radial, längs). Der Zusammenhang zwischen den Modulen zeigt Tabelle 8.

Eigenschaft	Nadelholz	Laubholz
$E_T : E_R : E_L$	1 : 1,7 : 20	1 : 1,7 : 13

Tabelle 8: Verhältnisse der E-Module in den Hauptachsen (nach Halász & Scheer (1986), aus Niemz und Sonderegger (2017), S. 275, Bild 13.1

Für die Bemessungspraxis spielen die unterschiedlichen E-Module in den Hauptachsen keine Rolle. Es wird nach DIN EN 338:2016-07⁶⁵ lediglich in der E-Modul in Faserrichtung und rechtwinklig dazu unterschieden. Bei genauerer Betrachtung kann der E-Modul in Abhängigkeit der Belastung ermittelt werden (Biege, Druck und Zug E-Modul). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungsarten sind dabei gering. Tabelle 9 gibt als Beispiel Werte der verschiedenen E-Module für Rotbuche an. In der Praxis wird in der Regel das Biege- E-Modul verwendet. Abbildung 20 zeigt Spannungs-Dehnungsdiagramme bei Druck und Zugbelastung. Abbildung 21 zeigt ein Spannungs-Dehnungsdiagramm für Biegung. Die Steigung des Graphen entspricht dabei dem Elastizitätsmodul. Die Gerade am Anfang wird als elastischer Bereich angesehen, in dem das Hook'sche Gesetz gilt.

Belastungsart	Schnitttrichtung		
	Längs (Faserrichtung)	Radial	Tangential
Zug	10 560	1510	730
Druck	11 060	1650	750
Biegung	11 000	-	-

Tabelle 9: Einfluss der Belastungsart auf den E-Modul in N/mm² bei Rotbuche (12 % Holzfeuchte), nach Osyhar T. (2013), zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 293

Die Bruchdehnung für Zugbelastung liegt in Faserrichtung und senkrecht dazu zwischen 0,7 % und 1 %. Bei Druckbelastung senkrecht zur Faser lässt sich das Holz oberhalb des elastischen Bereiches stark verdichten. Die Bruchdehnung auf Biegung ist aufgrund der geringeren Biegefestigkeit im Vergleich zur Zugfestigkeit niedriger. Nach den eigenen Biegeversuchen liegt die Bruchdehnung zwischen 0,4 % und 0,7 %.

⁶⁵ DIN EN 338:2016-07

Quelle	Holzart			
	Fichte / Tanne		Kiefer	
	E_{mittel} [N/mm ²]	v [%] (n)	E_{mittel} [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12 \%$)	11000	19,7 bzw. 13,6 (k.A.)	11000	21,3 (k.A.)
Ehlbeck und Görlacher (1998) (Biege-E-Modul, $\omega = 12 \%$, Bauteilabmessung)	7628	k.A. (13)	6974	k.A. (5)
Ehlbeck und Görlacher (1988) (Druck-E-Modul, $\omega = 12 \%$, Bauteilprüfung)	12000	k.A. (3)	k.A.	k.A.

Tabelle 10: Vergleich der Elastizitätsmodule von Neu- mit Altholz. Aus Baron (2009), S. 34

2.2.4.3.2 Einflüsse auf den Elastizitätsmodul

Das Elastizitätsmodul ist wie andere Holzeigenschaften von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig⁶⁶.

Die wesentlichen Einflüsse sind: Holzart, Rohdichte, Faser-Last-Winkel, Microfibrillenwinkel, Feuchtegehalt, Temperatur. Zudem spielt die Belastungsart, wie bereits angesprochen, eine geringfügige Rolle.

Feuchtegehalt	E-Modul [%]	Faser-Last-Winkel	E-Modul [%]	Temperatur	E-Modul [%]
0 %	100	0°	100	10 °C	90
5 %	95	2°	97...98	20 °C	100
10 %	85	6°	85...90	50 °C	85
20 %	75	10°	60...80	100 °C	60
≥ 30 %	70 (=konst)				

Tabelle 11: Einflussfaktoren auf den Elastizitätsmodul von Holz, aus: Langendorf, Schuster und Wagenführ (1990), zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 293

2.2.4.3.3 Dynamischer Elastizitätsmodul

Zusätzlich zum statischen E-Modul, der in der Regel aus einem Biegeversuch ermittelt wird, existiert noch der dynamische E-Modul. Dieser wird durch dynamische Verfahren wie Messung der Schall-Laufzeit oder der Eigenfrequenz erfolgen⁶⁷. Dabei liegen die Werte die mit der Durchschallung ermittelt werden, ca. 10 bis 20 % über dem statischen E-Modul⁶⁹.

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Balken gilt, dass die Breite und Dicke klein gegenüber der Wellenlänge sind. Das hat zur Folge, dass sich der Schall nur als Quasilongitudinalwelle⁶⁹ fortbewegt. Unter diesen Voraussetzungen gilt für das dynamische Elastizitätsmodul:

$$E_{\text{dym}} = \rho * v^2 * \frac{1}{1000}$$

Gl. 4

E_{dym} Dynamische Elastizitätsmodul $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

ρ Rohdichte $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

v longitudinale Schallgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

⁶⁶ Niemz und Sonderegger (2017), S. 292

⁶⁷ Niemz und Sonderegger (2017), S. 284

2.2.4.3.4 Korrelationen

Der E-Modul hat eine gute Korrelation mit den Biege- Zug- und Druckfestigkeiten. Dabei gilt, dass die Korrelation zwischen dem statisch ermitteltem höher ist, als bei der dynamischen Ermittlung. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) zwischen dem statischen Biege-E-Modul und den Biege-, Zug- und Druckfestigkeit liegt zwischen 40 bis 65 %⁶⁸. Für das dynamische E-Modul liegt das Bestimmtheitsmaß (R^2) zu den Festigkeiten zwischen 30 und 55 %⁶⁷. Das Bestimmtheitsmaß zwischen dem statischen und dynamischen E-Modul beträgt etwa 55 %⁶⁹

2.2.5 Festigkeit

Als Festigkeit wird die „Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes oder Bauteiles gegen Bruch“⁷⁰ verstanden. Dabei werden die verschiedenen Festigkeitsarten auf Druck, Zug, Biegung, Scheren und Torsion unterschieden. Aufgrund der Anisotropie des Holzes, werden Festigkeiten in drei Richtungen unterschieden: in Faserrichtung, radial und tangential.

2.2.5.1 Einflussfaktoren

Alle Festigkeiten sind in unterschiedlichem Maß von den gleichen Einflussfaktoren abhängig. Die Festigkeit wird im Allgemeinen höher bei:

- zunehmender Rohdichte
- abnehmender Temperatur
- abnehmender Feuchte
- abnehmenden Wuchsunregelmäßigkeiten, wie Ästigkeit und Faserabweichung
- jüngerem Holz
- geringerem Faser-Last-Winkel, dabei gilt: $\sigma_{\text{Längs}} \gg \sigma_{\text{Radial}} > \sigma_{\text{Tangential}}$

Abbildung 22 a) zeigt graphisch die Abhängigkeit der Festigkeit vom Faser-Last-Winkel. Mit zunehmender Rohdichte steigt sowohl das Elastizitätsmodul als auch die Festigkeit im Holz an. Mit steigender Rohdichte sinkt der Porenanteil und somit steigt der effektiv, tragende Querschnitt (Abbildung 22 b). Da die Rohdichte ebenfalls vom Spätholzanteil und damit auch der Jahrringbreite abhängt, gilt das Festigkeitsverhältnis dort analog. Abbildung 22 c) und d) zeigt die Abhängigkeit der Festigkeiten vom Spätholzanteil und den Jahrringbreiten.

Wuchsunregelmäßigkeiten wie Äste, Druckholz oder ähnliches setzen vor allem die Zugfestigkeit herab. Äste bewirken eine Änderung des Faserverlaufes in ihrer Umgebung. Bei Spannungsspitzen tritt der Bruch meist an diesen Bereichen ein. Abbildung 7 und 8 zeigt, dass mit zunehmender Ästigkeit die Zugfestigkeit wie auch Biegefestigkeit sinkt. Dabei gibt es aber eine hohe Streubreite der Messwerte.

Auf die Druckfestigkeit wirken sich Äste weniger stark aus. Aus diesem Grund sollten im Zugbereich eines Biegebalkens keine Äste vorhanden sein, sondern im Druckbereich.

Die Variationskoeffizienten bei der Festigkeit von Holz sind hoch. Aus diesem Grund werden Sicherheitsfaktoren für die statische Berechnung bei den Festigkeiten verwendet. Tabelle 12 gibt Variantenkoeffizienten für verschiedene Festigkeiten im Holz an. Abbildung 23 gibt die Häufigkeitsverteilung für Biege-, Druck- und Zugfestigkeit von Fichte an. Auffallend dabei ist, dass die Zugfestigkeit, die am empfindlichsten auf Wuchsfehler reagiert, auch die größte Streubreite hat.

⁶⁸ Linke, Rug und Pasternak (2017), S. 230

⁶⁹ Nier (1994), S. 93

⁷⁰ Lohmann (2010), S. 369

V [%]	Fehlerfreies Holz ¹	Visuell sortiertes Holz ¹	Fichte ²	Tanne ²	Kiefer ²	Lärche ²	Eiche ²
Zugfestigkeit	20	40	-	-	-	-	-
Biegefestigkeit	-	-	14,2	12,7	19,0	17,1	17,3
Druckfestigkeit	-	-	14,4	12,2	19,5	16,3	15,5
Elastizitätsmodul	-	-	19,7	13,6	21,3	22,5	19,4
Rohdichte	5...14	-	9,7	9,7	12,8	11,0	9,0

¹ Werte nach Niemz und Sonderegger (2017,) S. 344

² Werte nach DIN 68 364

Tabelle 12: Variationskoeffizienten V der Eigenschaften von Holz, aus Niemz und Sonderegger (2017), S. 344 und DIN 68 364

Abbildung 24 zeigt, dass sich mit zunehmender Holzfeuchte die Festigkeiten wie auch der Elastizitätsmodul bis zum Fasersättigungsbereich verringern und ab dort konstant bleiben. Die Zug- und Scherfestigkeit nimmt im Bereich zwischen 0 % und 10 % leicht zu und fällt ab da mit zunehmender Feuchte bis zur Fasersättigung ab⁷¹. Tabelle 13 gibt die Festigkeitsänderungen für den Holzfeuchtebereich von 8 % bis 20 % an. Oberhalb von 20 % ist, wie in Abbildung 24 zu erkennen, der Zusammenhang nicht mehr linear.

	Festigkeitsänderung je % Feuchteänderung
Druckfestigkeit in Faserrichtung	6 %
Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung	5 %
Biegefestigkeit	4 %
Zugfestigkeit parallel zur Faser	2,5 %
Zugfestigkeit senkrecht zur Faser	2 %
Schub	2,5 %

Tabelle 13: Festigkeitsänderung in % je % Feuchteänderung, aus Hoffmeyer, zitiert in Niemz und Sonderegger (2017), S. 346

Mit einer Erhöhung der Temperatur wird die Festigkeit wie auch der E-Modul herabgesetzt. Für Nadelholz in Bauabmessungen wird nach Glos⁷² ab + 20 °C (Holzfeuchte 10 – 15 %) je 10 °C Temperaturänderung die Biege- um 5 %, Druck- um 5 % und Zugfestigkeit um 1 % verringert.

Die Alterung als solche ändert die Eigenschaften von Holz nur geringfügig⁷². Erst durch das hinzukommen von Schädigungen mit dem Alter wird die Festigkeit reduziert. Pilz- und Insektenbefall reduziert mitunter Festigkeiten deutlich. Bei Insektenbefall ist die Reduzierung der Festigkeit von der Lochdichte und der Lage der Löcher (Zug, Druckzone oder neutrale Faser) abhängig. Abbildung 25 gibt die Reduzierung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Lochdichte an.

⁷¹ Niemz und Sonderegger (2017), S. 346

⁷² Niemz und Sonderegger (2017, S. 349

Bläuepilze wirken sich nicht auf die Festigkeiten aus.

Pilze wie Braunfäule, Weißfäule und Moderfäule, die zu den holzerstörenden Pilzen gerechnet werden, bewirken einen Masseverlust, der einhergeht mit einem deutlichen Festigkeitsverlust. Zusätzlich ändert sich das Bruchbild:

- Bei Braunfäule erhöht sich durch Abbau von Polysacchariden der relative Ligninanteil. Es entsteht ein Würfelbruch.
- Bei Weißfäule erhöht sich durch Abbau von Polysacchariden und Lignin der relative Celluloseanteil. Der Bruch ist dabei kurzfasrig.
- Bei Moderfäule reduziert sich durch Abbau von Polysacchariden in der Zellwand nur geringfügig die Masse, aber die Schlagzähigkeit geht zurück.

In Abbildung 26 wird der Masseverlust durch Weiß- und Braunfäule mit dem jeweiligen Biegefestigkeitsverlust zusammengebracht.

Tabelle 14 gibt die durchschnittliche Festigkeit von fehlerfreien Proben nach DIN 68364⁷³ an. Man erkennt, dass die Zugfestigkeit in etwa doppelt so groß ist wie die Druckfestigkeit. Die Biegefestigkeit liegt dazwischen.

Holzart	Rohdichte [g/cm ³]	E - modul [N/mm ²]	Festigkeiten [N/mm ²]					
			Zug*		Biegung	Druck*		Scher
				⊥			⊥	
Fichte <i>Picea abies</i>	0,46	11 000	95	2,7	80	45	5,8	10
Kiefer <i>Pinus sylvestris</i>	0,52	11 000	100	3,0	85	47	7,7	10
Tanne <i>Abies alba, Abies spp.</i>	0,46	11 000	95	-	80	45	-	10
Lärche <i>Larix decidua, Larix spp.</i>	0,60	13 800	107	-	99	55	-	10
Eiche <i>Quercus petraea</i>	0,71	13 000	110	4	95	52	11	11,5

* Zug- und Druckfestigkeit aus Niemz und Sonderegger (2017), S. 381, alle weiteren Werte aus DIN 68364:2003-05

Tabelle 14: Kennwerte von ausgewählten Bauhölzern nach DIN 68364 und Niemz und Sonderegger (2017), S.

⁷³ DIN 68364:2003-05

2.2.5.2 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit wird in Faserrichtung und senkrecht dazu unterschieden. Die Zugfestigkeit senkrecht beträgt in etwa 3 % bis 4 % der Längszugfestigkeit. Sie spielt im historischen Bauwesen aber eine untergeordnete Rolle. Abbildung 27 zeigt typische Bruchbilder für Zugbrüche in und senkrecht zur Faserrichtung. Die Zugfestigkeit berechnet sich mit folgender Formel:

$$\sigma_{t,max} = \frac{F}{A_{netto}} \quad \text{Gl. 5}$$

f_t Zugfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

F Bruchkraft [N]

A_{netto} Querschnittsfläche abzüglich aller Löcher und Fehlstellen [mm^2]

In älterer Literatur wird zusätzlich zur Zugfestigkeit häufig die Reißlänge angegeben. Dabei handelt es sich um die theoretische Länge, bei der das Material allein durch das Eigengewicht reißen würde.

$$L_R = \frac{\sigma_{t,max}}{\rho * g} \quad \text{Gl. 6}$$

L_R Reißlänge [km]

f_t Zugfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

ρ Rohdichte $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$

g Erdbeschleunigung $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

Äste und Risse wirken sich stark auf die Zugfestigkeit aus. Asthaltiges Holz hat nur eine Zugfestigkeit von 15 % bis 20 % der Zugfestigkeit von astfreiem Holz. Aus diesem Grund ist für Bauholz in der DIN EN 384:2016⁷⁴ die Zugfestigkeit stärker reduziert als die anderen Festigkeiten. Die ansetzbare Zugfestigkeit ist dabei sogar geringer als die Druckfestigkeit. Abbildung 23 zeigt, dass die Zugfestigkeit eine wesentlich größere Streuung als die Druckfestigkeit besitzt.

2.2.5.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist der Widerstand gegen Bruch bei Druckbeanspruchung. Dabei werden wie bei der Zugbeanspruchung die Richtungen in Faserrichtung und senkrecht dazu unterschieden. Die Druckfestigkeit berechnet sich aus folgender Formel:

$$f_c = \frac{F}{A_{netto}} \quad \text{Gl. 7}$$

f_c Druckfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

F Bruchkraft [N]

A_{netto} Querschnittsfläche abzüglich aller Löcher und Fehlstellen [mm^2]

⁷⁴ DIN EN 384:2016-12

Da bei Druck senkrecht zur Faser das Holz verdichtet wird und größere Verformungen ohne Bruch aufweist, wird hier die Quetschgrenze als Grenzwert definiert.

Typische Bruchbilder für Druckbelastung finden sich in Abbildung 28.

Der Bruch auf mikroskopischer Ebene findet sich in Abbildung 29. Äste wirken sich bei Druck zwar weniger stark als bei Zug aus, dennoch ist deren Einfluss nicht zu vernachlässigen. Abbildung 30 zeigt die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Holzfeuchte und der Darrwichte für Fichte und Tanne, Abbildung 31 für Weißkiefer an. Abbildung 32 zeigt die Abhängigkeit der Druckfestigkeit bei einer Holzfeuchte von 15 % von der Darrwichte für Laub und Nadelhölzer. Das Bestimmtheitsmaß zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit liegt nach Baron bei fehlerfreien Proben bei etwa $R^2 = 60 \%$ für Nadelhölzer⁷⁵. Dieser Zusammenhang bleibt sogar bei pilzgeschädigtem Holz gleich, wobei die Variantenkoeffizienten ansteigen⁷⁵. Erst bei einem starken Rohdichteverlust viel die Druckfestigkeit überproportional ab. Bei einer Rohdichte von 76 % des Ausgangsmaterials wurden lediglich Druckfestigkeiten von 50 % festgestellt⁷⁵. Die nachfolgenden Gleichungen stammen von Vorreiter⁷⁶ und geben jeweils die Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Feuchte und der Dichte an.

Fichte:

Baden	$\sigma_c = 10 * \rho_{15} - 0,5$	($\omega = 15 \%$)
Bayern	$\sigma_c = 10 * \rho_{15} - 1$	($\omega = 15 \%$)
Pommern	$\sigma_c = 13 * \rho_{12} - 1,3$	($\omega = 12 \%$)
Württemberg	$\sigma_c = 8 * \rho_{15}$	($\omega = 15 \%$)

Kiefer:

Baden	$\sigma_c = 8,9 * \rho_{15} - 0,30$	($\omega = 15 \%$)
Pommern	$\sigma_c = 9 * \rho_{15}$	($\omega = 15 \%$)
Württemberg	$\sigma_c = 7,7 * \rho_{15}$	($\omega = 15 \%$)

Eiche: (Stieleiche S, Traubeneiche T)

(S) Deutschland (Baden)	$\sigma_{cc} = 15,8 * \rho_{15} - 6,2$	($\omega = 15 \%$)
(S) Kroatien	$\sigma_c = 12,8 * \rho_{15} - 2,75$	($\omega = 15 \%$)
(T) Kroatien	$\sigma_c = 6,25 * \rho_{15} + 1,43$	($\omega = 15 \%$)

ρ_ω	Rohdichte mit Feuchtigkeit ω $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$
σ_c	Druckfestigkeit fehlerfreier Proben $\left[\frac{kN}{cm^2} \right]$

⁷⁵ Baron (2009), S. 117

⁷⁶ Vorreiter (1949), S. 254

Bei Druck in Faserrichtung kann bei schlanken Körpern Knicken auftreten. Bei Knicken handelt es sich dabei um das „plötzliche seitliche Ausweichen“⁷⁷ bei einer Druckkraft in Faserrichtung. Nach DIN EN 1995-1-1 wird die Druckfestigkeit mit dem Knickbeiwert (k_c) abgemindert. Der Knickbeiwert steigt mit zunehmender Schlankheit.

$$f_{c,0} = \frac{F}{A_{\text{netto}}} * \frac{1}{k_c} \quad \text{Gl. 8}$$

- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit, 0° zur Faser $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
 F Druckkraft [N]
 k_c Knickbeiwert in Abhängigkeit von λ
 λ Schlankheit $\lambda = l_{ef} * \frac{\sqrt{12}}{h}$ (gilt für Rechteckquerschnitte)
 l_{ef} Knicklänge [mm]
 h Querschnittsmaß in der Knickrichtung [mm]

Tabelle 15 stellt einige Werte der Druckfestigkeit in Faserrichtung von Neu- und Altholz gegenüber.

Quelle	Holzart			
	Fichte / Tanne		Kiefer	
	$f_{c,\text{mittel}}$ [N/mm ²]	v [%] (n)	$f_{c,\text{mittel}}$ [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12 \%$)	45,0	14,4 bzw. 12,2 (k.A.)	47,0	19,5 (k.A.)
EC 5 (C24)	21,0	k.A.	21,0	k.A.
Walthelm (1988) (Holzalter 100 Jahre, ω ohne Angabe, Prismen 5x5x10, 2x2x4 [cm], nach Fotos Nadelholz, Annahme FI/TA)	49,8	k.A. (10)	k.A.	k.A.
Ehlbeck und Görlacher (1993) (Holzalter 100 – 500 Jahre, $\omega = 12 \%$)	42,5	14,2 (191)	39,9	16,9 (122)
Ehlbeck und Görlacher (1988) ($\omega = 12 \%$, Bauteilprüfung)	35,6	k.A. (3)	k.A.	k.A.

Tabelle 15: Vergleich der Druckfestigkeiten in Faserrichtung von Neu- und Altholz, Aus (Baron 2009), S. 31

2.2.5.2.2 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit ist der Widerstand gegen Bruch durch Biegebeanspruchung. Häufig wird sie als Materialkennwert verwendet. Die Biegefestigkeit berechnet sich aus folgender Formel:

$$f_m = \frac{M}{W} \quad \text{Gl. 9}$$

- f_m Biegefestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
 M Biegemoment [Nmm]
 W Widerstandsmoment [mm³] für einen rechteckigen Querschnitt gilt $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$

⁷⁷ Lohmann (2010), S. 696

Typische Bruchbilder bei Biegebelastungen zeigt Abbildung 33.

Die Biegezug- und Biegedruckspannungen sind während der Biegebelastung nur unterhalb der Proportionalitätsgrenze gleich groß. Darüber verschiebt sich die Spannungsnulllinie in Richtung der Zugzone. Bei fehlerfreiem Holz liegt die Biegespannung deshalb zwischen der Zug- und Druckfestigkeit. Sind Fehlstellen wie Äste in der Zugzone, kommt es dort zum vorzeitigen Bruch. Abbildung 34 zeigt die Spannungsverteilung über den Holzquerschnitt. Rechnerisch wird die Verschiebung der Nulllinie nicht berücksichtigt.

Tabelle 16 stellt die Biegefestigkeit von neuem und altem Holz gegenüber.

Quelle	Holzart			
	Fichte / Tanne		Kiefer	
	$f_{M,mittel}$ [N/mm ²]	v [%] (n)	$f_{M,mittel}$ [N/mm ²]	v [%] (n)
DIN 68364 (Neuholz, $\omega = 12\%$)	80	14,2 bzw. 12,7 (k.A.)	85	19,0 (k.A.)
EC 5 (C24)	24	k.A.	24	k.A.
Walther (1988) (Holzalter 100 Jahre, ω ohne Angabe, Prismen 2x2x36 [cm], nach Fotos Nadelholz, Annahme FI/TA)	75,4	k.A. (6)	k.A.	k.A.
Ehlbeck und Görlacher (1993) (Holzalter 100 – 500 Jahre, $\omega = 12\%$ Prismen 4x4x8 cm)	73,1	k.A. (54)	66,8	k.A. (14)
Ehlbeck und Görlacher (1988) ($\omega = 12\%$, Prismen)	84	k.A. (28)	73,8	k.A. (12)
Ehlbeck und Görlacher (1993) (Holzalter 100 – 500 Jahre, $\omega = 12\%$ Bauteilprüfung)	30,2	k.A. (25)	22,5	k.A. (12)
Nier (1994) (Holzalter 46 – 306, Bauteilprüfung, Berücksichtigung nur ungeschädigter Hölzer)	36,5	k.A. (26)	41,0	k.A. (4)
Ehlbeck und Görlacher (1988) ($\omega = 12\%$, Bauteilprüfung)	29,0	k.A. (13)	23,8	k.A. (5)

Tabelle 16: Vergleich der Biegefestigkeiten von Neu- und Altholz, Nach Baron (2009), S. 33

2.2.5.3 Scherfestigkeit

„Die Scherfestigkeit ist der Widerstand, den ein Körper der Verschiebung zweier aneinander liegender Flächen entgegensetzt“⁷⁸. Die Scherfestigkeit berechnet sich dabei aus folgender Formel:

$$f_v = \frac{F}{A} \quad \text{Gl. 10}$$

f_v Scherfestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$
 F Bruchkraft [N]
 A_{netto} Netto Scherfläche [mm²]

Die Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung ist größer als senkrecht dazu. Das Verhältnis $\tau_{\parallel}/\tau_{\perp}$ liegt zwischen 1,2 bis 1,6⁷⁹. Für die Praxis wird mit dem Mittelwert aus beiden Richtungen gerechnet.

⁷⁸ Niemz und Sonderegger (2017), S. 388

⁷⁹ Vorreiter (1949), S. 288

2.2.5.3.1 Normprüfkörper zu Bauteil

Die am Normprüfkörper ermittelte Festigkeit ist immer wesentlich größer als die am Bauteil messbare Festigkeit. Das mit steigender Bauteillänge und Querschnittsabmessungen die Festigkeit sinkt, nennt man Volumeneffekt⁸⁰.

Für Biegeversuche hat Nier⁸¹ die Festigkeiten aus Bauteilversuchen mit denen der fehlerfreien Normprüfkörper verglichen (Abbildung 35). Er kommt dabei auf einen Abstand der Mittelwerte von 2,15 und der 5 % Quantile von 2,56. Die Verschiebung hängt mit den Wuchsunregelmäßigkeiten in den Bauteilen zusammen. Es kann nicht direkt von der Normfestigkeit auf die Bauteilfestigkeit geschlossen werden. Für Biegung hat Nier⁸² ein Bestimmtheitsmaß von 19,06 % errechnet. Abbildung 36 zeigt das Streudiagramm der Biegefestigkeiten von Normprüfkörpern zu denen von Bauteilen.

2.2.5.4 Rheologische Eigenschaften

Die Rheologie ist die „Fließlehre“⁸². Sie umfasst das Verformungs- und Fließverhalten von Stoffen. Bei Holz sind alle elastischen Eigenschaften wie der E-Modul und auch die Festigkeiten zeitabhängig. Abbildung 37 gibt schematisch die rheologischen Eigenschaften von Holz an. Kriechen bezeichnet dabei „die trotz gleichbleibender Belastung im Laufe der Belastungszeit erfolgte Zunahme der Verformung“⁸³. Die Relaxation bezeichnet den Abbau von Spannungen bei gleichbleibender Verformung. „Die Dauerstandsfestigkeit ist die Spannung, die ein Werkstoff bei unendlich langer Belastung gerade noch aushält ohne zu brechen.“⁸⁴ Sie entspricht etwa 60 % der Kurzzeitfestigkeit. Abbildung 38 zeigt das Verhältnis der Zeitstandsfestigkeit zur Kurzzeitfestigkeit, dabei ist die Zeit logarithmisch angetragen.

2.2.6 Schädlinge im Holz

Tierische Schädlinge wie auch Pilze können bestehenden Konstruktionen empfindlichen Schaden zufügen. Um die Gefährdung und damit auch Beurteilung der noch vorhandenen Resttragfähigkeit vornehmen zu können, werden nachfolgend die häufigsten Gefährder beleuchtet.

2.2.6.1 Tierische Schädlinge

Für historische Bauten interessant sind Trockenholz- und Faulholzinsekten. Trockenholzinsekten leben in getrocknetem Holz, während „...Faulholzinsekten auf von Pilzen vorgeschädigte(m) Material spezialisiert...“⁸⁵ sind. Bei den Trockenholzinsekten sind der Hausbockkäfer, gewöhnlicher Nagekäfer und der Splintholzkäfer zu nennen. Als Vertreter der Faulholzinsekten sind der Trotzkopf, Gescheckter Nagekäfer und der Rothalsbock zu sehen.

2.2.6.1.1 Trockenholzinsekten

2.2.6.1.1.1 Hausbockkäfer

Der Hausbockkäfer ist für Holzkonstruktionen einer der gefährlichsten Insekten. Die Käfer fliegen an heißen Tagen um die Mittagszeit von Juni bis Ende August auf relativ kurze Entfernungen. Die Fraßgänge sind oval mit einem Durchmesser bis zu 12 mm und mit zylindrischen Kotballen gefüllt. Die äußerste Holzschicht bleibt als papierdünne Schicht stehen, wodurch ein Befall oft spät erkannt wird. Es wird vor allem Splint gefressen, wodurch neuere Hölzer

⁸⁰ Nier (1994), S. 20

⁸¹ Nier (1994), S. 159

⁸² Lohmann (2014), S. 993

⁸³ Lohmann (2014), S. 726

⁸⁴ Niemz und Sonderegger (2017), S. 302

⁸⁵ Lohmann (2014), S. 569

mit geringem Kernholzanteil gefährdeter sind als historische Balken mit mittigem Kernholz. Die Larven benötigen in der Regel drei bis vier Jahre für die Entwicklung, bei weniger eiweißreichem Holz auch länger. Deswegen ist die Gefährdung bei verbautelem Holz in den ersten 50 Jahren am größten. In den Sommermonaten sind die Fraßgeräusche bei einem aktiven Befall deutlich zu hören. Abbildung 39 zeigt Hausbockkäfer in verschiedenen Entwicklungsstadien und ein Befallsbilder.

2.2.6.1.1.2 Gewöhnlicher Nagekäfer (*Anobium punctum*)

Der gewöhnliche Nagekäfer ist der wohl am häufigsten bei verbauten Hölzern anzutreffende Schädling. Er befällt Nadel und Laubholz, bevorzugt dabei aber das weiche Frühholz. Eiablage erfolgt oft an bereits befallenen Holz, er ist also „ortstreu“. Für ihn spielt das Alter des Holzes keine Rolle. Die Fraßgänge und Fluglöcher sind kreisrund und 1,0 bis 1,5 mm im Durchmesser. Bei den Gängen bleibt häufig nur eine dünne Außenschicht unversehrt. In den Fraßgängen befinden sich zigarrenförmige Kotballen mit an einer oder beiden Seiten ausgezogenen Spitzen. Die Entwicklung der Larven dauert ein bis drei Jahre. Abbildung 40 zeigt den gewöhnlichen Nagekäfer und einen befallenen Balken.

2.2.6.1.1.3 Splintholzkäfer

Der Splintholzkäfer ist ein Laubholzschädling, der bevorzugt Splintholzteile stärkereicher Holzarten befällt. Einheimische Fraßhölzer sind: Ahorn, Eiche, Edelkastanie, Esche, Haselnuss, Ulme, Pappel und Weide. Die Fraßgänge verlaufen meist in Faserrichtung und sind mit fest zusammengedrücktem Bohrmehl gefüllt. In den Gängen finden sich keine Kotballen. Die Frühholzschichten werden vollständig zerstört, Spätholz wie auch die Außenschicht bleibt erhalten. Die runden Fluglöcher sind zwischen 1 und 2 mm im Durchmesser. Die Entwicklung dauert 0,5 bis 1 Jahr. Abbildung 41 zeigt den Splintholzkäfer und dessen Larve mit einem Schadensbild.

2.2.6.1.2 Faulholzinsekten

2.2.6.1.2.1 Trotzkopf

Der Trotzkopf ist dem gewöhnlichen Nagekäfer sehr ähnlich, aber ein klein wenig größer. Er bevorzugt vor allem pilzbefallenes Nadelholz. Seine Fraßgänge sind 4 mm im Durchmesser und rund. Vorwiegend finden sich die Gänge im Frühholz und enthalten trogförmige Kotballen. Die Fluglöcher sind kreisrund und 2 bis 3 mm im Durchmesser. Die Entwicklungszeit dauert etwa zwei Jahre.

2.2.6.1.2.2 Rothalsbock

Der Rothalsbock befällt ausschließlich Nadelholz. Dabei bevorzugt er pilzbefallenes Holz. Da er eine hohe Holzfeuchte benötigt, kommt er vor allem bei erdberührten Holzteilen oder auch Fachwerkschwellen vor. Die Fraßgänge sind oval und mit locker an den Gangwänden hängendem Fraßmehl gefüllt. Die Ausflugslöcher sind im Unterschied zu anderen Bockarten kreisrund mit 5 bis 7 mm Durchmesser. Die Entwicklungszeit dauert zwischen zwei und drei Jahren. Abbildung 42 zeigt den Rothalsbock.

2.2.6.1.2.3 Gescheckter Nagekäfer („Echte Totenuhr“)

Der gescheckte Nagekäfer besitzt bei einer Länge von 4,5 bis 9 mm oberseitig auf seinem schwarz- braunen Körper gelblich- graue Flecken. In den Fraßgängen finden sich linsenförmige 1 mm große Kotballen (Abbildung 43). Die Fluglöcher sind kreisrund bei einem Durchmesser von 4 mm. Die Generationszeit beträgt zwei bis zehn Jahre. Aktiver Befall lässt sich durch deutliche Klopfgeräusche, mit acht bis elf Schlägen innerhalb von zwei Sekunden erkennen. Diese Geräuschkulisse hat dem Käfer den Beinamen „Echte Totenuhr“ eingebracht.

Der gescheckte Nagekäfer kommt insbesondere an Eichenholz mit gleichzeitigem Befall des Eichenporlings vor. In trockenem Holz erlischt der Befall. Abbildung 43 zeigt zusätzlich ein Schadensbild wie auch den Käfer selbst.

2.2.6.2 Pilze

Bei den holzerstörenden Pilzen kann in Braunfäulepilze und Weißfäulepilze unterschieden werden. Bei der Weißfäule wird vermehrt das Lignin, bei der Braunfäule die Cellulose abgebaut. Die am häufigsten vorkommenden, für Bauten gefährliche Pilze sind der Echte Hausschwamm, der weiße Porenschwamm, der braune Kellerschwamm und verschiedene Blättlingsarten. Pilze bestehen aus Zellfäden (Hyphen), die in ihrer Gesamtheit das Myzel bilden. Höhere Pilze entwickeln typische Fruchtkörper.

2.2.6.2.1 Weiße Porenschwamm

Der weiße Porenschwamm gehört zu den Nassfäuleerregern. Er benötigt viel Feuchte, kann aber auch längere Trockenzeiten über die Trockenstarre überdauern. Er bewirkt eine Braunfäule im Holz. Abbildung 44 zeigt ein eisblumenartiges Oberflächenmyzel.

2.2.6.2.2 Echter Hausschwamm

Der echte Hausschwamm ist der am meisten gefürchtete Holzerstörer in Gebäuden. Der Pilz ruft die Braunfäule hervor. Die Besonderheit an ihm ist, dass, wenn er einmal Holz befallen hat, auch umliegende eigentlich zu trockene Hölzer befallen kann, da er die für ihn nötige Wachstumsfeuchtigkeit selbst schaffen kann. Zusätzlich können die Myzelien große Strecken und Mauerwerk durchwachsen. Abbildung 45 zeigt Fruchtkörper und Schadensbilder des echten Hausschwammes.

2.2.6.2.3 Brauner Kellerschwamm

Der Braune Kellerschwamm ist ein Braunfäuleerreger. Er besitzt eine große Zerstörungskraft, stirbt aber mit Feuchteentzug ab. Abbildung 46 zeigt das Oberflächenmyzel.

2.2.6.2.4 Blättling

Die verschiedenen Blättlingpilze verursachen eine Braunfäule im Inneren von Hölzern⁸⁶. Die Fruchtkörper treten dabei erst spät zu Tage. Blättlinge können über längere Zeit in der Trockenstarre überleben. Abbildung 47 zeigt den Blättlingsbefall an einem Außenholz.

2.2.7 Schallausbreitung im Holz

2.2.7.1 Allgemeines

Schall bezeichnet die „mechanischen Schwingungen und Wellen eines elastischen Mediums“⁸⁷. Man kann den Schall nach der Frequenz in den nicht hörbaren Infraschall (< 16 Hz), den hörbaren Schall (16 Hz bis 20 kHz) und den Ultraschall (> 20 kHz) unterscheiden. In der Ausbreitform werden zwei Grundformen unterschieden: die Longitudinal- und die Transversalwellen (Abbildung 48 und 49). Zwischen den beiden Wellen unterscheidet sich die Schwingungsrichtung. Bei den Transversalwellen (auch Scher- oder S-Wellen⁴⁶) verläuft die Schwingungsrichtung orthogonal zur Ausbreitrichtung. Bei den Longitudinalwellen sind die Ausbreit- und die Schwingungsrichtung identisch. Die Longitudinalwellen sind in etwa drei- bis viermal schneller als die Transversalwellen⁸⁸. Für Balken gilt, dass die Breite und Dicke klein gegenüber der Wellenlänge sind. Das hat zur Folge, dass sich der Schall nur als

⁸⁶ Erler (2004), S. 67

⁸⁷ Niemz und Sonderegger (2017), S. 204

⁸⁸ Niemz und Sonderegger (2017), S. 211

Quasilongitudinalwelle⁸⁷ fortbewegt. Unter diesen Voraussetzungen gilt die Gl. 4 für die Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls.

Die Wellenlänge liefert dabei Aussagen über die Fehlererkennung. Als Beispiel nennt Niemz⁸⁹, dass bei der für die Holzprüfung üblichen 20 kHz und einer Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung von 6000 m/s eine Wellenlänge von 30 cm entsteht. Dementsprechend lassen sich kleine Defekte, wie Äste oder beginnende Fäulen nicht erkennen. Die niedrige Frequenz ist aufgrund der hohen Dämpfung von Holz nötig. Je höher die Frequenz, desto stärker wird das Signal gedämpft. Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge lautet:

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad \text{Gl. 11}$$

$$\begin{array}{ll} c & \text{Schallgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right] \\ f & \text{Frequenz} \left[\frac{1}{s} \right] \end{array}$$

Den Einfluss der Holzfeuchte auf die Schallgeschwindigkeit kann Näherungsweise aus folgender Gleichung nach Sandoz⁹⁰ berechnet werden:

$$v_{12} = v_{\omega} + 29 * (\omega - 12) \quad (\text{für } \omega \leq 32 \%) \quad \text{Gl. 12}$$

$$\begin{array}{ll} v_{12} & \text{Ausbreitgeschwindigkeit bei } \omega = 12 \% \\ v_{\omega} & \text{Ausbreitgeschwindigkeit bei } \omega \neq 12 \% \\ \omega & \text{Holzfeuchtigkeit in } \% \end{array}$$

2.2.7.2 Einflüsse auf die Schallausbreitung

Die Schallgeschwindigkeit ist von folgenden Parametern abhängig⁹¹:

- Faser- Schall- Richtung (in Faserrichtung ca. drei bis viermal so schnell wie senkrecht dazu, tangential langsamer als radial)
- Faserlänge
- Rohdichte
- Früh- und Spätholzanteil
- Holzfehler (z.B. Äste, Fäulnis)
- Feuchtegehalt
- Temperatur.

Diese Parameter beeinflussen das Elastizitätsmodul und damit auch die Schallgeschwindigkeit. Der Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Holzfeuchte von Kiefernholz ist in Abbildung 50 angegeben. Es lässt sich daran erkennen, dass die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Feuchte sinkt. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches sinkt die Schallgeschwindigkeit nicht mehr so stark ab⁹².

Mit zunehmender Rohdichte steigt die Schalllaufzeit (Abbildung 51).

⁸⁹ Niemz und Sonderegger (2017), S. 209

⁹⁰ Sandoz (1993) zitiert in Linke, Rug und Pasternak (2018), S. 217

⁹¹ Niemz und Sonderegger (2017), S. 212

⁹² Baron (2009), S. 42

Für den Einfluss der Temperatur auf die Schalllaufzeit lässt sich aussagen, dass mit steigender Temperatur die Laufzeit abnimmt (Abbildung 52), wobei zwischen -30 °C und $+60\text{ °C}$ ein Unterschied von lediglich 7 % herrscht.

Den Einfluss des Winkels zwischen Faser- und Ausbreitrichtung der Schallgeschwindigkeit verdeutlicht Abbildung 53.

Äste beeinflussen die Schallgeschwindigkeiten nur in wenig, da die Schallwellen die Äste umlaufen und die Änderung des Weges dabei gering ist.⁹³

Holzschädigungen durch Pilze dämpfen die Schallausbreitung ab und sorgen damit für eine Abnahme der Geschwindigkeit. Braunfäule reduziert die Schallgeschwindigkeit dabei mehr als Weißfäule⁹⁴. Bei Untersuchungen von Baron⁹² mit simulierter Innenfäule ergab ein 10 %-iger Querschnittsdefekt eine Reduzierung der Geschwindigkeit auf 90 % des Ausgangswertes. Bei 30 % Defekt verblieben 85 % der Geschwindigkeit. Bei einem Befall, vom braunen Kellerschwamm, sank die Schallgeschwindigkeit im Holz entsprechend der durch den Pilzbefall ausgelösten Rohdichtereduzierung⁹⁵. „Der Zusammenhang zwischen Masseverlust und Schalllaufzeit lässt sich insbesondere bei Braunfäule im frühen Stadium kaum feststellen, da zunächst eine Depolymerisation⁹⁶ stattfindet, die keinen Masseverlust, wohl aber einen Rückgang der Laufzeit zur Folge hat.“⁹⁵

Für ungeschädigte Althölzer lässt sich bei Longitudinalwellen eine geringe bis keine Geschwindigkeitsreduzierung erkennen.⁹⁴

2.2.7.3 Zusammenhang zu anderen Eigenschaften

Die longitudinale Schallgeschwindigkeit korreliert mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften von Holz. Abbildung 54 stellt die Schallgeschwindigkeit der Biegefestigkeit und dem stat. Biege- E- Modul gegenüber. In Untersuchungen von Linke⁹⁷ konnten für die Korrelation zwischen Biegefestigkeit und Schallgeschwindigkeit ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 32\%$ bei indirekter und $R^2 = 28\%$ bei direkter Messung festgestellt werden. Auf den statischen Biege- E- Modul wird bei mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 46\%$ bei indirekter Messung $R^2 = 57\%$ bei geschlossen.

2.2.7.4 Verfahren

2.2.7.4.1 Schalllaufzeitmessung

Bei der Schalllaufzeitmessung werden Stoßwellen longitudinal durch das Holz geschickt und dabei die Laufzeit gemessen. Das Verfahren wird in der Regel in zwei Gebieten eingesetzt. Zur Bestimmung des dynamischen E- Moduls zusammen mit der Rohdichte, zur Festigkeitssortierung oder um bei verdeckten Balken zu untersuchen, ob diese über einem Zwischen- Auflager gestoßen sind oder durchlaufen. Dabei können die Sensoren über Nägel direkt (im Hirnholz), indirekt oder halbdirekt (von der Seitenfläche) angebracht werden (Abbildung 55). Die direkte Messung ist dabei zu bevorzugen, bei verbauten Hölzern aber in der Regel nicht durchführbar. Über die Laufzeit und den Abstand der Messstellen lässt sich die Schallgeschwindigkeit errechnen. Die direkte Schallgeschwindigkeit ist ein wenig höher als die indirekte oder halbdirekte. Abbildung 56 zeigt für 21 eigene Messungen den Vergleich von direkt zu indirekt gemessener Schalllaufzeit mit Standardabweichung.

⁹³ Baron (2009), S. 43

⁹⁴ Baron (2009), S. 44

⁹⁵ Konarski und Wuzny (1977), zitiert in Baron (2009), S. 44

⁹⁶ Depolymerisation = „Aufspaltung polymerer Verbindungen in kleinere Bruchstücke bis hin zu den Grundbausteinen“. Aus Lohmann (2010), S. 244

⁹⁷ Linke, Rug und Pasternak (2018), S. 217

2.2.7.4.2 Echo- Ultraschall

Das Echo- Ultraschallverfahren wird verwendet, um Defekte im Holz erkennen zu können. Dabei wird ein niederfrequentes Ultraschallsignal verwendet, was über einen Prüfkopf in das Holz eingebracht wird. Die eingebrachten Schallwellen werden an Fehlern wie Rissen, Ästen oder Verwüchsen reflektiert. Dadurch lässt sich die Lage und Größe des Defektes berechnen (Abbildung 57).

2.2.7.4.3 Schall- Tomographie

Bei der Schall- Tomographie werden virtuelle Schnitte durch einen Balken oder Baum gelegt. Mit diesem Verfahren lassen sich versteckte Innenschäden wie Kernfäule oder auch Ringschäle erkennen. Dafür werden ringsum Sensoren angebracht (Abbildung 58). Die Sensoren messen die Laufzeit von Schallimpulsen durch das Holz. Aus der Laufzeit wird eine fiktive Schallgeschwindigkeit⁹⁸ errechnet und je nach Geschwindigkeit farbig angelegt. Für die Interpretation der Schalllaufzeiten wird ein 2D- oder auch 3D- Tomogramm erzeugt, in dem die Geschwindigkeiten relativ zueinander dargestellt werden. Abbildung 59 zeigt ein Tomogramm eines teilweise kerngeschädigten Balkens mit der zugehörigen Liniengraphik ohne Interpolation. Die Aussage hängt dabei von der Farbskala ab, über die das Bild weitestgehend gesteuert werden kann. Dabei ist zu beachten, dass eine Unschärfe von bis zu 30 % bei der Darstellung vorhanden ist. Um eine genaue Schadstellenanalyse zu betreiben, sollten zusätzlich Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen werden.

2.2.8 Holzgütesortierung

Für die Holzgütesortierung in Bestandsbauten gibt es keine direkte Vorgabe, sondern lediglich für Neubauten. In der ersten Sortierung muss in noch tragfähige, kaum geschädigte Hölzer und offensichtlich nicht mehr tragfähige Hölzer unterschieden werden. Für die kaum geschädigten Hölzer kann sinngemäß die Sortierung nach DIN 4074 stattfinden. Diese Norm gilt zwar eigentlich für neue Hölzer, kann aber angepasst werden. Über die DIN 4074 wird das Holz der Tragfähigkeit nach einsortiert. Die Sortiernorm unterscheidet Nadelholz (S) und Laubholz (LS). Es gibt die Sortierklassen S7 / LS7 (niedrige Qualität), S10 / LS10 (normale Qualität), S13 / LS13 (hohe Qualität) und S15 / LS15 (sehr hohe Qualität). S15 bzw. LS15 muss aber zusätzlich apparativ untersucht werden. Die genauen Anforderungen für S15 / LS15 werden in der Norm nicht genannt. Nachfolgend werden die Sortierkriterien hinsichtlich ihrer Relevanz für historische Konstruktionshölzer diskutiert. Dabei wird sich maßgeblich an die Bewertung von Görlacher gehalten⁹⁹. Die Grenzwerte für Nadel- und Laubholz finden sich im Anhang A-1.

In der DIN 4074 finden sich zusätzlich auch Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Toleranzen von Bauteilen. Diese Angaben können sinngemäß auf die Untersuchung von verbauten Hölzern übertragen werden. Dabei sind Abweichungen von 10 %, bei 10 % der tragenden Bauteile von den in der statischen Berechnung genutzten Querschnittswerten zulässig.

2.2.8.1 Baumkante

Baumkanten dürfen nur bis zu einer zulässigen Größe an Balken vorhanden sein. Bei Überschreiten dieser Grenzwerte, was bei altem Konstruktionsholz häufig der Fall ist, muss der rechnerische Querschnitt angepasst werden. Bis zur DIN 1052:2008¹⁰⁰ war es noch zulässig, bei Rundholz mit intakter Randfaser die aufnehmbare Spannung (Biege, Zug und Druck in

⁹⁸ Fiktive Schallgeschwindigkeit, da der genaue Weg der Schallwellen nicht bekannt ist, sondern lediglich die Laufzeit und der Sensorabstand. Der Begriff stammt von Frank Rinn.

⁹⁹ Görlacher und Eckert (1999), S. 38

¹⁰⁰ DIN 1052:2008

Faserrichtung) um 20 % zu erhöhen. In DIN EN 1995 ist diese Erhöhung nicht mehr Teil der Norm. Es ist aber dennoch denkbar bei Balken, bei denen die Zug- und Druckzone nicht bearbeitet wurde die Festigkeit zu erhöhen. Der Querschnitt muss dabei näherungsweise als Rundholz betrachtet werden. Abbildung 60 zeigt, wie die Baumkante nach DIN 4074 bestimmt wird.

2.2.8.2 Äste

Maßgeblich ist der kleinste sichtbare Durchmesser des größten Astes. Die Ästigkeit ist der Durchmesser geteilt durch die zugehörige Querschnittsbreite des Holzes.

Da die Ästigkeit einen großen Einfluss auf die Festigkeit ausübt, müssen die Kriterien uneingeschränkt auf altes Holz übertragen werden. Um den Aufwand der Untersuchung zu reduzieren, kann man sich auf die hochbelasteten Bereiche beschränken. Häufig sind nicht alle vier Seiten eines Balkens einsehbar. In solchen Fällen muss die Ästigkeit auf die nicht einsehbaren Seiten extrapoliert werden. Die Extrapolation kann angewendet werden, da innerhalb des Baumwuchses Regelmäßigkeiten vorhanden sind. Wenn man davon ausgehen kann, dass nicht oder kaum einsehbare Balken die gleiche Herkunft und dasselbe Alter wie einsehbare Balken haben, kann von ähnlichen Eigenschaften wie auch Ästigkeiten ausgegangen werden¹⁰⁰. Diese Extrapolation sollte aber auf die Sortierklassen S7 und S10 beschränkt bleiben. Bei höherer Klassifizierung müssen die maßgeblichen Bereiche freigelegt werden. Abbildung 61 zeigt die Bestimmung der Ästigkeit für Einzeläste nach DIN 4074.

Es besteht ebenfalls die rechnerische Möglichkeit, Randäste wie Löcher zu behandeln und den Querschnitt zu reduzieren¹⁰¹. Dies ist bei Hölzern oder Brettern ohne Mark mit auf einer Höhe durchgehenden Ästen eine einfache Herangehensweise. Abbildung 62 zeigt das Vorgehen bei Randästen in schmalen Bauteilen.

2.2.8.3 Jahrringbreiten

Die mittleren Jahrringbreiten werden in radialer Richtung gemessen. Bei Hölzern die Mark enthalten, wird ein Bereich von 25 mm ausgehend vom Mark nicht dabei berücksichtigt. Bei Nadelholz dürfen für S 10 bis zu 6 mm und bei S 13 bis zu 4 mm vorhanden sein. Da das Hirnholz in der Regel nicht einsehbar ist, kann die Jahrringbreite über Bohrkerne oder Bohrwiderstandsmessung überprüft werden. Durch die adulten Splintbereiche mit ausgeprägtem Alterstrend und Jahrringabständen von 1 mm und weniger werden die Forderung im Regelfall erfüllt. Abbildung 63 zeigt die Messmethode nach DIN 4074.

2.2.8.4 Faserneigung

Die Faserneigung hat wie die Ästigkeit einen maßgebenden Einfluss auf die Festigkeit. Gemessen wird dabei die Abweichung der Faser bezogen auf 1 m Länge Bauteilachse. Örtliche Faserabweichungen wie bei Ästen bleiben dabei unberücksichtigt. Die Faserneigung wird über die Schwindrisse bestimmt. Bei altem Konstruktionsholz ist diese Regel meist eingehalten. Für die Einsortierung über S10 sollte es zumindest stichprobenartig nachgewiesen werden. Abbildung 64 zeigt die Messmethode nach DIN 4074.

2.2.8.5 Risse

Übliche Schwindrisse sind bei den ansetzbaren Festigkeiten nach DIN EN 338 nicht zu berücksichtigen. Die Risttiefe wird an drei Viertelpunkten des Risses gemessen. Im Regelfall werden die Grenzwerte bei altem Holz eingehalten. Abbildung 65 zeigt die Messmethode nach DIN 4074.

¹⁰¹ Forest Products Laboratory (2010), S. 7-3

2.2.8.6 Druckholz

Druckholz hat in mäßigem Umfang kaum Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften. Es ruft aber durch ein ausgeprägtes Längsschwindeverhalten bei der Trocknung erhebliche Krümmung hervor. Aus diesem Grund existiert das Sortierkriterium nach DIN 4074. Bei historischen Konstruktionen ist der Trocknungsvorgang schon lange abgeschlossen und die Ausgleichsfeuchte erreicht. Somit ist dieses Kriterium für Altbauten entbehrlich.

2.2.8.7 Insektenfraß

Nach DIN 4074 wird lediglich auf Fraßgänge von Frischholzinsekten mit maximal 2 mm eingegangen. Da es aber bei bestehenden Bauten häufig Fraßgänge von Insekten wie beispielsweise dem Hausbock gibt, muss das Kriterium angepasst werden. Die Fraßgänge reduzieren den tragfähigen Querschnitt. Wenn der Umfang der Fraßgänge untersucht wurde, kann der tragende Restquerschnitt angesetzt werden. Auf ein Entfernen der befallenen Bereiche kann verzichtet werden, wenn der Befall nachweislich nicht mehr aktiv ist.

2.2.8.8 Mistelbefall

Mistelbefall lässt sich durch dicht nebeneinander liegende Löcher mit 5 mm Durchmesser erkennen. Hervorgerufen werden diese Löcher durch die Senkwurzeln der Misteln an lebenden Bäumen. Wenn dieser in historischen Hölzern selten verbaute Fall vorkommt, ist das Vorgehen analog zum Insektenfraß. Es muss der tragende Restquerschnitt ermittelt werden.

2.2.8.9 Krümmung

Die Krümmung (Längskrümmung, Verdrehung, Querkrümmung) muss an neuen Bauteilen nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei um ein Problem der Gebrauchstauglichkeit, das sich nicht auf die Tragfähigkeit auswirkt. Im Einzelfall muss entschieden werden, ob die gekrümmten Bauteile ihre Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Für die Statik muss im Zweifel bei der Berechnung die Krümmung in der Theorie II. Ordnung berücksichtigt werden.

2.2.8.10 Markröhre

Bei Kanthölzern ist die Markröhre kein Sortierkriterium, lediglich bei Bohlen und Brettern muss sie beachtet werden.

2.2.8.11 S15 bzw. LS 15

Wie Holzbauteile in die Klassen S15 (Nadelholz) bzw. LS15 (Laubholz) einsortiert werden können, wird in DIN 4074 nicht näher beschrieben. Für neues Nadelholz beschreiben Blaß und Frese¹⁰², wie Kanthölzer und Brettlamellen der Festigkeitsklasse C35, was einer Sortierung S15 entsprechen würde, einsortiert werden können. Dabei wird die visuelle Sortierung mit der Messung der Rohdichte und des dynamischen E- Moduls kombiniert. Visuell müssen die Hölzer dabei mindestens der Klasse S10 entsprechen und dabei einen Grenzwert für Rohdichte und dynamisches E- Modul erfüllen. Für Laubholz fanden diese Untersuchungen nicht statt. Es ist aber anzunehmen, das mit einem analogen Vorgehen auch Eichenholz in LS15 einsortiert werden kann.

¹⁰² Blaß und Frese (2004)Blaß und Frese (2004)

2.3 Normen

Für die Festigkeitsuntersuchung von verbauten Konstruktionshölzern kommen verschiedene Normen zur Anwendung. Die nachfolgende Zusammenstellung entspricht der Zusammenstellung von Rug¹⁰³. Für die statische Berechnung gilt die für den Neubau ausgelegte DIN EN 1995 sinngemäß für Altbauten. „DIN EN 1995-1-1 gilt [...] sinngemäß für Bauten im Bestand, soweit in den speziellen Normen nichts anderes bestimmt ist“¹⁰⁴. Für die Ermittlung der Festigkeits- und Steifigkeitsgrößen gilt als Grundlage die DIN EN 14081-1, welche die europäischen Anforderungen an visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung für Bauholz für tragende Zwecke regelt. DIN EN 14081 gibt dabei keine in Europa einheitlichen Sortiervorgaben, die eigentlichen Sortiervorschriften sind Ländersache. Über die DIN 20000-5 wird in Deutschland die DIN 4074-1 für Nadelholz und DIN 4074-5 für Laubholz als gültige Sortiernorm angegeben.

Die einer Sortierklasse zugeordneten Hölzer werden nach DIN EN 1912 einer Festigkeitsklasse für Bauholz für tragende Zwecke zugeordnet, beispielsweise wird S10 der Festigkeitsklasse C24 zugeordnet. Dabei müssen die charakteristischen Werte der Eigenschaften DIN EN 338 entsprechen, ansonsten werden die Werte nach DIN EN 384 experimentell erfasst.

Norm	Bezeichnung
DIN EN 14081-1:2016	Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
DIN EN 14081-2:2013	Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung
DIN EN 14081-3:2012	Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 3: Maschinelle Sortierung, zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle
DIN 20000-5:2016	Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt
DIN 4074-1:2012 DIN 4074-5:2008	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz
DIN EN 1912:2013	Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten
DIN EN 338:2016	Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
DIN 68365:2008	Schnittholz für Zimmererarbeiten – Sortierung nach dem Aussehen – Nadelholz

Tabelle 17: Zusammenstellung der für die Sortierung von Bauholz für tragende Zwecke bei Neubauten maßgebenden Normen, aus: (Rug 2018), S. 150

2.3.1 Kennzeichnung der Sortierung

Um die Nachweisbarkeit einer durchgeführten Sortierung zu gewährleisten, fordert die DIN EN 14081-1:2016 im Anhang ZA.3 eine CE Kennzeichnung¹⁰⁵ der visuell oder auch maschinell sortierten Hölzer. Die Kennzeichnung muss dabei am Holz selbst oder mit einem Etikett sichtbar, leserlich und dauerhaft angebracht werden. Es wird aber auch zugelassen, dass die

¹⁰³ Rug (2018)

¹⁰⁴ DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Abschnitt NCI zu 1.1.2.

¹⁰⁵ „Mit der CE – Kennzeichnung erklärt der Hersteller, Inverkehrbringer oder EU- Bevollmächtigte gemäß EU-Verordnung 765/2008, „Dass das Produkten den geltenden Anforderungen genügt, die in den Harmonisierungsrechtsvorschriften der Gemeinschaft über ihre Anbringung festgelegt sind.“
Aus: Wikipedia: CE-Kennzeichnung

CE- Kennzeichnung auf der Verpackung oder in den Begleitunterlagen angebracht wird, falls die Art des Produktes die direkte Kennzeichnung nicht zulässt oder rechtfertigt. Abbildung 66 zeigt ein Beispiel für die CE Kennzeichnung nach DIN EN 14081-1:2016 auf den Balken. In der Praxis wird die Kennzeichnung bei Festigkeitssortierung im Bestand derzeit nicht praktiziert.

Bereits in der heute schon lange nicht mehr gültigen DIN 1052:1947¹⁰⁶, die bis 1969 Gültigkeit hatte, wurde eine Kennzeichnung der nach DIN 4074 in die Güteklasse I (heute S13 oder S15) sortierten Hölzer verlangt. Im Normtext heißt es: „Für die Kennzeichnung der zur Güteklasse I gehörenden Bauteile gemäß §6 a, Abs. 2, und § 6 b, Abs. 2, ist ein Brennstempel nach Anlage 1, Bild 1 zu verwenden. Einstweilen darf auch eine andere Stempelart, z.B. Gummistempel, derselben Form verwendet werden. Der zur Güteklasse I gehörenden Teil ist auf dem Holz nach Anlage 1, Bild 2 zu kennzeichnen. In den Zeichnungen sind die aus Holz der Güteklasse I auszuführenden Teile entsprechend Bild 3 kenntlich zu machen. Bei Bauteilen aus Holz der Güteklasse III ist auf den Zeichnungen entsprechend zu verfahren. Holz der Güteklasse II bedarf keiner Kennzeichnung“¹⁰⁷. Abbildung 67 zeigt die geforderte Kennzeichnung per Brandstempel. In der bis 1969 gültigen DIN 1052:1947 war es noch möglich, nur die hochbelasteten Bereiche in eine höhere Güteklasse einzusortieren. Diese Möglichkeit wird in dem zitierten §6 a, Abs.2 der DIN 1052:1947 gegeben, wobei ein Sicherheitszuschlag von 1,5-mal dem größten Querschnittsmaß auf den untersuchten Bereich erfolgen muss. In §6 b, Abs 2 wird verlangt, dass Holz der Güteklasse I von einem geeigneten Fachmann ausgesucht und die sortierten Bereiche deutlich, sichtbar und bleibend gekennzeichnet werden müssen. Dabei muss ersichtlich sein, wer das Holz sortiert hat und welcher Teil zur Güteklasse I gehört. Nachdem dieses Vorgehen nicht flächendeckend kontrollierbar war, wurde es mit der Fassung der DIN 1052:1969 aufgegeben¹⁰⁸.

Wenn man die CE- Kennzeichnung mit der alten Güteklassenkennzeichnung kombiniert, lassen sich auch Teilbereiche einer höheren Sortierklasse und damit auch Festigkeitsklasse zuordnen und kennzeichnen. Um den Arbeitsaufwand bei der Sortierung gering zu halten, ist es sinnvoll, nur die Teilbereiche zu untersuchen, die hochbelastet sind.

2.3.2 Sicherheitssystem nach Eurocode 5

Nach DIN EN 1990:2010 muss der Materialwiderstand (R) größer als die Einwirkung (E) sein. Dabei werden bei der heutigen probabilistischen¹⁰⁹ Betrachtung beide Seiten mit Sicherheitsfaktoren belegt. Ein Bauteilnachweis ist dann erfüllt, wenn die Einwirkung kleiner als der Widerstand ist. Abbildung 68 zeigt das prinzipielle Sicherheitssystem nach dem Eurocode mit seinen Verteilungskurven und Teilsicherheitsbeiwerten wieder. Dabei gilt für die Einwirkung eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 95 % für E_{95} und für die Widerstandsseite von 5 % für R_{05} . Die Bemessungswerte E_d und R_d werden mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{G(Q)}$ für Einwirkungen und γ_M für Tragwiderstände, sowie zusätzlich mit dem Modifikationsbeiwert k_{mod} ermittelt.

$$E_d \leq R_d$$

Gl. 13

E_d Einwirkungen mit Sicherheit

R_d Widerstand mit Sicherheit

¹⁰⁶ Rug (2016)

¹⁰⁷ Rug (2016), S. 130 bzw. DIN 1052:1947 A. (3)

¹⁰⁸ Rug (2016), S. 12

¹⁰⁹ probabilistisch = die Wahrscheinlichkeit berücksichtigend. Aus Duden: probabilistisch

Auf der Widerstandsseite wird bei Bauteilfestigkeiten in der Regel mit dem 5-% Quantil (charakteristischer Wert) der Festigkeit gerechnet. Im Klartext bedeutet es, dass 95 % aller Bauteilfestigkeiten höher als der angenommene Wert sind. Der charakteristische Wert (f_k) wird im Holzbau nach Eurocode 5 noch durch einen Materialsicherheitsbeiwert (γ_M) (1,3 für Vollholz) und dem k_{mod} Wert abgemindert. Der damit entstandene Wert heißt Design- oder Bemessungswert (f_d). Der Materialsicherheitsbeiwert (γ_M) berücksichtigt Modellunsicherheiten und geometrische Abweichungen. Der k_{mod} Wert hängt dabei von der Klasse der Lasteinwirkungsdauer und der Nutzungsklasse ab. Die Lasteinwirkungsdauer hängt von der Lastkombination ab und liegt zwischen sehr kurz (weniger als eine Minute), z.B. Aufpralllasten und ständig (länger als 10 Jahre), z.B. Eigenlasten. Die Nutzungsklasse beschreibt.

NKL	Ausgleichsfeuchte ω_{gl} [%]	Einsatzbereich (Beispiele)
1	10 ± 5 (meist $\omega \leq 12$ %)	Beheizte Innenräume
2	15 ± 5 (meist $\omega \leq 20$ %)	Überdachte, offene Tragwerke
3	18 ± 6	Frei der Witterung ausgesetzte Bauteile

Tabelle 18: Nutzungsklassen, aus: DIN EN 1995-1-1/NA:2013 Tabelle NA. 5

$$f_d = f_k * \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \quad \text{Gl. 14}$$

f_d Bemessungsfestigkeit (mit Sicherheit)
 f_k Charakteristische Festigkeit (ohne Sicherheit)
 k_{mod} Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt
 γ_M Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffeigenschaften

Dem Materialwiderstand entgegen steht die Einwirkung. Bei der Einwirkung wird unterschieden in ständige - und veränderliche Lasten. Ständige Lasten werden dabei mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,35 und veränderliche mit 1,5 multipliziert. Zusätzlich werden um den maßgebenden Lastfall zu berechnen, Lastkombinationen mit den verschiedenen Lastfällen gebildet. Dabei werden verschiedene Lastkombinationen für verschiedene Fälle unterschieden. Für die statische Berechnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit lautet die Grundkombination angepasst folgendermaßen:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} * \gamma_{G,j} + Q_{k,1} * \gamma_{Q,1} + \sum_{i > 1} Q_{k,i} * \gamma_{Q,i} * \Psi_{0,i} \quad \text{Gl. 15}$$

E_d Bemessungswert der Einwirkung (mit Sicherheit)
 G_k Charakteristischer Wert der ständigen Einwirkung
 $Q_{k,1}; Q_{k,i}$ Charakteristischer Wert der ersten und der weiteren unabhängigen veränderlichen Einwirkungen
 $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkung (in der Regel 1,35)
 $\gamma_{Q,1}; \gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwert für die erste; für weitere veränderliche Einwirkungen (in der Regel 1,5)
 $\Psi_{0,i}$ Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkungen

Ein Beispiel macht die Gleichung verständlich. Für die Berechnung eines Dachwerkes wird die Lastkombination aus Eigengewicht (G_k), die Nutzlast ($Q_{k,1}$), Schneelast ($Q_{k,2}$) und Windlast ($Q_{k,3}$) gebildet. Dabei wird durch den Kombinationsbeiwert ($\Psi_{0,i}$) lediglich ausgedrückt, dass es extrem unwahrscheinlich ist, dass sowohl Nutzlast, Schneelast und Windlast ihre Höchstlast gleichzeitig entwickeln.

$$E_d = \text{Eigenlast} * 1,35 + \text{Nutzlast} * 1,5 + \text{Schneelast} * 1,5 * 0,5 + \text{Windlast} * 1,5 * 0,6$$

Derzeit läuft eine Dissertation von Maria Loebijinski¹¹⁰ zu dem Thema der Zuverlässigkeitsbewertung von historischen Holzkonstruktionen. Die Arbeit hat unter anderem das Ziel, die Sicherheitsfaktoren verringern zu können, ohne die Sicherheit unter die eines Neubaus sinken zu lassen¹¹¹. Argumente dafür sind, dass Lasten genauer bekannt sind, wie beispielsweise die Eigenlast. Die Festigkeit der Hölzer kann in der Konstruktion für jedes Holz mit größerer Genauigkeit aufgenommen werden, als es im Neubau geschieht. Derzeit wird die Reduzierung der Sicherheitsfaktoren noch nicht betrieben.

¹¹⁰ Loebijinski, Rug und Pasternak (2017)

¹¹¹ Loebijinski, Rug und Pasternak (2017)

3 Gerätetechnik

3.1 Feuchtebestimmung mit der Widerstandsmethode

Die Holzfeuchtebestimmung wurde mit dem Gerät Hydromette M2050 (Abbildung 69) und Hydromette BL Compact S (Abbildung 70) von GANN vorgenommen. Beide Geräte funktionieren über den elektrischen Widerstand zwischen zwei Elektroden. Die Elektroden werden in das Holz eingetrieben und der Widerstand dazwischen gemessen. Zu beachten ist, dass die Elektroden quer zum Faserverlauf eingetrieben werden müssen. Bei beiden wird die Außentemperatur mit in die Messung einbezogen. Die Holzart mit hinterlegter Rohdichte wird bei Hydromette M2050 mit eingegeben, bei Compact S wird lediglich zwischen Laub und Nadelholz unterschieden. Bei Hydromette M2050 muss die Außentemperatur eingegeben werden, bei Compact S wird sie Geräteseitig gemessen. Für Hydromette M2050 gibt es Elektroden mit Isolierspitzen um die Holzfeuchte in bestimmten Schichten zu messen.

Durch chemische Einlagerungen wie Salze im Holz, kann sich die elektrische Leitfähigkeit verändern, was zu fehlerhaften Messungen führt.

3.2 Bohrwiderstandsmessgerät

Die Bohrwiderstandsmessung ist heute ein verbreitetes Verfahren zur Kontrolle von stehenden Bäumen und zur Überprüfung von verbauten Hölzern. Vor allem die genaue Ortung von Fehlstellen mit einem Rückschluss auf die relative Festigkeit sind die Vorteile des Verfahrens. Das in dieser Arbeit verwendete Gerät RESISTOGRAPH 4453-S mit 45 cm Bohrtiefe stammt von der Firma Rinntech und besitzt eine angegebene Auflösung von bis zu 1/100 mm.

3.2.1 Verfahren

Bei der Bohrwiderstandsmessung wird eine Bohrnadel mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das Holz gebohrt. Dabei wird die Leistungsaufnahme des Bohrmotors als Maß für den Bohrwiderstand ausgegeben. Eine allgemeine Prinzipskizze der Geräte gibt Abbildung 71 an. Das Bohrwiderstandsmessgerät beinhaltet je einen Motor für den Vorschub und einen für die Rotation. Am Batteriepack ist ein Thermodrucker eingebaut, so dass vor Ort die Profile gedruckt werden können. Die Bohrnadel ist 1,5 mm breit und besitzt eine 3 mm breite Spitze (Abbildung 72). Damit soll gewährleistet werden, dass der Bohrwiderstand nur an der Nadelspitze erfolgt. Für die Messung des Bohrwiderstandes sind vor allem die äußeren Spitzen nötig. Aufgrund des kleinen zurückbleibenden Loches gilt das Verfahren als zerstörungsarm. Der Bohrwiderstand wird über einen angeschlossenen Drucker als Bohrkurve im Maßstab 1:1 ausgedruckt und über eine Schnittstelle als digitale Kurve bereitgestellt.

Das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Bohrwiderstand der Bohrer von Rinntech mit der Rohdichte liegt bei $R^2 > 0,8$ ¹¹². Die ausgegebene Bohrkurve gibt allerdings nur den Bohrwiderstand an. Um diesen in die Rohdichte des Prüfkörpers umrechnen zu können, muss das Messgerät kalibriert werden.

Selbst mit der relativen Dichteangabe lassen sich gesunde harte Teilbereiche von geschädigten weichen Teilbereichen unterscheiden. Durch die Bohrwegangabe lassen sich auch Rückschlüsse auf die Abmessungen von verdeckten zimmermannsmäßigen Verbindungen ziehen¹¹³.

¹¹² Rinn, Schweingruber F.-H. und Schär (1996), S. 303

¹¹³ Görlacher und Eckert (1999), S. 28

3.2.2 Einflüsse auf den Bohrwiderstand

Der Bohrwiderstand setzt sich folgendermaßen zusammen¹¹⁴:

$$B_w = [P_{Bw0} + P_S + P_V + P_R(x)] \cdot \eta_{Bw}$$

Gl. 16

B_w	Bohrwiderstand
P_{Bw0}	Leerlaufleistung im Freilaufbetrieb
P_S	Schnittleistung am Nadelkopf
P_V	Leistung zur Spanverdrängung nach dem Schnitt
$P_R(x)$	Laufleistung im Bohrloch in Abhängigkeit vom Bohrweg x
η_{Bw}	Geräteabhängiger Faktor

Die Leerlaufleistung P_{Bw0} ist vom Gerätetyp abhängig. Dabei schwankt sie je nach Gerätetyp und Abnutzung bzw. Wartungsstand (Reibung und Lagerschmierung) des Gerätes. Der Energieaufwand für den Vorschub ist ebenfalls Teil der Leerlaufleistung. Bei modernen Bohrwiderstandsmessgeräten wird die Leerlaufleistung herausgerechnet.

Die Schnittleistung am Nadelkopf P_S ist abhängig von der Holzart, der Rohdichte, der Bohrrichtung, der Holzfeuchte, der Temperatur, Abnutzung des Bohrkopfes und der Bohrkopfgeometrie. Die am weitesten von der Rotationsachse entfernten Flanken (deren Zustand und Form) beeinflussen das nötige Drehmoment am stärksten.

Mit dem Eindringen des Bohrkopfes in das Holz fallen Späne an, die verdrängt werden müssen. Die dafür erforderliche Leistung wird als P_V abgekürzt. Mit Beginn des Bohrens nimmt die Verdrängungsleistung zu, bis sie auf einem konstanten Niveau bleibt. In den ersten Millimetern wird dabei das Bohrmehl ausgestoßen, wodurch die nötige Verdrängungsleistung gering ist. Erst wenn die Bohrrückstände nicht mehr ausgestoßen werden, steigt der Wert. Dieses Leistungsniveau ist dabei von der Holzart, der Rohdichte und der Feuchtigkeit abhängig. Die Laufleistung im Bohrloch $P_R(x)$ steigt mit Zunahme des Bohrweges an. Sie erhöht sich durch eine Vergrößerung der Reibungsfläche des Bohrschaftes im Bohrloch, sowie durch Verkanten oder Verlaufen des Bohrers.

Der geräteabhängige Faktor η_{Bw} ist ein gleichbleibender Faktor für jedes Gerät.

Die Kombination aller genannten Faktoren ergibt das Bohrwiderstandsdiagramm.

Auf die einzelnen Faktoren wird im Weiteren näher eingegangen.

3.2.2.1 Rohdichte

Die Rohdichte ist abhängig von der Holzart, der Position im Balkenquerschnitt und auch von der Position innerhalb eines Jahrrings (Frühholz oder Spätholz). Die Rohdichte innerhalb des Holzes wird in Kapitel 2.2.4.2 Dichte näher beschrieben. Abbildung 73 zeigt je ein Bohrprofil für Nadelholz und eines für ein ringporiges Holz. Dabei ist zu erkennen, dass bei Nadelhölzern (Conifer) die Dichte von den adulten Außenbereichen zu den juvenilen Innenbereichen abfällt. Dies liegt an dem Alterstrend, bei dem die Jahrringbreiten im Alter abnehmen und somit der Spätholzanteil zunimmt. Bei ringporigen Hölzern (ring porous) verhält es sich genau andersherum. Bei zerstreutporigen Hölzern (diffuse porous) ist eine geringfügige Erhöhung zum Mark hin zu erwarten. Für die verschiedenen Holzarten gibt Abbildung 74 Dichteprofile an. Einzelne Bäume können sich im Dichteprofil unterscheiden. Dafür bieten sich Vergleichs Bohrungen an. Die Dichteunterschiede zwischen dem Früh- und Spätholz (siehe Tabelle 7) bilden die typischen Amplitudenverläufe aus (Abbildung 75). Ab einer Jahrringbreite unter 1 mm, die bei Nadelhölzern aufgrund des Alterstrendes im äußeren Bereich häufiger vorkommt, werden die Jahrringgrenzen nicht mehr oder nur teilweise abgebildet. Grund dafür ist, dass sich der drei Millimeter breite Bohrkopf gleichzeitig innerhalb des Spät- und des Frühholzes

¹¹⁴ Baron (2009), S. 53

befindet. Das ist einer der Gründe, warum sich das Bohrwiderstandsmessgerät nicht für die dendrochronologische Untersuchung von Hölzern eignet.

Bei ring- und halbringporigen Hölzern wird im Kernbereich die Jahrringerkennung schwierig. Dort sind durch die Vertyllung der Tracheen die Amplituden weniger stark ausgeprägt¹¹⁵. Bei zerstreutporigen Hölzern gibt es kaum Dichteunterschiede innerhalb eines Jahrrings, wodurch nahezu keine Amplituden entstehen.

3.2.2.2 Holzfeuchtigkeit

Mit zunehmender Holzfeuchte steigt bei Hölzern bis zu einer Darrdichte von 1,2 g/cm³ die Rohdichte mit der Holzfeuchte an. Dabei steigt der Bohrwiderstand mit der Holzfeuchte an⁴⁸. Die Schnittleistung P_S nimmt zwar mit der Feuchte ab, dafür steigt Aufwand der Spannverdrängung P_V stark an¹¹⁶.

Die Dichteunterschiede zwischen Spät- und Frühholz nehmen bei steigender Feuchte ab, was eine Verringerung der Amplitudenausbildung zur Folge hat⁴⁹. Frühholzzonen nehmen durch ihren größeren Porenanteil mehr Wasser auf, als das Spätholz, wodurch sich die Dichte angleicht.

3.2.2.3 Äste und Risse

Äste lassen sich durch den erhöhten Bohrwiderstand ab einer Größe von ca. 20 mm eindeutig identifizieren¹¹⁷. Dabei bildet sich die Dichteerhöhung deutlich im Bohrprofil ab. Kleinere Äste werden beim Bohren im Regelfall nicht erfasst, da die Wahrscheinlichkeit groß ist vorbei zu bohren. Nach den Sortierkriterien der DIN 4074 spielen kleine Äste bei der Festigkeit sowieso eine untergeordnete Rolle.

Risse sind durch einen plötzlichen Abfall und späteren Wiederanstieg des Bohrprofils erkennbar. Dabei zeigt Abbildung 76, dass Risse bzw. Delaminationen eines verklebten Trägers ab einer Größe von 0,36 mm erkannt werden können. Der Träger wurde dafür mit definierten Abstand der Lamellen durchbohrt. Ab einer Rissgröße von 0,36 mm ist der Profilabfall deutlich zu sehen.

3.2.2.4 Holzschädigung

Bei Innenfäulen tritt häufig am Rand eine Erhöhung des Bohrwiderstandes auf, bevor der Widerstand abfällt¹¹⁸ (Abbildung 77). Die Grenzlinie setzt sich dabei meist durch einen dunklen Rand ab. Der Übergangsbereich entsteht durch das Füllen der Fasern mit amorphen, granulären und tropfenförmigen Substanzen. Dabei bilden sich vergleichsweise harte Melanine¹¹⁹. Abbildung 78a) zeigt ein weiteres Beispiel für den Bohrwiderstandsanstieg an einer Abschottungszone und 77b) Raster- Elektronen- Mikroskop (REM) Aufnahmen der Übergangszone. Darin erkennt man bei der rechten REM Aufnahme die eingelagerten Stoffe. Abbildung 79 zeigt REM Aufnahmen für den Übergangsbereich bei Esche.

¹¹⁵ Eckstein und Saß (1994), S. 281

¹¹⁶ Baron (2009), S. 49

¹¹⁷ Tobisch und Mittag 1998, zitiert in Baron (2009), S. 49

¹¹⁸ Eckstein und Saß (1994), S. 284

¹¹⁹ Baron (2009), S. 50

3.2.2.5 *Bohrtrend*

Zu Beginn der Bohrung wird das Bohrmehl ohne großen Widerstand aus dem Bohrloch befördert. Mit zunehmender Tiefe wird das Bohrmehl verdichtet und erhöht damit die Reibung am Bohrschaft. Je weiter die Bohrung eindringt, desto mehr steigt das Bohrniveau an. Diese Erhöhung wird Bohrtrend genannt. Der Bohrtrend ist dabei immer abhängig von dem Prüfkörper. Er kann bei dichten Hölzern, Ästen oder Verläufen überlagert werden. Um den Bohrtrend quantifizieren zu können, kann von der Gegenseite gebohrt werden. Dadurch lässt sich die Laufleistung $P_R(x)$ erkennen.

3.2.2.6 *Abnutzung*

Die Bohrspitze verliert mit steigender Anzahl der Bohrungen an Schärfe. Durch diese Abnutzungserscheinung erhöht sich der Anteil der Schnittleistung P_S , wodurch das Bohrniveau ansteigt. Zudem verliert die Bohrspitze ihre Form, wodurch ein Verlaufen des Bohrers wahrscheinlicher wird. Durch den Verschleiß lässt zusätzlich die Genauigkeit der Messung nach. Die Anzahl der möglichen Bohrungen ist abhängig vom durchbohrten Material. Der Hersteller Rinntech spricht bei gehärteten Bohrern von ca. 100 – 200 Bohrungen in Nadelholz oder 100 Bohrungen in Hartholz. Bei nicht gehärteten Bohrern reduziert sich die Menge um die Hälfte.

Um den Einfluss der Abnutzung zu überprüfen, sind mit einer gehärteten Nadel Bohrungen in eine MDF-Platte durchgeführt worden. Dabei wurde jeweils die gesamte Bohrlänge von ca. 40 cm gebohrt. Nach jeweils 5 Bohrungen in der MDF-Platte wurde durch einen Kalibrierungsblock gebohrt. Abbildung 80 zeigt die durch den Bohrwiderstand ermittelte Rohdichte der MDF-Platte in Abhängigkeit der Bohrungsanzahl. Über alle 61 Bohrungen hinweg ergab sich der Mittelwert von 543 kg/m^3 mit einer Standardabweichung von 30 kg/m^3 (5,5 %). Die Messungen des Kalibrierungsblocks gibt Abbildung 81 an. Dabei ergab sich über die elf Kalibrierungsmessungen eine Standardabweichung von 5,6 %. Der Kalibrierungsblock besteht aus mehreren Holzbrettstücken, die radial durchbohrt werden.

Aus den Diagrammen lässt sich erkennen, dass die Bohrerabnutzung nach den knapp 2100 cm Bohrweg das Ergebnis kaum beeinflusst. Die Standardabweichungen bei MDF-Bohrungen bewegen sich bei je zehn Bohrungen zwischen 0,9 % und 7,9 %. Dabei steigt die Standardabweichung nicht mit der Bohrungsanzahl an, sondern schwankt. Bei Betrachtung des Punktdiagrammes lassen sich einige Ausreißer bei der Messung ausmachen. Daraus lässt sich für die Praxis schließen, dass immer mehrere Messungen am selben Holz vorgenommen werden müssen, um einen größeren Messfehler zu verringern.

3.2.2.7 *Verdrillung*

Durch die Länge des Bohrschaftes wird ein Teil der aufgebrachten Rotationsenergie des Motors in die Verdrillung des Bohrschaftes umgewandelt. Vor allem zu Beginn der Bohrung oder bei großen Dichteerhöhung wird zuerst der Schaft wie eine Feder tordiert, bis die nötige Schnittleistung an der Spitze freiwerden kann. Ist der Bereich der erhöhten Dichte durchlaufen, wird die gespeicherte Rotationsenergie wieder frei. Die zusätzlich aufzubringende Energie sinkt dabei für einen kurzen Zeitraum¹²⁰. Besonders in sehr dichtem Holz beeinflusst die Verdrillung Messergebnisse.

¹²⁰ Baron (2009), S. 50

3.2.2.8 *Verlaufen*

Beim Auftreffen der Bohrspitze auf Unregelmäßigkeiten im Holz kann der Bohrer verlaufen. Dabei kann es sich um Äste, Reaktionsholz oder einer Abweichung vom radialen in den tangentialen Bereich handeln. Durch die Krümmung erhöht sich die Laufleistung $P_R(x)$ und es verstärkt sich der Bohrtrend. In Abbildung 82 verläuft der Bohrer von der radialen in die tangentiale Richtung. Dies kann bei einem schrägen Auftreffwinkel auf den dichteren Spätholzanteil geschehen, wodurch der Bohrer innerhalb des weniger dichten Frühholzanteiles weiterläuft.

3.2.2.9 *Beispielhafte Bohrdiagramme*

Nachfolgend werden mehrere Bohrprofile in ihrer Ausprägung beschrieben.

Die meisten Bohrungen wurden in der Dominikanerkirche in Bamberg an, aufgrund von Schäden, ausgebauten Bauteilen vorgenommen. Weitere Bohrungen wurden an den Balken der Biegeprüfung vorgenommen.

Abbildung 83 zeigt ein eichenes Kantholz mit starker Schädigung durch Insektenbefall. Im Querschnitt ist deutlich zu sehen, dass die Markstrahlen noch vorhanden sind, die weitere Holzsubstanz aber weitestgehend zerstört ist. Im Bohrprofil zeichnet sich der geschädigte Bereich durch ein abfallen des Graphen ab.

Abbildung 84 zeigt einen Deckenbalken, dessen unterer Bereich mit ca. 2 mm großen Fraßgängen übersät ist. Am Bohrprofil erkennt man einen Bohrwiderstandsabfall (grüner Pfeil), wenn der Bohrer auf einen Fraßgang trifft. Abbildung 85 zeigt einen Nadelholz-Querschnitt mit ausgeprägter Innenfäule. Die Bohrprofile fallen im Innenfäulnisbereich nahezu auf null. Ein Anstieg im Randbereich der Innenfäule, wie in Kapitel 3.2.2.4, kann hier nicht beobachtet werden.

Abbildung 86 und 87 zeigen, wie mithilfe des Bohrwiderstandsmessgerätes versteckte Verbindungen wie Zapfenverbindungen untersucht werden können. Der Sparren wurde nach dem Bohren herausgenommen. Es lässt sich erkennen, dass der Zapfen auf der linken Seite im Zapfenloch Spiel hat, rechts sitzt er nahe an der Wand. Bei der seitlichen Aufnahme wurde die Lage des Zapfenloches angezeichnet und drei Bohrungen vorgenommen, um festzustellen, wie tief der Zapfen in das Zapfenloch hineinragt. Bei dem Profil R 055 erkennt man, dass die Bohrnadel nicht mehr oder nur geringfügig den Zapfen gestreift hat. Der Zapfen liegt also nicht an der unteren Spitze im Zapfenloch auf.

Wie die Untersuchung eines geschädigten Zapfens aussieht, zeigen die Abbildungen 88, 89 und 90. Es handelt sich wieder um einen Sparrenfußpunkt, hier jedoch mit geschädigtem Zapfen und Zapfenloch. Wie zuvor wurden, um die Lage des Zapfens bestimmen zu können, zwei seitliche Bohrungen vorgenommen. Die obere Bohrung R 057 zeigt die Lage des Zapfens als links an der Wand sitzend und rechts mit Spiel. Es fällt auf, dass der Teil des Bohrprofiles im Dachbalken zum Zapfenloch abfällt, was mit einem Masseverlust infolge von Pilzen zusammenhängen kann. Deutlicher wird dies auf der linken Seite des Profils R 058. Dort zeigt sich auch die Schädigung des Zapfens durch das niedrigere Profil.

Abbildung 91, 92, 93 und 94 zeigen einen Nadelholz- Dachbalken mit Innenfäule. Dabei ist von der Seite keine Schädigung zu erkennen. Von oben lässt sich die fortgeschrittene Schädigung im Zapfenloch erkennen. Die Bohrprofile lassen einen Massenverlust im inneren Holzbereich über die gesamte Bauteillänge erkennen. R 060 bohrt durch das leere Zapfenloch und lässt erkennen, dass die Flanken ebenfalls geschädigt sind.

3.3 Impulstomograph

Mit dem Impulstomographen lassen sich zwei Verfahren anwenden. Zum einen können Tomogramme (virtuelle Schnitte) durch das Holz gelegt werden, um innere Schäden zu erkennen, zum anderen kann die Schalllaufzeit in Längsrichtung gemessen werden. Im Kapitel 2.2.7.4 Verfahren sind beide Methoden erklärt. Die nachfolgende Erklärung über die praktische Handhabung umfasst beide Methoden. Abbildung 95 zeigt die Bestandteile des Impulstomographen ARBOTOM von RINNTECH. Er besteht aus dem Akkupack, Erschütterungssensoren, Laptop und den Verbindungskabeln.

3.3.1 Gerätehandhabung

Für die Messung müssen lediglich Sensoren am Holz befestigt werden. Dafür werden Nägel in das Holz eingetrieben und die Erschütterungssensoren daran festgeschraubt. Bei den Nägeln muss auf den Winkel geachtet werden. Abbildung 53 zeigt die Abhängigkeit der Schalllaufzeit vom Winkel zwischen Nagel und Holzfaser. Das ist auch der Grund, warum die direkte Schalllaufzeitmessung (im Hirnholz) der Idealfall ist. Für die indirekte bzw. halbdirekte Messung gilt praktisch, die Nägel so flach wie möglich einzutreiben. Dabei ergibt sich in der Regel ein Winkel um die 30°. Im Winkel von 90° werden die Nägel nur für Schalltomogramme eingeschlagen, dabei interessiert weniger die absolute, als die relative Schallgeschwindigkeit untereinander. Bei der Überprüfung, ob es sich bei einem verdeckten Balken um einen Durchlaufträger handelt, können die Nägel ebenfalls im Winkel von 90° eingeschlagen werden. Abbildung 96 zeigt beispielhaft für den auf Biegung geprüften Fichtenbalken Nr. 18 wie sich die verschiedenen Ankopplungsarten in der Schallgeschwindigkeit unterscheiden. Dabei lässt sich erkennen, dass die direkt und indirekt gemessene longitudinale Schallgeschwindigkeit nahe beieinander liegt. Die Geschwindigkeit bei im 90° Winkel angekoppelten Sensoren in Longitudinalrichtung beträgt noch knapp ein Drittel.

3.3.2 Fehlerquellen

- Der Nagel sitzt nicht fest.
- Der Sensor ist nicht auf dem Nagel festgeschraubt.
- Die Sensoren sind in der falschen Reihenfolge verkabelt. Dies lässt sich über die Lampe am letzten Sensor, sie muss gelb leuchten, erkennen.
Des Weiteren müssen beim ersten Impuls alle Sensoren Daten an den PC abgeben.
- Die Kabel zwischen den Sensoren sind gespannt, so dass die Schwingung über das Kabel und nicht über das Holz übertragen wird.

3.4 Messungenauigkeit

3.4.1 Allgemeines

Die Qualität der Festigkeitsabschätzung von Hölzern wird nicht nur von der Korrelation der Sortierparameter mit der Festigkeit bestimmt. Die Genauigkeit unter praktischen Einsatzbedingungen beeinflusst maßgeblich mit. Die verschiedenen Messfehler addieren sich dabei zu einem gesamten Messfehler.

Es ist zwar in der Regel möglich, die Messgenauigkeit durch aufwendigere Messungen zu verbessern, doch bringt die Erhöhung der Messgenauigkeit oft nur noch eine geringe Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit.

Es wird in den folgenden Abschnitten versucht, die Messungenauigkeiten der verwendeten Verfahren abzuschätzen.

3.4.2 Messfehler bei Querschnittsmessungen

Querschnitte von per Hand bearbeiteten Balken haben selten an jeder Stelle exakt dieselben Querschnittsmaße. Teilweise sind Balken auch abholzig behauen und damit am Zopfende dünner. Die Querschnittsmaße von Balken werden in der Regel mit dem Gliedermaßstab genommen. Oft besitzen historische Balken keine scharfen Kanten, was die Ablesung erschwert. Meist wird bei Messung deswegen auf einen oder einen halben Zentimeter geschätzt. Bei der Messung der Baumkante wird ebenfalls die Größe in dieser Genauigkeit abgeschätzt. Je kleiner der gemessene Querschnitt, desto größer der Fehler.

Bei dem Beispiel eines Balkens mit $h/b = 15/15$ cm bedeutet dies, dass anstatt 225 cm^2 Querschnittsfläche und einem Widerstandsmoment von $562,5 \text{ cm}^3$, bei einem Messfehler von 1 cm ($h/b 14/14$ cm), nur 196 cm^2 Querschnittsfläche und ein Widerstandsmoment von $457,3 \text{ cm}^3$ vorhanden wären. Das sind bei der Fläche nur noch 87 % und im Widerstandsmoment 81 %. Dabei gilt natürlich, je größer der Querschnitt, desto geringer der prozentuale Fehler und umgekehrt. Nach DIN 4074 sind bei 10 % der Querschnitte eine Querschnittsabweichung von 10 % zulässig¹²¹.

3.4.3 Messfehler bei Rohdichte über Bohrwiderstand

Bei der Ermittlung der Rohdichte über den Bohrwiderstand ist zu beachten, dass auch die Rohdichte über den Stamm, wie auch die Entfernung zum Mark beträchtlich schwankt. In der Praxis müssen daher von einem Balken im betrachteten Bereich an mehreren Stellen Bohrungen vorgenommen werden, um einen Mittelwert zu erhalten. Der Messfehler der Rohdichteermittlung ist abhängig von der Kalibrierung des Gerätes. In der Regel wird der Fehler unter 10 % liegen.

3.4.4 Messfehler bei Ermittlung der Schalllaufzeit

Bei Ermittlung der Schalllaufzeiten ergaben sich in den eigenen Messungen von 21 Balken mit je mindestens zwei unabhängigen Messungen ein Variationskoeffizient¹²² von 3,8 %. Praktisch kann von etwa 5 % ausgegangen werden.

3.4.5 Messungenauigkeit im dynamischen E- Modul

Da bei der Berechnung des dynamischen E- Moduls sowohl die Messfehler der Rohdichte, wie auch die Messfehler der Schalllaufzeit eingehen, erhöht sich die Ungenauigkeit. Das dynamische E- Modul lässt sich dabei nach der Formel: $E_{dym} = \rho * v^2$ berechnen. Die Messungenauigkeit insgesamt beträgt damit $\Delta = 5 \% + 7 \% + 7 \% = 19 \%$ bei der Annahme eines Messfehlers am Bohrwiderstand von 7 %. Als Beispiel liegt bei einem errechneten

$E_{dym} = 15\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, das eigentliche dynamische E- Modul zwischen $12\,150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und $17\,850 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Wenn dazu das Bestimmtheitsmaß (R^2) zur Biegefestigkeit von 30 % bis 55 % berücksichtigt wird, ergibt sich eine relativ große Unsicherheit. Die Ungenauigkeit beträgt damit zwischen 64 % bis 89 % bei der Bestimmung des E- Moduls.

Bei den genannten Werten handelt es sich um den ungünstigsten Fall. In der Regel wird die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Kennwerte geringer sein.

¹²¹ DIN 4074-1:2012-06, 7.3.2

¹²² Der Variationskoeffizient ist in Kapitel 4.4 erklärt.

4 Biegeversuch

4.1 Allgemeines

Um die Vorhersagefähigkeit der Festigkeit mit den in den vorherigen Kapiteln benannten Verfahren zu überprüfen, wurden 21 Balken in einem Vierpunkt-Biegeversuch bis zum Bruch belastet. Der Versuch wurde nach DIN EN 408¹²³ durchgeführt. Dabei wurden Balken mit einem Alter von über 100 Jahren verwendet. Zwölf Balken wurden mit einer Querschnittsabmessung $h/b = 10/10$ cm und Spannweite 160 cm bis 180 cm geprüft. Die weiteren neun Balken wurden in originaler Querschnittsabmessung ab h/b 14/13,5 cm und Spannweiten zwischen 200 cm und 300 cm bis zum Bruch belastet. Die Balken sind dabei entweder aufgrund von teilweiser Schädigung bei Sanierungen oder aufgrund von Gebäudeabrissen ausgebaut worden. Neun Balken hatten dabei eine starke Schädigung, zwölf Balken waren ohne größere Schädigungen. An sieben Balken wurde eine Lastabhängigkeit der Schalllaufzeit überprüft. Die Biegeprüfungen wurden im Baustofflabor der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg – Schweinfurt durchgeführt. Im Anhang 2 finden sich die Daten der geprüften Hölzer.

4.2 Versuchsdurchführung

Randbedingungen für die Versuchsdurchführung:

- Auflagerung auf zwei gelenkig gelagerten Auflagern.
 - Lasteinleitung über eine Stahltraverse mit gelenkiger Lasteinleitung an zwei Punkten
 - Belastung des Prüfkörpers bis zum Bruch (entspricht einem Kraftabfall von 50 % bezogen auf die maximale Prüflast)¹²⁴.
 - Nach dem Ende des Versuches wurde der Bruch durch weitere Belastung aufgeweitet.
 - Weggesteuerte Lasteinleitung mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ($\max. v = 0,003 \cdot h$ [mm/s], h = Höhe des Prüfkörpers), Versagen tritt innerhalb von $t = 300s \pm 120 s$ ein. Die Zeit bis zum Bruch ist angegeben, wenn keine Laststufen gefahren wurden.
(Bei den Balken, an denen eine Lastabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit überprüft wurde, wurde in 10 kN Schritten die Verformung konstant gehalten, um die Schalllaufzeit messen zu können.)
 - im Vorfeld wurde an den Balken direkt und indirekt die Schalllaufzeit gemessen.
 - Die Rohdichte wurde mit dem Bohrwiderstandsgerät ermittelt.
-
- Bei Balken 21 wurden externe Wegaufnehmer in Balkenmitte angebracht, um den Kolbenweg zu überprüfen. Der Bruch wurde anschließend nicht aufgeweitet.

Abbildung 97 zeigt den nach DIN EN 408 geforderten Versuchsaufbau zur Messung des globalen Biege- Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit.

Die Prüflast wurde mit einem hydraulischen Druckzylinder (maximale Prüflast 500 kN) aufgebracht. Die Durchbiegung der Probe wurde über den Verfahrensweg des Kolbens gemessen. An einem Balken wurde der Kolbenweg mit zwei unabhängigen Wegaufnehmern überprüft. Der Versuchsaufbau im Labor zeigt Abbildung 98. Durch die aufgenommen Last- Verformungswerte kann das statische Elastizitätsmodul ($E_{m,stat}$) und die Biegebruchfestigkeit (f_m) nach DIN EN 408:2012 berechnet werden.

¹²³ DIN EN 408:2012-10, Abschnitt 19

¹²⁴ Linke, Rug und Pasternak (2018), S. 204

$$E_{m,stat} = \frac{3a_2 l^2 - 4a_2^3}{2bh^3 * \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a_2}{5Gb h}\right)} \quad \text{Gl. 17}$$

$E_{m,stat}$ statisches, globales Biege – Elastizitätsmodul $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
 a_2 Abstand zwischen der Lasteinleitung und dem nächsten Auflager [mm]
 l Abstand zwischen den Auflagern [mm]
 b Breite des Prüfkörpers [mm]
 h Höhe des Prüfkörpers [mm]
 F_i Last [N]
 w_i Verformungszunahme entsprechend F_i [mm]
 G Schubmodul,
 bei $\frac{l}{h} = 18 \pm 3$ gilt: $G = \text{unendlich}$ ansonsten für Nadelholz $G = 650 \frac{N}{mm^2}$

Die Formel der Biegefestigkeit lautet:

$$f_m = \frac{3Fa_1}{bh^2} \quad \text{Gl. 18}$$

f_m Biegefestigkeit $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
 F maximale Prüflast [N]
 a_1 Abstand zwischen der Lasteinleitung [mm]
 b Breite des Prüfkörpers [mm]
 h Höhe des Prüfkörpers [mm]

Die Formel der Dehnung (ϵ) lässt sich mit Umformen der beiden oberen Formeln ermitteln.
 Dabei gilt $G = \text{unendlich}$, $F_{max} = F_2 - F_1 = \Delta F$ und $a_2 = \frac{1}{3} l$.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Gl. 19}$$

E Elastizitätsmodul $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
 σ Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
 ϵ Dehnung [‰]

$$\epsilon = \frac{\Delta F l}{bh^2} * \frac{4 * bh^3 * \frac{\Delta w}{\Delta F}}{3a_2 l^2 - 4a_2^3} = \frac{\Delta F l}{bh^2} * \frac{4 * bh^3 * \frac{\Delta w}{\Delta F}}{l^3 - 4\left(\frac{1}{3}l\right)^3} = \frac{4,696 * \Delta w * h}{l^2} \quad \text{Gl. 20}$$

Nach DIN EN 384:2016¹²⁵ muss das gemessene Elastizitätsmodul auf die Bezugsholzfeuchte von 12 % umgerechnet werden. Bei $\omega > 18 \%$ wird $\omega = 18 \%$ eingesetzt.

$$E_{0,12} = E_{0,\omega} (1 + 0,01(\omega - 12 \%))$$

Gl. 21

$E_{0,12}$ Elastizitätsmodul bei $\omega = 12 \%$
 $E_{0,\omega}$ Elastizitätsmodul bei $\omega \neq 12 \%$
 ω Holzfeuchte in %

Die Rohdichte der Biegeprüfkörper wurde mit dem Bohrwiderstandsmessgerät ermittelt. Die Rohdichte lässt sich auch gravimetrisch nach DIN EN 408:2012 messen. Dafür wird eine Holzprobe entnommen und das Volumen und die Masse ermittelt. Die Rohdichte wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\rho_{\omega} = \frac{m_{\omega}}{V_{\omega}}$$

Gl. 22

ρ_{ω} Rohdichte der Probe bei der Feuchte ω
 m_{ω} Masse der Probe bei der Feuchte ω
 V_{ω} Volumen der Probe bei der Feuchte ω

Nach DIN EN 384:2016¹²⁶ wird die Rohdichte umgerechnet auf die Bezugsholzfeuchte von $\omega = 12 \%$. Die Formel gilt unterhalb des Fasersättigungsbereiches.

$$\rho_{12} = \rho_{\omega} * (1 - 0,005(\omega - 12))$$

Gl. 23

ρ_{12} Rohdichte bei $\omega = 12 \%$
 ρ_{ω} Rohdichte bei $\omega \neq 12 \%$
 ω Holzfeuchte in %

Die Messungen der Holzfeuchte erfolgen mittels elektrischer Widerstandsmessung nach DIN EN 13183-2¹²⁷ mit dem Messgerät Hydromette M2050 von GANN. Je Prüfkörper wurden dabei drei Messungen vorgenommen. Zusätzlich wurde ein Klimamessgerät verwendet, um die Umgebungstemperatur und Feuchte zu messen.

4.3 Prüfkörperauswertung

Alle Daten zu den Prüfkörpern finden sich in Anhang 2.

Die Prüfkörper wurden alle nach visuellen Sortierkriterien der DIN 4074-1 (Nadelholz) bzw. DIN 4074-5 (Laubholz) sortiert. Auffallend ist dabei der große Anteil von nicht einsortierbaren Hölzern aufgrund von Pilzschädigung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Hölzer bei Instandsetzungsmaßnahmen aus den Gebäuden entnommen wurden und dementsprechend geschädigte Hölzer dabei waren.

Die Balken mit Querschnittsmaß von etwa 10/10 cm wurden aus größeren Balken herausgeschnitten. Dabei wurde versucht von allen Seiten gleichmäßig den Querschnitt zu verringern.

¹²⁵ DIN EN 384:2016, 5.4.2

¹²⁶ DIN EN 384:2016, 5.4.2

¹²⁷ DIN EN 13183-2:2002-07

Die gemessenen Holzfeuchten sind zwischen 15 % und 25 %. Abbildung 99 und 100 zeigen beispielhaft, wie die Balken visuell sortiert wurden. Es wurden die im Kapitel 2.2.8 Holzgütesortierung aufgeführten Merkmale aufgenommen. Balken 2 konnte in die Sortierklasse S 10 und Balken 3 in die Klasse S 7 eingegliedert werden. Vor allem bei Balken drei ist Auffällig, das auf der unteren Seite große Äste vorkommen. Nach der Biegeprüfung wurden die Bruchstellen aller Balken von allen Seiten fotografiert. Zusätzlich wurden die Balken an den Stellen der Bohrwiderstandsmessungen aufgesägt, um mögliche Fehlstellen zu erkennen. Nachfolgend sind einige besondere Bruchbilder aufgeführt, alle Bilder finden sich auf der beigelegten CD. Abbildung 101 zeigt Balken 6 von der Seite mit dem zugehörigen Querschnitt. Der Bruch läuft entlang der Jahrringgrenze, was auf eine verdeckte Ringschäle hindeutet. Abbildung 102 zeigt den Bruch von Balken 8 von unten mit seinem Querschnitt. Dabei ist ersichtlich, dass die Zugzone an den beiden Kantenästen versagt hat. Ein Versagen der Druckzone zeigt Abbildung 103 an Balken 14. Er ist im oberen Bereich Braunfäulnisgeschädigt und hat somit bereits eine reduzierte Festigkeit. Mit Überschreiten der noch vorhandenen Druckfestigkeit sind die Fasern ausgeknickt, was die Ausbauchung nach oben erklärt. Befallsschaden vom gewöhnlichen Nagekäfer zeigt Balken 18 (Abbildung 104). Durch den Befall wurde der Querschnitt in den hochbelasteten äußeren Fasern reduziert, was zu plötzlichen Zugversagen führte.

4.4 Ergebnisdiskussion

Um die Ergebnisse der Biegeprüfung interpretieren zu können, werden nachfolgend kurz die für die Auswertung relevanten statistischen Grundlagen zusammengefasst. Anschließend beginnt die Ergebnisdarstellung.

4.4.1 Statistische Grundlagen

Bei der Regressions- und Korrelationsanalyse wird der Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen Variablen untersucht, mit dem Ziel, Vorhersagen treffen zu können. Für die Interpretation der Zusammenhänge stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Nachfolgend werden einige vorgestellt¹²⁸.

4.4.1.1 Korrelationskoeffizient (r)

Der Korrelationskoeffizient gibt an, wie groß der prozentuale Anteil der Werte ist die durch einen linearen Zusammenhang erklärt wird. Er kann dabei Zahlen zwischen -1 und 1 einnehmen. Dabei gilt bei 0 besteht kein Zusammenhang. Je mehr sich der Wert -1 oder 1 annähert, desto wahrscheinlicher ist die lineare Abhängigkeit. Abbildung 105 zeigt vier Beispiele eines Streudiagrammes mit dem zugehörigen Korrelationskoeffizienten. Die Aussage des Korrelationskoeffizienten ist ohne das zugehörige Streudiagramm ungenügend. Abbildung 106 zeigt für $r = 0,8$ vier Datensätze, wobei nicht alle einen linearen Zusammenhang besitzen.

Die Gleichung für den verwendeten Korrelationskoeffizienten lautet:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad \text{Gl. 24}$$

r Pearsonsche Korrelationskoeffizient
 \bar{x}, \bar{y} Mittelwerte der x bzw. y Daten

¹²⁸ Berghold, Pflieger (2014, 23. Juni), Reinboth (2016, 7. November)

4.4.1.2 Bestimmtheitsmaß (R^2)

Das Bestimmtheitsmaß lässt sich einfach aus der Quadrierung des Korrelationskoeffizienten (r) berechnen. Dabei kann es Werte zwischen 0 und 1 einnehmen. Wie beim Korrelationskoeffizienten gilt: je größer der Wert, desto besser lässt sich die abhängige von der unabhängigen Variablen erklären.

$$R^2 = r^2 \quad \text{Gl. 25}$$

R^2 Bestimmtheitsmaß
 r Korrelationskoeffizient

4.4.1.3 Varianz (s^2)

Die Varianz errechnet „quasi das arithmetische Mittel der Differenzen aller Werte vom arithmetischen Mittel, oder anders formuliert, die durchschnittliche Abweichung der Werte vom Zentrum der Verteilung“¹²⁹. Dabei werden die Differenzen quadriert, wodurch sich das Ergebnis schlechter interpretieren lässt. Bei Streckenmessungen in Meter würde die Varianz in m^2 angegeben, was zu Fehlinterpretationen führen kann, da es sich dabei nicht um eine Fläche handelt.

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad \text{Gl. 26}$$

s^2 Varianz
 \bar{x} Mittelwert der Stichprobe
 n Stichprobenumfang

4.4.1.4 Standardabweichung (s)

Die Standardabweichung ist die positive Wurzel der Varianz (s^2). Dadurch werden die zuvor genannten Probleme bei der Varianz aufgehoben.

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{Gl. 27}$$

s Standardabweichung
 s^2 Varianz

4.4.1.5 Variationskoeffizient (v)

Der Variationskoeffizient errechnet sich, indem man die Standardabweichung durch das zugehörige arithmetische Mittel dividiert. Dadurch erhält man ein dimensionsloses Maß der Variationen, durch das ein Vergleich mit anderen Messungen möglich ist.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Gl. 28}$$

v Variationskoeffizient
 s Standardabweichung
 \bar{x} Mittelwert der Stichprobe

¹²⁹ Reinboth (2016, 7. November)

4.4.2 Auswertung

In der Auswertung sind verschiedene Eigenschaften miteinander verglichen und das Bestimmtheitsmaß errechnet worden. Tabelle 21 fasst alle ermittelten Korrelationen zusammen. Im Anhang 2 finden sich die Spannungs- Dehnungsdiagramme der Prüfbalken abhängig von der visuellen Sortierung nach DIN 4074 an. In die Diagramme sind die Grenzen der Festigkeitsklassen eingetragen. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Nadelhölzer mit hoher Tragfähigkeit (Abbildung A2-8), sind Stufen im Linienverlauf zu erkennen. Die Stufen im Diagramm stammen von den Pausen mit konstanter Verformung, in denen die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Last gemessen wurden.

Die Gegenüberstellung von dem nach Gl. 17 ermittelten statischen Elastizitätsmodul zur Biegefestigkeit findet sich in Abbildung 107. Das Bestimmtheitsmaß zwischen den beiden Eigenschaften liegt bei $R^2 = 53,8 \%$. Vergleichswerte aus der Literatur liegen bei Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 38,4 \%$ bis $86,5 \%$ ¹³⁰. Die ermittelte Regression liegt somit im Erwartungsbereich. Im Allgemeinen ist das ermittelte statische Elastizitätsmodul dennoch relativ niedrig (vergleiche Tabelle 10). Erklärungsversuche finden sich im Kapitel 4.4.3 Fehlerdiskussion. Noch deutlicher fällt das Ergebnis bei dem Vergleich des statischen zum mittleren dynamischen E- Modul aus (Abbildung 108). Für direkte Schalllaufzeitmessungen lässt sich $R^2 = 28 \%$ und für die indirekte Messung mit lediglich $R^2 = 18 \%$ angeben. Im Diagramm ist erkennbar, dass die Regressionsgerade sehr flach verläuft. Das dynamische E-Modul sollte dabei lediglich 10 % bis 20 % über dem statischen liegen. Bei den Versuchsergebnissen ist es teilweise doppelt so groß wie die statisch ermittelten Werte. In seiner Größenordnung ist das dynamische E- Modul aber plausibel.

In Abbildung 109 sind die mittleren Biegefestigkeiten je Festigkeitssortierung angegeben. Wie erwartet, steigt mit der Sortierung auch die mittlere Biegefestigkeit. In Abbildung 110 sind die Messdaten als Punkte aufgelöst. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 58 % korreliert die visuelle Sortierung recht hoch mit der Biegefestigkeit.

Abbildung 56 und 111 stellen die direkten den indirekten Schallgeschwindigkeiten gegenüber. Abbildung 56 zeigt dabei ein Balkendiagramm der mittleren Geschwindigkeiten mit der Standardabweichung. Es lässt sich dabei erkennen, dass die indirekt gemessene Laufzeit immer geringer als die direkte ist. Im Streudiagramm (Abbildung 111) werden jeweils der Mittel-, Höchst- und Niedrigstwert unterschieden. Tabelle 19 gibt die Bestimmtheitsmaße (R^2) für die Korrelation zwischen den direkt und indirekt gemessenen Schallgeschwindigkeiten an. Vor allem die Mittel- und Höchstwerte eignen sich für den Vergleich untereinander. Aber selbst bei der Kombination von Mittel- und Höchstwert gibt es mit einem Bestimmtheitsmaß von 70,8 % noch einige indirekte Laufzeiten, die sich nicht aus den direkten ermitteln lassen. Beim Vergleich mit Literaturwerten muss also auf die Messmethode geachtet werden.

Bestimmtheitsmaß (R^2)	Niedrigstwerte	Mittelwerte	Höchstwerte	Mittel- + Höchstwerte
Direkte zur indirekten Schallgeschwindigkeit	54,5 %	64,9 %	60,2 %	70,8 %

Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße für die Korrelation zwischen direkt und indirekt gemessener Schalllaufzeit

Da verbaute Hölzer in der Regel belastet sind, wurde an sieben Balken die Schalllaufzeit in Abhängigkeit von der Belastung gemessen. Dafür wurde während der Biegeprüfung in 10 kN-Schritten die Belastung konstant gehalten und die direkten Schalllaufzeiten gemessen. Es

¹³⁰ Nier (1994), S. 94

konnte in den Versuchen kein Zusammenhang zwischen der Biegebelastung und der Schallgeschwindigkeit erkannt werden. Die Schwankungen der Messwerte bewegen sich innerhalb der Messtoleranz. Tabelle A2- 5 gibt die Messdaten der Belastung mit zugehöriger Schallgeschwindigkeit wieder.

Bei dem Vergleich der Schalllaufzeiten zur Biegefestigkeit (Abbildung 112) konnte nur eine geringe Korrelation festgestellt werden, für direkt gemessene Mittelwerte 22 % und für die indirekt gemessenen Mittelwerte lediglich 6 %. Dieses Ergebnis zeigt, dass sich nur mit geringer Sicherheit lediglich über die Schallgeschwindigkeit auf die Biegefestigkeit schließen lässt. Eine Unterscheidung mit den einzelnen visuellen Sortierungen wurde unterlassen, da dafür die Prüfkörperanzahl zu gering ist. Tabelle 20 zeigt das Bestimmtheitsmaß für die Mittel-, Höchst- und Niedrigstwerte der Schalllaufzeit zur Biegefestigkeit für die eigenen Messungen und Literaturangaben. Die Tabelle lässt erkennen, dass sowohl die Mittelwerte, wie auch die Höchstwerte Tendenzen der Festigkeiten erkennen lassen, während die Niedrigstwerte völlig ungeeignet sind. Im Vergleich mit den Literaturwerten zeigt sich, dass das Bestimmtheitsmaß der indirekten Messung bei den eigenen Messungen zu niedrig sein muss. Dies ist auch dadurch plausibel, da die direkte und indirekte Schallgeschwindigkeit, wie oben beschrieben, korrelieren.

Bestimmtheitsmaß (R^2)	Mittelwert	Höchstwert	Niedrigstwert
Direkt gemessen	22 %	24 %	2 %
Indirekt gemessen	6 %	8 %	3 %
Linke ¹³¹ direkt gemessen	35 %	/	/
Linke ¹³¹ indirekt gemessen	29 %	/	/
Steiger ¹³² direkt gemessen	36 %	/	/

Tabelle 20: Bestimmtheitsmaß der Schallgeschwindigkeit zur Biegefestigkeit nach eigenen Messungen und Literaturangaben

Abbildung 113 stellt das dynamische E-Modul zur Biegefestigkeit in Korrelation. Dabei ergibt sich ein niedriges Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 19$ % für die direkte und $R^2 = 16$ % für die indirekte Messung. In der Literatur finden Werte von $R^2 = 30$ % bis $R^2 = 55$ %¹³⁰.

	Bestimmtheitsmaß (R^2)		Literaturwerte
Statischer E-Modul zu Biegefestigkeit	53,8 %		38,4 % bis 86,5 % ¹³³
Direkte zu indirekte Schallgeschw.	64,9 %		
Sortierklasse zu Biegefestigkeit	58 %		
	Direkt gemessen	Indirekt gemessen	
Statischer zu dynamischer E-Modul	28 %	18 %	55 % ¹³³
Schallgeschwindigkeit zu Biegefestigkeit	22 %	6 %	29 % bis 36 % ^{127 129 130}
Dynamischer E-Modul zu Biegefestigkeit	19 %	16 %	30 % bis 55 % ¹²⁹

Tabelle 21: Korrelation verschiedener Kennwerte zueinander

¹³¹ Linke, Rug und Pasternak (2018), S. 219

¹³² Steiger (1996), S. 30

¹³³ Nier (1994), S. 93

4.4.3 Fehlerdiskussion

Die Durchbiegung im Vierpunktbiegeversuch wurde über den Verfahrensweg des Hydraulikkolbens gemessen. Linke weist darauf hin, dass ab Lasten von 20 kN bis 30 kN ein signifikanter Unterschied zwischen dem Kolbenweg und der tatsächlichen Durchbiegung vorliegt¹³⁴. Bei Balken 21 wurden zur Kontrolle des Verfahrensweges zwei unabhängige Messfühler für die Durchbiegung angebracht. Bei einer Bruchlast von 11,97 kN tritt aber der von Linke genannte Effekt noch nicht auf, bei der Wegmessung wurde bei der Bruchlast eine Abweichung von 3 % zwischen den Messfühlern und dem Kolbenweg festgestellt. Die mit Messfühlern ermittelte Durchbiegung ist dabei größer. Bei umfangreicheren Bauteilprüfungen könnten Kalibrierkurven angelegt werden, bei denen die Durchbiegung und der Kolbenweg gemessen werden. Mit diesen Kalibrierkurven könnten die Messwerte angepasst werden. Der Unterschied vom Kolbenweg zur Verformung liegt an der der Durchbiegung zwischen den Lasteinleitungspunkten, die bei größeren Verformungen eine relevante Größenordnung erreicht. Der Versuch mit Balken 21 zeigt, dass zumindest für die kleinen Querschnitte mit niedriger Bruchlast kein Fehler vorliegt.

Da einige der Balken eine Schädigung durch Insektenbefall haben, wird der tatsächlich tragende Querschnitt kleiner. Abbildung 114 zeigt den Querschnitt des Balkens 1 neben der Bruchstelle. Dabei ist deutlich erkennbar, dass der Splintbereich mit Fraßgängen übersät ist und im oberen Bereich ein Eck fehlt. Die Brüche im oberen Bereich kommen durch die Biegebelastung. An Balken Nr. 1 wird beispielhaft der tragfähige Restquerschnitt bestimmt und damit die mechanischen Kennwerte neu berechnet. Abbildung 115 den Querschnitt mit Schädigung und mit Markierung des intakten Bereiches. Tabelle 22 stellt die Kennwerte des Balkens Nummer 1 für die vereinfachte Querschnittsfläche denen des Restquerschnittes gegenüber. Dabei zeigt sich, dass das statische E-Modul ansteigt, aber dennoch unter dem Erwartungswert zurückbleibt.

	Querschnitt h/b = 11/10 cm	Restquerschnitt
Fläche (A)	113 cm ²	91 cm ²
Widerstandsmoment um Y-Achse (W _y)	202 cm ³	160 cm ³
Biegefestigkeit (f _m) (Bruchlast 11,43 kN)	1,80 kN/cm ²	2,27 kN/cm ²
Dehnung (ε)	5,21 ‰	5,21 ‰
Stat. E-Modul	541 kN/cm ²	689 kN/cm ²
Dyn. E-Modul (Mittelwert)	1220 kN/cm ² (direkt) / 1171 kN/cm ² (indirekt)	

Tabelle 22: Balkennummer 1; Vergleich mechanischer Kennwerte bei vereinfachten Querschnittsmaßen zum tragfähigen Restquerschnitt. Stützweite in der Biegeprüfung betrug 180 cm.

Bei den großquerschnittigen Hölzern, war die Lasteinleitungsplatten zu gering dimensioniert. Die Platte hat sich in den Prüfkörper eingedrückt. Bei denen im Lasteinleitungsbereich braunfäulnisgeschädigten Balken Nr. 13 und 14 hat sich die Platte sogar 3 mm tief eingedrückt (Abbildung 116). Im Allgemeinen hat sich die Platte ca. 1 mm bei den Querschnitten über 11 cm / 11 cm am Auflager und der Lasteinleitung eingedrückt. Für Balken 13 wird der dadurch entstandene Fehler auf den E-Modul abgeschätzt. Die Verformung beim Bruch betrug 53,15 mm und somit beträgt der Anteil durch Verformung an den Platten etwa 9 %. Bei der Bestimmung des E-Moduls nach Gl. 20 wird bei 9 % geringer Verformung das E-Modul um 9 % größer. Diese Betrachtung gilt unter der ungünstigen Annahme, dass die Verformung rechtwinklig zur Faser direkt proportional zur aufgebrachten Last ist. Das Elastizitätsmodul wird zwischen 0,1 und 0,4 mal der Bruchlast bestimmt. In diesem Bereich wird die Verformung rechtwinklig zur Faser geringer als 9 % sein.

¹³⁴ Mündliche Information von Gunther Linke

Das niedrige statische Elastizitätsmodul lässt sich durch die Kombination der bereits genannten Punkte teilweise erklären. Zusätzlich ist die Balkenauswahl nicht repräsentativ, da viele vorgeschädigt waren.

Bei den ermittelten Schallgeschwindigkeiten fällt auf, dass sie systematisch wesentlich niedriger sind als die Literaturwerte. Dies hat natürlich einen Einfluss auf das dynamische Elastizitätsmodul. Der Grund für dieses Phänomen konnte anhand der Daten nicht ermittelt werden.

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Vorgehensweise

5.1.1 Bauzustandserfassung

Der Begriff Bauzustandserfassung wird hier bewusst im Gegensatz zur Schadenskartierung verwendet. Bei Bauzustandserfassung werden nicht nur Fehler, sondern auch Holzqualitäten mit aufgenommen. Die Aufnahme selbst besteht aus einer klassischen Schadenskartierung, die in der Literatur ausführlich beschrieben wird, beispielsweise bei Meißel¹³⁵, Erler¹³⁶, Görlacher¹³⁷ und den Johannesberger Arbeitsblättern¹³⁸. Bei der Zustandskartierung werden die Veröffentlichungen von Rinn¹³⁹ als Beispiele zu Rate gezogen. Die Legende der Zustandskartierung zeigt Abbildung 117. Hinzugekommen ist lediglich noch ein Symbol, mit welchem die visuelle Holzsortierung markiert werden kann (Abbildung 118). Dabei werden die Pfeile wie bei Abbildung 67 nach DIN 1052:1947 an den Bereichen angeordnet, die untersucht wurden. Es müssen nicht die ganzen Balken derselben Sortierklasse entsprechen. Die normale Sortierung S10 bzw. LS 10 wird nicht angetragen, lediglich bessere oder schlechtere Sortierungen werden angetragen.

5.1.2 Festigkeitsabschätzung

In diesem Unterkapitel wird das Vorgehen für die Festigkeitsuntersuchung von Holzbauteilen dargestellt. Als allgemeiner Punkt vor der Festigkeitsabschätzung ist es wichtig, den Zustand des Bauteiles zu untersuchen. Nur bei in Teilen noch intakten Querschnitten macht eine weitergehende Festigkeitsabschätzung Sinn.

5.1.2.1 Druckfestigkeitsuntersuchung

Die Druckfestigkeit korreliert recht gut mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 40\%$ bis über $R^2 = 70\%$ mit der Rohdichte. Die Rohdichte kann über Bohrproben oder über den Bohrwiderstand ermittelt werden. Zusätzlich werden die Bauteile visuell nach der DIN 4074 sortiert. Nimmt man das Ergebnis der Sortierung zusammen mit der Rohdichte, lässt sich recht deutlich ein Bereich erkennen, in dem sich die Festigkeit des Bauteils bewegt. Durch das Hinzuziehen der Schallgeschwindigkeit als weiteres Sortierkriterium lässt sich theoretisch Holz den Sortierklassen S 15 oder LS 15 zuordnen. Die Druckfestigkeit lässt sich über die Formeln aus dem Druckfestigkeitskapitel 2.2.5.2.1 oder über die Abbildung 30 bis 32 für fehlerfreie Hölzer ermitteln. Bei dem Vergleich der Rohdichte mit den Mittelwerten der DIN EN 338¹⁴⁰ lassen sich die geprüften Hölzer gemeinsam mit den visuellen Sortierkriterien einer Festigkeitsklasse zuordnen.

5.1.2.2 Biege- und Zugfestigkeitsuntersuchung

Für die Abschätzung der Biege- und auch Zugfestigkeit von Bauteilen wird eine Sortierung nach DIN 4074 vorgenommen. Bei Biegebauteilen sind besonders Fehler im Zugbereich zu markieren. Außerdem werden die Rohdichte und die longitudinale Schalllaufzeit bestimmt. Über die Sortierung lässt sich das Bauteil in die Sortierklassen S 7 bis S 13 einordnen, dabei wird die Rohdichte mit den 5 % Quantilen und den mittleren Rohdichten der zugeordneten Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 abgeglichen. Für die Einsortierung in die Klasse S 15

¹³⁵ Meisel (2015)

¹³⁶ Erler (2004)

¹³⁷ Görlacher und Eckert (1999)

¹³⁸ Thümmeler und Kugele (2008)

¹³⁹ Rinn (2006, 2008), Rinn und Fischer H.-B. (1996)

¹⁴⁰ DIN EN 338:2012-07

wird von Bauteilen der Klasse S 13 zusätzlich ein dynamisches E- Modul von über 14 300 N/mm² ¹⁴¹ erwartet. Die Einsortierung über Rohdichte, Sortierkriterien und Elastizitätsmodul hat dabei ein Bestimmtheitsmaß R² von 0,55 bis 0,80¹⁴².

5.2 Dominikanerkirche

Das auf 1400/01 (d) datierte Langhausdachwerk ist eines der frühen erhalten Hallendächer in Süddeutschland. Es ist ein Sparrendach mit zwei durchgehenden Kehlbalken in der dritten und vierten Ebene, barocker Holztonne und stehendem Stuhlgerüst. Die inneren beiden Stuhlstände reichen vom Kehlbalken der zweiten Ebene bis auf die Dachbalkenlage. Die Dachbalken überdeckten nur die Seitenschiffe. Im untersten Dachgeschoss befindet sich ein zweifach stehender Stuhl mit Kehlriegeln, die vom Sparren an die inneren Stuhlstände einzapfen. Die Baugeschichte kann in der Literatur nachgelesen werden¹⁴³.

Am Langhausdachwerk der Dominikanerkirche in Bamberg sind mehrere Fragestellungen zu überprüfen. Zum einen befindet sich im Gespärre 37 in der Nord- West Ecke des Langhauses ein ausgebauter Ständer, bei dem die Resttragfähigkeit überprüft wird. Zum anderen wird die Tragfähigkeit von Zwei inneren Ständern neben der Holztonne im Langhaus ermittelt.

Im Grundriss (Abbildung 119), Querschnitt (Abbildung 120) und Längsschnitt (Abbildung 121) sind die untersuchten Bauteile markiert. Es wurde der westliche äußere Ständer des Gespärres 37 und die westlichen inneren Ständer des Gespärres 33 und 29 untersucht.

5.2.1 Vorgehensweise

5.2.1.1 *Gespärre 37, westlicher Ständer*

Der westliche Ständer des Gespärres 37 wurde während der letzten Sanierungsmaßnahme der Dominikanerkirche aufgrund äußerlicher Schäden und Bohrmehlentnahme ausgebaut. Der Befund des Holzschutzgutachtens gibt erhebliche Schädigung durch Braun/ Nassfäule und Fraßschäden durch den gescheckten Nagekäfer und den gewöhnlichen Nagekäfer¹⁴⁴. Da diese Maßnahme nicht unumstritten war, wurde der Ständer im Dachwerk behalten, dabei aber lastfrei gestellt. Es handelt sich dabei um Fichte oder Tannenholz. Der Befund und auch das holztechnische Gutachten legen nahe, dass es sich bei dem Pilzbefall nicht um den echten Hauschwamm handelt, sondern um den weißen Porenschwamm. Dieser benötigt hohe Holzfeuchten für weiteres Wachstum und kann inaktiv gehalten werden.

Die bearbeitete Fragestellung ist nun, ob der Ausbau seinerzeit nötig gewesen war. Dafür wird das Holz mit seinen Fehlstellen und Schäden kartiert. Zusätzlich werden Orthofotos der Seitenflächen aufgenommen, um den Holzzustand dokumentieren zu können. Bei der Kartierung werden die Seitenflächen auf Holzfehler wie Äste, Risse, Faulstellen und ähnliches untersucht. Mit dieser Untersuchung wird der Ständer visuell sortiert. Dabei würde sich der Ständer ohne Pilzschädigung nach DIN EN 4074-1¹⁴⁵ der Sortierklasse S 13 zuordnen lassen. Durch die Pilzschädigung kann er nicht mehr nach Norm zugeordnet werden.

Die Orthofotos von allen Seiten des Ständers und des zugehörigen Fußbandes finden sich bei Abbildung 122. Die Orthofotos wurden dabei mithilfe einer strukture from motion (SFM) Software aus einzelnen Fotos erstellt. Die Lage der virtuellen Schnitte und der Bohrungen sind eingetragen. Abbildung 123 zeigt die Planskizze mit allen Eintragungen, wie den Bohrlagen, Schnitten, Holzfeuchtemessungen und visuellen Sortierkriterien.

¹⁴¹ Blaß und Frese (2004), S. 331

¹⁴² Linke, Rug und Pasternak (2018), 197

¹⁴³ Orthmann, Suckale und Hubel (1989); Bilda (2016); Orthmann, Suckale und Hubel (1989)

¹⁴⁴ Gürtler (2010), Bildtafel 15, Nr. 3

¹⁴⁵ DIN EN 4074-1:2012-06

Um den Umfang der Schädigung einschätzen zu können, wurde drei virtuelle Schnitte durch das Holz auf der Höhe 6 cm, 110 cm und 170 cm gelegt. Dabei durchdringen die Schnitte jeweils die von außen sichtbar geschädigten Bereiche. In den Schnitten wurden mindestens je sechs Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen. Je zwei diagonal von Ecke zu Ecke und je zwei von den Flächen aus, sodass sich ein Bohrnetz ergibt. Bei Auffinden eines verdeckten Schadens wie bei 110 cm werden oberhalb und unterhalb weitere Bohrungen angeordnet, um die Ausbreitung der Schädigung bestimmen zu können.

Weiterhin wurden in den Schnitten Schalltomogramme angefertigt. Dafür wurden acht Erschütterungssensoren auf derselben Höhe am Balken angebracht (Abbildung 58). Als Ergebnis ergibt sich ein Tomogramm, in dem Bereiche mit geringerer Schalllaufzeit farblich angezeigt werden. Abbildung 59 zeigt das Tomogramm auf 110 cm Höhe. Im linken Bildbereich finden sich Bereiche mit verringerter Schallgeschwindigkeit. Die gelben Bereiche rechts deuten auf eine nicht ausreichende Sensorendichte zwischen Sensor 2 – 3 und 3 – 4 hin. In Kombination mit den Bohrwiderstandsmessungen kann eine Aussage über den Zustand des innen liegenden Holzes getroffen werden.

Um die Aussagefähigkeit zu erhöhen, werden die Schalltomogramme mit den Bohrwiderstandsmessungen kombiniert. Die obersten beiden Bilder zeigen jeweils die Schalltomogramme mit zugehörigen Bohrprofilen. Das unterste Bild zeigt den daraus abgeleiteten abgeschätzten Restquerschnitt. Abbildung 124 zeigt den virtuellen Schnitt auf 6 cm Höhe. Nach der Farbe des Tomogrammes sind im Vergleich zu den Tomogrammen auf 110 cm und 170 cm geringere Schallgeschwindigkeiten erreicht worden. Die Bohrprofile zeigen allerdings keine Spuren für innere Schädigungen. Der einzige Abfall der Kurven findet sich links des Bohrungsschnittpunktes. Der Abfall liegt aber auf der Höhe des umliegenden Frühholzwertes und liegt damit am tangentialen Bohrverlauf in Marknähe. Der Querschnitt ist vollständig intakt.

Bei der Höhe 110 cm sind äußerlich bereits Fäulnisstellen im Anschlussbereich des Kopfbandes zu erkennen. Die Erwartung einer Innenfäule in diesem Bereich bestätigen sowohl das Tomogramm wie auch die Bohrprofile (Abbildung 125). Der aus den Verfahren abgeschätzte, nicht geschädigte Querschnitt beträgt ca. 379 cm² bei einer Gesamtfläche von 472 cm².

Um die Höhe der Schädigung eingrenzen zu können, wurden Bohrungen oberhalb und unterhalb von 110 cm angeordnet. Abbildung 126 zeigt das Bohrprofil von Bohrungen auf der Höhe 80 cm, 93 cm, 100 cm und 120 cm. Über die Bohrungen lässt sich feststellen, dass eine innere Schädigung zwischen 80 cm und 93 cm beginnt und bei einer Höhe von 120 cm abklingt.

Bei 170 cm ist der Querschnitt durch eine abgewitterte Ecke und einem Schleifzapfenloch bereits verringert. Das Schalltomogramm zeigt aber im Wesentlichen einen intakten Querschnitt an. Dies bestätigen die Bohrprofile. Die Spitzen in den Profilen (R 025, 027, 029 und 030) liegen an durchbohrten Ästen (Abbildung 127).

Aus statischer Sicht stellt sich nun die Frage, ob der vorhandene Restquerschnitt von maximal 379 cm für die Lastübertragung ausreichend ist. Dabei muss sowohl die vorhandene Festigkeit wie auch die statische Belastung berücksichtigt werden. Nach der Statik von Burges + Döh-ring wird der Rähm über dem Ständer wie folgt belastet¹⁴⁶:

Je Gespärre

$$F_d = 8,5 \text{ kN}$$

Je Laufmeter bei einem Gespärreabstand von 0,91 m

$$q_d = \frac{8,5 \text{ kN}}{0,91 \text{ m}} = 9,34 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Drucklast des Randständers 37 bei einem Ständerabstand von 3,65 m

$$F_{d,c,37} = 9,34 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 3,65 \text{ m} * 0,5 = \mathbf{17,05 \text{ kN}}$$

Die Druckfestigkeit wird über die Rohdichte und die Holzfeuchte abgeschätzt. Die Rohdichte wird mit dem Bohrwiderstandsmessgerät bestimmt. Im Mittel liegt sie selbst im geschädigten Bereich bei 440 kg/m³ bei einer Holzfeuchte von 15 %. Da die Rohdichte direkt mit der Druckfestigkeit zusammenhängt (siehe Kapitel 2.2.5.2.1 Druckfestigkeit), wird der Ständer nach DIN EN 338¹⁴⁷ der Festigkeitsklasse C 27 zugeordnet. Das entspricht einer charakteristischen Druckfestigkeit in Faserrichtung von 22 N/mm². Für kleine Proben ergibt Abbildung 30 bei einer mittleren Darrdichte von ca. 380 kg/m³ (entspricht einer Rohdichte von 440 kg/m³ nach Abbildung 15) eine Druckfestigkeit von 33 N/mm².

Da nach Baron bei pilzgeschädigten Hölzern die Druckfestigkeit stärker abnimmt als die Rohdichte wird, als Festigkeitsklasse auf der sicheren Seite liegend C 18 mit einer Druckfestigkeit von 18 N/mm² angesetzt.

Für die statische Berechnung wird der maßgebende Querschnitt auf einer Höhe von 115 cm festgelegt. Dort findet sich die Blattsasse des Kopfbandes. Ein Großteil des Faulen Bereiches liegt direkt unter der Blattsasse. Der tragfähige Restquerschnitt hat damit eine maximale Fläche von 330 cm². Abbildung 128 zeigt den Schnitt auf 115 cm Höhe, mit abzug der Blattsasse und darstellung des angesetzten Querschnittes. Es sollte nicht der gesamte geschätzte Restquerschnitt angesetzt werden. Der angesetzte Querschnitt beträgt, von 10 cm / 10 cm mit einer Fläche von 100 cm. Der verbleibende Querschnitt wird als versteckte Sicherheit für den Ständer verwendet. Eine rechnerische Querschnittsverkleinerung verringert nicht nur die Fläche, sondern auch den Knickbeiwert k_c .

¹⁴⁶ Burges und Döh-ring (2011), S. 41

¹⁴⁷ DIN EN 338:2016 – Bauholz für tragende Zwecke

Die Belastbarkeit des Restquerschnittes berechnet sich dabei nach Eurocode 5¹⁴⁸ folgendermaßen:

Ständerhöhe = 2,80 m angesetztter Querschnitt = 10 cm / 10 cm

Bemessungsfestigkeit nach Gl.14 für C18

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 1,8 \frac{kN}{cm^2} * \frac{1,0}{1,3} = 1,38 \frac{kN}{cm^2}$$

mit $k_{mod} = 1,0$ für NKL 2 und KLED kurz / sehr kurz

Maximal aufnehmbare Last nach Gl.8

$$\begin{aligned} F_{R,max} &= k_c * f_{c,0,d} * A_{netto} = 0,307 * 1,38 \frac{kN}{cm^2} * 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} \\ &= 0,424 \frac{kN}{cm^2} * 100 \text{ cm}^2 \\ &= \mathbf{42,4 \text{ kN} > 17,05 \text{ kN}} \end{aligned}$$

$$\text{mit } k_c \text{ abhängig von } \lambda = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{280 \text{ cm}}{\frac{10 \text{ cm}}{\sqrt{12}}} = 97 \rightarrow k_c = 0,307$$

Querschnittsausnutzung

$$\eta = \frac{F_{d,c,37}}{F_{R,max}} = \frac{17,05 \text{ kN}}{42,4 \text{ kN}} = \mathbf{40 \%}$$

Im Ergebnis zeigt sich, dass der äußere Stuhlständer des Gespärres 37 nicht ausgebaut hätte werden müssen. Der rechnerisch angesetzte Querschnitt ist lediglich zu 40 % ausgenutzt. Dabei bleiben im statischen Nachweis noch Sicherheitsreserven für Unwägbarkeiten und nicht entdeckte Fehler bestehen. Es sind rechnerisch weniger als 30 % des abgeschätzten intakten Querschnittes und die niedrigste Festigkeitsklasse aufgrund der teilweise gefundenen Fäulnis angesetzt. Zusätzlich wurden keine Kopf- und Fußbänder angesetzt, die die Knicklänge verkürzen würden.

5.2.1.2 Ständer der Holztonne

Eine der Besonderheiten des Dominikanerdachwerkes ist die ausgesucht gute Holzqualität der Balken. Um exemplarisch diese Holzqualität zu quantifizieren, werden die inneren 6,80 m langen Ständer der Holztonne aus dem Gespärre 33 und 29 auf der Westseite näher untersucht.

Analog zum Vorgehen bei dem äußeren Ständer des Gespärres 37 werden alle Fehler und Schäden der tannenen Ständer kartiert. Dabei lässt sich auf Abbildung 129 und 130 erkennen, dass sich die Ständer nicht nur durch die Abwesenheit von Schäden auszeichnen. Es sind zudem nahezu keine Fehler wie beispielsweise größere Äste zu erkennen. Die Holzfeuchte beträgt zwischen 16 % unten und 11 % oben, also im Mittel etwa 14 %.

Zur Bestimmung der Rohdichte und Kontrolle des inneren Holzzustandes wurden diagonale

¹⁴⁸ DIN EN 1995-1:2010-12

Bohrwiderstandsmessungen auf der Höhe 0,4 m, 1,8 m, 4,5 m und 6,6 m vorgenommen. Wie erwartet, ist der Holzzustand sehr gut. In den Bohrprofilen lässt sich nur der Alterstrend mit erhöhter Dichte im Randbereich und ein enger Jahrringabstand erkennen (Abbildung 131 und 132). Die Dichte bleibt über die Balkenlänge konstant.

Als weiteres Sortierkriterium wird hier die longitudinale Schalllaufzeit überprüft. Dafür werden auf einer Höhe von 40 cm und 660 cm über der Schwelle je ein Messsensor pro Ecke angebracht (Abbildung 133 und 134). Die Nägel sind dabei in einem Winkel von ungefähr 30 Grad eingeschlagen.

	Ständer 33	Ständer 29
Mittlere Rohdichte [kg/m ³]	420	430
Mittlere Schallgeschwindigkeit ($v_{14\%}$) [m/s]	4830	4990
Schallgeschwindigkeit auf 12 % Feuchte nach Gl. 12 ($v_{12\%}$)	4883	5048
Schallgeschwindigkeit Direkt*	5041	5246
Dynamisches Elastizitätsmodul (E_{dym}) [N/mm ²] nach Gl. 4	10673	11834

* Umrechnung nach Abbildung 109, Regressionsgleichung zwischen indirekt und direkt gemessener

$$\text{Schallgeschwindigkeit } v_{\text{direkt}} = \frac{v_{\text{indirekt}} - 823,46}{0,8053} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Tabelle 23: Messwerte der Ständer 33 und 29

Nach der mittleren Rohdichte können die Ständer in DIN EN 338 als C 24 (Ständer 33) bzw. C 27 (Ständer 29) eingeordnet werden. Nach Abbildung 30 liegt die Druckfestigkeit bei etwa 3,7 kN/cm².

Nach den visuellen Sortierkriterien können beide Ständer der Klasse S 13 und damit in der Festigkeitsklasse C 30 einsortiert werden. Die Güte des Holzes übersteigt die Vorgaben der Klasse S 13 dabei bei weitem. In die Klasse S 15 lassen sich bei Ständer nicht einsortieren, da das dynamische E-Modul dafür mindestens 14300 N/mm² betragen sollte¹⁴⁹. Das niedrige dynamische E-Modul der Ständer hat mehrere Gründe. Die Rohdichte ist mit 420 bzw. 430 kg/m³ recht niedrig. Als Mittelwert für die Klasse C 30 wird bereits ein Wert von 460 kg/m³ gefordert (das 5 % - Quantil liegt bei 380 kg/m³). Die zu niedrige Rohdichte lässt sich teilweise über die allgemeine Häufigkeitsverteilung der Rohdichte von Tanne erklären. Im Allgemeinen besitzt Tanne eine niedrige Rohdichte im Vergleich zu den anderen im Baubereich verwendeten Hölzern. Nach Abbildung 16 ist die Häufigkeitsverteilung der Darrdichte von Tanne wesentlich niedriger, in Tabelle 24 sind die Kennwerte von DIN 68364 für Bauhölzer gegenübergestellt. Tanne liegt mit Fichte in der Rohdichte gleich auf. Für die Entwicklung der Normwerte sind aber vermutlich kaum bis keine Tannenhölzer verwendet worden, da Tanne im Neubau eine untergeordnete Rolle spielt.

Holzart	Rohdichte [kg/m ³]	Stat. E-Modul [N/mm ²]	Festigkeiten [N/mm ²]		
			Zug	Biegung	Druck
Tanne <i>Abies alba</i> , <i>Abies</i> spp.	460	11 000	95	80	45
Fichte <i>Picea abies</i>	460	11 000	95	80	45
Kiefer <i>Pinus sylvestris</i>	520	11 000	100	85	47
Lärche <i>Larix</i> spp.	600	13 800	107	99	55
Eiche <i>Quercus petraea</i>	710	13 000	110	95	52

Tabelle 24: Mittlere Kennwerte von Holzarten nach DIN 68364:2003-05, Tabelle 1 und 2

Die Schalllaufzeiten, die in das dynamische Elastizitätsmodul im Quadrat eingehen, sind ebenfalls niedrig.

¹⁴⁹ Blaß und Frese (2004), S. 331

Aus der Statik wird die Belastung der Ständer ermittelt.

$$\begin{aligned} \text{Je Laufmeter Rähm (Aus Dachkonstruktion)}^{150} & q_d = 28,8 \frac{kN}{m} \\ \text{je Ständer (aus Stahlfachwerk)}^{151} & F_d = 22,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

Drucklast bei einem Ständerabstand von 3,65 m

$$F_{E,d,c} = 28,8 \frac{kN}{m} * 3,65 \text{ m} + 22,7 \text{ kN} = 127,87 \text{ kN}$$

Maximal aufnehmbare Last des Ständers:

Es werden drei Knickfälle unterschieden. Abbildung 135 zeigt den Querschnitt und Längsschnitt mit Markierung der angesetzten Knicklängen für alle Fälle und die zugehörige Schnittebene für den maßgebenden Querschnitt (Abbildung 136).

- 1. ungünstigster Fall, der Ständer ohne Berücksichtigung der anschließenden Hölzer. ($l_{eff} = 6,80 \text{ m}$).
- 2. Die Hölzer, die unter dem Tonnenscheitel einbinden, bringen keine aussteifende Wirkung. ($l_{eff} = 5,00 \text{ m}$)
- 3. günstigster Fall, alle anschließenden Hölzer verringern die Knicklänge. ($l_{eff} = 3,30 \text{ m}$)

Bemessungsfestigkeit nach Gl.14 für C30

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 2,3 \frac{kN}{cm^2} * \frac{1,0}{1,3} = 1,77 \frac{kN}{cm^2}$$

mit $k_{mod} = 1,0$ NKL 2 und KLED kurz / sehr kurz

Maximal aufnehmbare Drucklast nach Gl. 8

$$\begin{aligned} F_{R,d,max} &= k_c * f_{c,0,d} * A_{netto} \\ 1. &= 0,19 * 1,77 \frac{kN}{cm^2} * 465 \text{ cm}^2 = 156 \text{ kN} \\ 2. &= 0,36 * 1,77 \frac{kN}{cm^2} * 400 \text{ cm}^2 = 255 \text{ kN} \\ 3. &= 0,84 * 1,77 \frac{kN}{cm^2} * 750 \text{ cm}^2 = 1115 \text{ kN} \end{aligned}$$

Mit

$$\begin{aligned} 1. \quad k_c \text{ abhängig von } \lambda &= \frac{l_{ef}}{i} = \frac{680 \text{ cm}}{5,33} = 127,6 \rightarrow k_c = 0,19 \\ 2. \quad k_c \text{ abhängig von } \lambda &= \frac{l_{ef}}{i} = \frac{500 \text{ cm}}{5,48 \text{ cm}} = 91,2 \rightarrow k_c = 0,36 \\ 3. \quad k_c \text{ abhängig von } \lambda &= \frac{l_{ef}}{i} = \frac{330 \text{ cm}}{7,53} = 43,8 \rightarrow k_c = 0,84 \end{aligned}$$

¹⁵⁰ Burges und Döhring (2011), S. 51

¹⁵¹ Burges und Döhring (2011), S. 118

Querschnittsausnutzung

$$\eta = \frac{F_{E,d,c}}{F_{R,d,max}}$$

1.	$= \frac{127,87 \text{ kN}}{156 \text{ kN}}$	82 %
2.	$= \frac{127,87 \text{ kN}}{255 \text{ kN}}$	50 %
3.	$= \frac{127,87 \text{ kN}}{1115 \text{ kN}}$	11 %

Die Knicklänge wird praktisch zwischen Fall 2 und 3 liegen. Es lässt sich aber nachweisen, dass selbst, wenn keine der Aussteifungen vorhanden wäre, der Ständer lediglich zu 82 % ausgenutzt wäre. In jedem Fall besitzen die untersuchten Hölzer noch Reserven.

5.3 Kapelle St. Walburga

Die Kapelle St. Walburga, die zur Pfarrgemeinde Wiesenthau gehört, steht kurz vor einer Sanierung. Dafür wird eine Zustandskartierung des Dachwerkes angefertigt.

Bei dem Dachwerk handelt es sich um ein geschlossenes Sparrendach mit abgestrebtem Stuhl und einer Kehlbalkenebene. Die Deckenbalken werden durch einen Überzug nach oben gehängt. Die Spannweite beträgt knapp 6,5 m. Das Dachwerk ist bis auf die eichenen Mauer-schwellen in Nadelholz abgebunden. Abbildung 137 zeigt den Querschnitt des Dachwerkes. Insgesamt besitzt das Dach elf Gespärre.

Die Bauzustandserfassung wird nach der im Kapitel 5.1.1 Bauzustandserfassung erklärten Systematik aufgenommen. Eine ausführliche Baubeschreibung, wie auch die hier verwendeten Aufmaße finden sich bei Eva Bischof und Julia Hassen¹⁵².

Um eine adäquate Aussage über das Gefährdungspotenzial treffen zu können, wird bereits vor der Kartierung überschlägig die Statik des Daches gerechnet. Damit kann das Augenmerk bei der Untersuchung verstärkt auf hochbelastete Bereiche gelegt werden. Nach der Begutachtung werden die Erkenntnisse in die Statik eingearbeitet. Die Maße und Querschnitt für die Statik sind dem Aufmaß¹⁵² entnommen.

¹⁵² Bischof und Hassen (2018)

5.3.1 Statik Dachwerk

Das Dachwerk der Kapelle St. Walburga wird mit drei unterschiedlichen Annahmen als 3D-Stabwerksmodell überschlägig statisch nachgerechnet. Dabei wurde bei Version 1 und 2 zusätzlich noch eine Variante mit Kopfbandstreben (a) und ohne (b) berechnet.

1. Sparrendreieck mit Stuhl und Überzug
2. Sparrendreieck mit Stuhl, ohne Überzug
3. Sparrendreieck ohne Stuhl, ohne Überzug

Die Varianten finden sich unter Abbildung 138 wieder. Durch diese verschiedenen Berechnungsvarianten soll abgeschätzt werden können, ob alle Bauteile instandgesetzt werden müssen. Randbedingungen sind dabei:

- Einspannungen und Zwänge werden vernachlässigt, alle Anschlüsse werden als Momentengelenk idealisiert.
- Die Stabquerschnitte sind idealisiert und vereinheitlicht. Die Querschnitte sind in Tabelle 25 angegeben.
- Im Allgemeinen wird die Holzfestigkeitsklasse C 24 verwendet. Lediglich im kritischen Bereich am Sparren am Zapfenloch wurde eine Sortierung nach DIN 4074-1 vorgenommen und in die Modelle eingearbeitet. Dabei wurden drei Festigkeitsklassen verwendet, in Klammern ist die zugehörige Sortierklasse angegeben: C 18 (S 7 – geringe Tragfähigkeit), C 24 (S 10 – gewöhnliche Tragfähigkeit) und C 30 (S 13 – hohe Tragfähigkeit).
- Die Kopfbandstreben, Stuhlstreben und Druckriegel können keinen Zug aufnehmen.

Nr.	Bauteil	Höhe in cm	Breite in cm
1	Dachbalken	18	20
2	Sparren	13	18
3	Sparren Zapfenloch	13	2x 5,5
4	Kehlbalken/ Hängestäbe	13	14
5	Stuhlstrebe/ Überzug	20	20
6	Druckriegel	18	12
7	Kopfbandstrebe	14	11
8	Rähm	20	15

Tabelle 25: Idealisierte Querschnitte der Bauteile der Weiberla Kapelle

5.3.1.1 Lastannahmen

Die angesetzten Lasten finden sich in Abbildung 139 wieder.

Dachneigung $\alpha = 50^\circ$ Gespärreabstand: ca. 1,10 m

Eigenlast:

Biberschwanzdoppeldeckung mit Dachlattung		0,75 kN/m ²
Dielenboden	d = 3 cm $\gamma = 4,2 \text{ kN/m}^3$	0,126 kN/m ²
Deckenverkleidung	d = 3 cm $\gamma = 4,2 \text{ kN/m}^3$	0,126 kN/m ²

Das Eigengewicht der Holzkonstruktion wird EDV Intern berechnet.

Summe Eigenlast auf Sparren	$g_k =$	0,75 kN/m²
Summe Eigenlast auf Dachbalken	$g_k =$	0,25 kN/m²

Windlast:

Firsthöhe über Geländeoberkante ca. 8,50 m

Traufhöhe ca. 4,00 m

Windzone 1, aber freistehend auf einem Berg, deswegen wird für die überschlägige Berechnung Windzone 4 (Küstenregionen Deutschlands) Binnenland gewählt. Dadurch wird eine höhere Windbelastung als in Windzone 1 angenommen.

Vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck $q_p \approx 1,0 \text{ kN/m}^2$

Satteldach, vereinfacht Bereiche G und J, Wind senkrecht zum First

Druck $c_p = +0,7$ Winddruck $(w_d) = 1,0 \text{ kN/m}^2 * 0,7 = \mathbf{0,7 \text{ kN/m}^2}$

Sog $c_p = -0,3$ Windsog $(w_s) = 1,0 \text{ kN/m}^2 * (-0,3) = \mathbf{-0,3 \text{ kN/m}^2}$

Schneelast:

Schneelastzone 2

Geländehöhe über NN (A) = 510 m über Normalnull

Schneelast auf dem Boden

$$s_k = 0,25 + 1,91 * \left(\frac{510 + 140}{760} \right)^2 = 1,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}_{Gfl}^2} \geq 0,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Schneelast auf dem Dach

$$s = s_k * \mu_2 = 1,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}_{Gfl}^2} * 0,27 = \mathbf{0,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}_{Gfl}^2}}$$

μ_2 = Beiwert für die Dachneigung und Schneefanggitter

Nutzlasten

Die Nutzlasten beschränken sich hier auf Nutzlasten für Wartungszwecke, Kategorie H nach DIN EN 1991-1-1/NA¹⁵³

$q_k = \mathbf{1,0 \text{ kN/m}^2}$

Lasten	Bezugsfläche	in kN/m ²
Eigenlast	Sparrenfläche	0,75 bzw. 0,25
Windlast	Senkrecht zu Sparren	+0,7 und -0,3
Schneelast	Grundfläche	0,45
Nutzlast	Bodenfläche	1,0

Tabelle 26: Lastannahmen

5.3.1.2 Auswertung

Abbildung 140 zeigt für alle fünf Varianten die Schnittgrößen: Normalkraft, Biegemomente und Querkraft. Es wird der maßgebende Lastfall jeweils für das Binderespärre 4 gezeigt. Der Ausnutzungsgrad der verschiedenen Varianten, getrennt für Normalgespärre und Binderespärre, gibt Abbildung 141 an. Der Ausnutzungsgrad berücksichtigt dabei alle Querschnittsnachweise, aber keine Nachweise der Anschlüsse. Beim betrachteten Normalgespärre ist der rechte Sparren im Kehlbalckenanschluss mit der Festigkeit C 18 aufgrund der visuellen Sortierung vor Ort eingegeben. Der Bereich des Kehlbalckenanschlusses an den Sparren zeigt Abbildung 142. Es lässt sich eine Astansammlung direkt im bereits durch das Zapfenloch geschwächten Anschlussbereich feststellen.

¹⁵³ DIN EN 1991-1-1/NA:2012-12, Tab 6.10

Modell	Maximal ausgenutztes Bauteil	Ausnutzung
1a – Sparrendreieck mit Stuhl, mit Überzug	Gespärre 4 Kehlbalken über Hängestiel Gespärre 6 Sparren am Zapfenloch	109 % 57 %
1b – ohne Kopfbandstrebe	Gespärre 4 Druckriegel Gespärre 6 Sparren am Zapfenloch	99 % 107 %
2a – Sparrendreieck mit Stuhl, ohne Überzug	Gespärre 4 Kehlbalken Gespärre 6 Dachbalken	49 % 48 %
2b – ohne Kopfbandstrebe	Gespärre 4 Sparren am Zapfenloch Gespärre 6 Sparren am Zapfenloch	66 % 90 %
3 – Sparrendreieck, ohne Stuhl, ohne Überzug	Sparren am Zapfenloch	127 %

Tabelle 27: Ausnutzungsgrade nach Modellierungsvariante und Gespärre 4 (Bindergespärre) oder 6 (Normalgespärre)

Durch den Vergleich der verschiedenen Berechnungsvarianten werden einige Dinge deutlich. Als erstes ist ersichtlich, dass in der Variante 3, bei der die Stuhlkonstruktion als nicht mittragend angesehen wird, die Tragfähigkeit nicht nachgewiesen werden kann. Dabei sind lediglich die wenigen Sparren im Kehlbalkenanschlussbereich überlastet, die dort eine hohe Ästigkeit aufweisen, also in Sortierklasse S 7 einsortiert werden. Alle weiteren Bauteile sind nachweisbar.

Wenn nun die liegende Stuhlkonstruktion rechnerisch im System 2a mit angesetzt wird, werden die Sparren durch den Rähm stärker gestützt. Die Sparren sind lediglich noch zu maximal 43 % ausgenutzt. Bei der Annahme, dass die Kopfbandstreben nicht wirksam sind, erreichen die Sparren im Normalgespärre 90 % Ausnutzung.

Im System 1a werden durch den Hängestiel die ohnehin schon in den äußeren Bereichen geschädigten Kehlbalken auf 109 % ausgenutzt, da diese die Hängelast über Biegung auf die Sparren übertragen müssen. Ohne Ansetzen der Kopfbandstreben verlagert sich die Belastung stärker auf den Druckriegel, der die maximale Ausnutzung mit 99 % besitzt. Ohne die Kopfbandstreben ist zudem der Sparren mit 107 % überlastet.

5.3.2 Zustandserfassung

Die Pläne der Zustandserfassung finden sich unter Anhang 3. Die Zustandsuntersuchung am Dachwerk hat einige geschädigte Bereiche erkennen lassen. Großflächige Schädigungen sind dabei aber nicht entdeckt worden. Während der Untersuchung im August war aktiver Insektenbefall zu hören. Auffällig sind die zu gering dimensionierten Dachlatten, die zudem noch von schlechter Qualität sind (Abbildung 143). Diese Dachlatten sind nach der Sortierung nach DIN 4074-1 als Ausschuss anzusehen und können damit keiner Festigkeitsklasse zugeordnet werden. Grund sind die großen Äste. Zum zweiten ist die Stützweite der Dachlattung mit 1,10 m sehr groß. Die Dachlattung allerdings ist mit einem Regelquerschnitt von ca. 28 x 48 mm nicht an die Spannweite angepasst. Auf der Südseite finden sich viele gebrochene Dachlatten. Auf der Nordseite ist der Zustand besser.

Der Befund am Dachbalken des ersten Gespärres ist nicht überall eindeutig. Die Dachbalken sind nur im Fußbereich einsehbar, ansonsten über die Bodendielung verdeckt. Im Kontaktbereich mit dem Überzug ist aber eine starke Schädigung zu erkennen (Abbildung 144). Der Überzug ist im westlichen Bereich stark geschädigt (Abbildung 145). Während der Überzug unter dem Dachreiter durch die bei Regen eindringende Feuchte fäulnisgeschädigt ist, sind zwischen Gespärre 2 und 7 Fraßgänge zu beobachten und im Bohrprofil abzulesen (Abbildung 146). Die Bolzen zwischen den Dachbalken und dem Überzug sind alle nicht kraftschlüssig.

Die eichene Mauerschwelle auf der Nordseite ist bis zum Gespärre 4 von Innenfäule befallen.

Das Bohrprofil in Abbildung 147 zeigt den Widerstandsverlust beim Bohren deutlich an. Die weiteren Mauerschwellenbereiche sind maximal äußerlich abgewittert, aber nicht in ihrer Tragfähigkeit vermindert. Auffällig ist noch, dass auf der Südseite bei drei und auf der Nordseite bei fünf Fußpunkten das Vorholz im Dachbalken- Sparrenanschluss abgesichert ist. Im Längsbund finden sich auf der Südseite größere geschädigte Bereiche. Der größere Teil der Schäden ist aber oberflächlich. Der Südrähm wurde durch Insektenbefall in seiner Tragfähigkeit reduziert. Die Kopfbandstrebe von Gespärre 4 zu 5 ist durch Belastung in der Überblattung ausgeknickt und droht zu brechen (Abbildung 148).

Der Dachreiter ist in einem guten Zustand, lediglich das Glockenjoch hat in sich zu viel Spiel. Im ersten Gespärre sind aufgrund des Dachreiters die Sparren im Firstbereich ausgeklinkt (Abbildung 149). Zudem sind durch die über den Dachreiter eindringende Feuchtigkeit starke Verwitterungsspuren am Nordsparren zu sehen. Der Kehlbalken ist durch Insektenbefall geschädigt. Der Südsparren des dritten Gespärres ist am Kehlbalkenanschluss durch Fraßspuren stark geschädigt (Abbildung 150). Bei Gespärre 4 ist der Hängestiel durch Insektenfraß ebenfalls völlig zerfressen (Abbildung 151). In allen weiteren Bereichen sind häufig die Überblattungen der Kopfbandstreben nicht kraftschlüssig (Abbildung 152) oder es finden sich Schädigungen am Druckriegel oder Kehlbalken.

In den am stärksten belasteten Bereichen der Sparren, im Kehlbalkenanschluss wurden die Sparren nach der Ästigkeit sortiert. Dabei sind einige Sparren im Kehlbalkenanschluss in die Sortierklasse S 7 einzuordnen (Abbildung 153 und 142).

5.3.3 Instandsetzungsvorschlag

Es müssen nach der Zustandserfassung nur wenige Hölzer ausgetauscht werden. Die nördliche Mauerschwelle von Gespärre 1 bis 3.1. muss auf jeden Fall getauscht werden.

Die statische Berechnung ergibt, dass durch den Überzug auf den Dachbalken die Kehlbalken wie auch die Druckriegel ungünstig belastet werden. Somit soll der Überzug zwar im westlichen pilzbefallenen Bereich bis Dachbalken 2 erneuert werden, aber die Bolzen zwischen Überzug und Dachbalken sollen nicht angezogen werden.

Der Dachbalken des ersten Gespärres muss freigelegt werden, da dieser in Teilbereichen vermutlich stark geschädigt ist, dies aber noch visuell bestätigt werden sollte.

Im Längsbund auf der Südseite muss die Kopfstrebe von Gespärre 4 nach 5 verstärkt oder ausgetauscht werden. Bei der Überblattung ist dieser Stab bereits ausgeknickt.

Im Querbund im Gespärre 3 muss der Sparren am Zapfenloch erneuert werden. Der Hängestiel im Gespärre 4 muss nicht erneuert werden, da er ohne Funktion bleiben soll.

Das abgestrebte Stuhlgerüst wird für die Tragfähigkeit des Daches nur geringfügig benötigt. Insbesondere die Kopfbandstreben werden für den Nachweis nicht benötigt. Der Vorschlag lautet damit, weder die Kopfbandstreben Kraftschlüssig anzuschließen, noch sie bei Schäden instand zu setzen. Dasselbe gilt für die Kehlbalken und Druckriegel.

Bei acht Fußpunkten müssen die Sparren rückverhangen werden, da das Vorholz der Dachbalken abgesichert ist.

Die zu gering dimensionierte Dachlattung muss getauscht werden. Im Dachwerk war außerdem aktiver Hausbockbefall zu hören, den es zu beseitigen gilt.

6 Zusammenfassung

Bei der Untersuchung historischer Holzkonstruktionen wird bei einer statischen Nachrechnung häufig darauf verzichtet, die Holzfestigkeiten abzuschätzen. In einigen Fällen lässt sich aber durch die in-situ Festigkeitsuntersuchung der Aufwand einer Instandsetzung reduzieren. Doch auch das Gegenteil kann eintreten und mit der standardmäßig angesetzten Festigkeit von C 24 bzw. D 30 überschätzt man die Festigkeit der Bauteile.

Die Festigkeit von Holz hängt von vielen Eigenschaften ab. Der erste Teil dieser Arbeit stellt den aktuellen Stand der Holzforschung dazu vor. Das Alter des Holzes spielt bei der Festigkeit lediglich eine untergeordnete Rolle. Untersuchungen ergaben, dass zwar der Variationskoeffizient ansteigt, die Festigkeit aber kaum abnimmt. Der Holzzustand bzw. Vorschädigungen spielen dagegen eine große Rolle. Viele Schädigungen lassen sich über den Bohrwiderstand erkennen. Zur Verdeutlichung wurden verschiedene Grafiken angefertigt.

Diese Arbeit nähert sich der Festigkeitsabschätzung von verbauten Konstruktionshölzern mit verschiedenen Verfahren an. Es wurden für die Dichte und Zustandsbestimmung ein Bohrwiderstandsmessgerät und ein Impulstomograph für die Messung der Schallgeschwindigkeit verwendet. Zusätzlich wurden alle Hölzer visuell nach DIN 4074 sortiert. Dabei wurde die Praxistauglichkeit der Verfahren durch Biegeversuche an 21 Balken in Bauteilgröße untersucht. Bei den Biegeversuchen wurden Balken mit Spannweiten bis 300 cm und Querschnitten zwischen $h/b = 10 / 10$ cm und $17 / 17$ cm im Vierpunktbiegeversuch bis zum Bruch belastet. Parallel wurde die Impuls- Schallgeschwindigkeit und die Rohdichte über den Bohrwiderstand bestimmt. Mit den Messdaten wurden Korrelationen zwischen verschiedenen Eigenschaften aufgestellt. Tabelle 28 gibt die Korrelationen für die eigenen Messungen wieder.

	Bestimmtheitsmaß (R^2)	
Statischer E-Modul zu Biegefestigkeit	53,8 %	
Direkte zu indirekte Schallgeschwindigkeit	64,9 %	
Sortierklasse zu Biegefestigkeit	58 %	
	Direkt gemessen	Indirekt gemessen
Statischer zu dynamischer E-Modul	28 %	18 %
Schallgeschwindigkeit zu Biegefestigkeit	22 %	6 %
Dynamischer E-Modul zu Biegefestigkeit	19 %	16 %

Tabelle 28: Korrelation verschiedener Kennwerte zueinander

Für die Festigkeitsvorhersage eignet sich demnach vor allem die visuelle Sortierung ($R^2 = 58 \%$). Sowohl für die Schallgeschwindigkeit allein (maximal $R^2 = 24 \%$) wie auch für das dynamische Elastizitätsmodul (maximal $R^2 = 19 \%$) konnte lediglich eine geringe Abhängigkeit zur Biegefestigkeit nachgewiesen werden. Eine Lastabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden.

Im Langhausdachwerk der Dominikanerkirche wurde an drei Stuhlständern die Druckfestigkeit abgeschätzt. Einer der Ständer wies dabei eine Fäulnisschädigung auf, bei zweien wurde vor allem aufgrund der hohen Holzqualität die Festigkeit untersucht. Am geschädigten Holz wurde der tragfähige Restquerschnitt über Schalltomogramme und Bohrwiderstandsmessungen ermittelt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Ständer trotz einer Innenfäule seine statische Funktion erfüllen kann. Für die beiden anderen Hölzer konnte eine sehr gute Holzqualität mit große Lastreserven nachgewiesen werden.

Das Dachwerk der Kapelle St. Walburga bei Wiesenthau wurde aufgrund einer bevorstehenden Instandsetzung begutachtet. Am Dachwerk wurde der Zustand erfasst. Aufgrund der statischen Berechnung in verschiedenen Varianten wurden die besonders kritischen Bereiche ermittelt und einer visuellen Sortierung unterzogen. Über die Kombination der Festigkeitsabschätzung, der Zustandserfassung und der Statik, konnte ein substanzschonender Instandsetzungsvorschlag gemacht werden.

Um die Festigkeitsabschätzung von verbauten Holzkonstruktionen besser einsetzen zu können, müssen noch umfangreiche Versuche in Bauteilgröße vorgenommen werden. Es fehlen im Allgemeinen Daten in Bauteilgröße, insbesondere für Eiche. Für eine weitergehende Auswertung der in dieser Arbeit gewonnenen Daten müsste die Prüfkörperanzahl vergrößert werden. Damit könnten die Korrelationen weiter kombiniert werden. Beispielsweise die Schallgeschwindigkeit zur Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Sortierklasse, oder ähnliches.

Quellenverzeichnis

Literatur

Baron, Thomas (2009): Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren. Dissertation, Technische Universität.

Berghold, Korrelation – Regression. Abgerufen am 20.09.2018 von http://user.medunigraz.at/andrea.berghold/StatSS/corr_reg.pdf

Bilda, Frank (2016): Die ehemalige Dominikanerkirche - Aula der Universität in der Unesco-Welterbestadt Bamberg: 2017. Bamberg.

Blaß, Hans Joachim; Frese, M. (2004): Sortiervverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2004 (62), 325–34.

Burges und Döhring (2011): Standsicherheitsnachweis Teil 1, Ehem. Dominikanerkirche „St. Christoph“, Bamberg

Duden: probabilistisch. Abgerufen am 20.09.2018 von <https://www.duden.de/rechtschreibung/probabilistisch>

Eckstein, D.; Saß, U. (1994): Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1994 (52), 279–86.

Erler, Klaus (2004): Alte Holzbauwerke: Beurteilen und sanieren. 3. Aufl. Berlin: Huss-Medien GmbH Verl. für Bauwesen.

Forest Products Laboratory (2010): Wood handbook: Wood as an engineering material. Honolulu. Hawaii: Univ. Press of the Pacific.

Görlacher, Rainer (1987): Zerstörungsfreie Prüfung von Holz:: Ein "in situ"- Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1987 (45), 273–78.

Görlacher, Rainer (1990): Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinal-schwingungen.

Görlacher, Rainer; Eckert, Hannes (1996): Hölzerne Tragwerke: Untersuchen und Beurteilen ; [diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich 315 "Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe" entstanden]. Karlsruhe: Univ. Karlsruhe Sonderforschungsbereich 315 (Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Empfehlungen für die Praxis.

Görlacher, Rainer; Eckert, Hannes (1999): Historische Holztragwerke: Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen. Karlsruhe: Sonderforschungsbereich 315 Univ. Karlsruhe (TH) (Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke.

Gürtler, S. (2010): Holztechnischer Untersuchungsbericht – Dominikanerkirche Bamberg, Langhaus und Chor

Hasenstab, Andreas (2005): Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation, Technische Universität.

Hasenstab, Andreas; Krause, Martin (2005a): Luftultraschall und Ultraschall-Echo-Technik an Holz: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. In: *DGZfP-Berichtsband*, 2005 (94 Plakat 54).

Hasenstab, Andreas; Krause, Martin (2005b): Niederfrequente Ultraschall-Echo-Verfahren und Bohrwiderstandsmessung zur Untersuchung von Holzbauteilen: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. In: *DGZfP-Berichtsband*, 2005 (94 Plakat 55).

Kollmann, Franz (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Kránitz, Katalin (2014): Effect of natural aging on wood. Dissertation, ETH.

Kránitz, Katalin; Sonderegger, Walter Ulrich; Bues, Claus-Thomas; Niemz, Peter (2014): Effects of aging on wood: a literature review. In: *Wood Science and Technology*, 2014 (10).

-
- Linke, Gunter; Rug, Wolfgang; Pasternak, Hartmut (2017): Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden: Bericht zum Stand der Technik. In: *Bauingenieur*, 2017 (5), 229–36.
- Linke, Gunter; Rug, Wolfgang; Pasternak, Hartmut (2018): Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden - Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall- Impulslaufzeitmessung. In: *Holzbau im Bestand - historische Holztragwerke: Beispiele für substanzschonende Erhaltung*, hg. v. Wolfgang Rug, 193–222. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH (Praxis).
- Loebijinski, Maria; Rug, Wolfgang; Pasternak, Hartmut (2017): Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand. In: *Bauingenieur*, 2017 (2), 65–73.
- Lohmann, Ulf (Hrsg.) (2010): Holzlexikon: 15700 Stichwörter. 4. Aufl. Hamburg: Nikol.
- Meisel, Andreas (2015): Historische Dachwerke. Dissertation, Verlag der Technischen Universität Graz.
- Mönck, Willi; Rug, Wolfgang (2000): Holzbau: Bemessung und Konstruktion unter Beachtung von Eurocode 5 ; mit über 100 Rechenbeispielen nach DIN 1052 und EC 5. 14. Aufl. Berlin: Verl. Bauwesen.
- Niemz, Peter; Sonderegger, Walter Ulrich (2017): Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Nier, Joachim (1994): Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauhölzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung. Zugl.: Leipzig, Techn. Hochsch.
- Orthmann, Karin; Suckale, Robert; Hubel, Achim (1989): Die Dominikanerkirche in Bamberg: Gestalt- und Funktionswandel in sieben Jahrhunderten. Bamberg: Uni Bamberg.
- Pflieger (2014, 23. Juni), Bestimmtheitsmaß R^2 Teil 1 bis Teil 5. Abgerufen am 20.09.2018 von https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil1.html
- Reinboth (2016, 7. November), Grundlagen der Statistik: Dispersionsparameter – Varianz und Standardabweichung. Abgerufen am 20.09.2018 von <https://wissenschafts-thurm.de/grundlagen-der-statistik-dispersionsparameter-varianz-und-standardabweichung/>
- Rinn, Frank (2004): Holzanatomische Grundlagen der Schalltomographie an Bäumen. In: *Neue Landschaft*, 2004 (7), 44–47.
- Rinn, Frank (2006): Konzept für Zustandsanalysen von Holzkonstruktionen. In: *Bauen mit Holz*, 2006 (10), 26–33.
- Rinn, Frank (2008): Erfassung und dokumentation des Zustands hölzerner Konstruktionen. In: *Historische Holzbauwerke und Fachwerk: Instandsetzen - Erhalten*, hg. v. Dieter Ansorge und Gerd Geburtig, 11–46. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- Rinn, Frank (2012a): Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. In: *Holztechnologie*, 2012 (3), 24–29.
- Rinn, Frank (2012b): Basics of typical resistance- drilling profiles. In: *Western Arborist*, 2012 (Winter), 30–36.
- Rinn, Frank (2015a): Bohrwiderstandsprofile richtig verstehen. In: *Baumzeitung*, 2015 (5), 43–46.
- Rinn, Frank (2015b): Risserkennung mittels Bohrwiderstandsmessungen. In: *Holztechnologie*, 2015 (4), 62–63.
- Rinn, Frank; Fischer H.-B. (1996): Bestandsplan mit farbiger Zustands-katierung: nicht Schadens-Kartierung, spart Kosten und Ärger! In: *Bauen mit Holz*, 1996 (11).
- Rinn, Frank; Schweingruber F.-H.; Schär, E. (1996): Resistograph and X-Ray Density Charts of Wood: Comparative evaluation of drill resistance profiles and x-ray. In: *Holzforschung*, 1996 (4), 303–11.
- Rug, Wolfgang (2016): Holzbau im Bestand: Ausgewählte historische Bemessungs- und Konstruktionsnormen von 1917 bis 2007. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH (Beuth Praxis).
- Rug, Wolfgang (2018): Bewertung der Standsicherheit von Holztragwerken beim Bauen im Bestand: Bauzustandsuntersuchung und -bewertung. In: *Holzbau im Bestand - historische Holztragwerke: Beispiele für substanzschonende Erhaltung*, hg. v. Wolfgang Rug, 139–61. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH (Praxis).

Rug, Wolfgang; Held, Heidrun (1995a): Die Bohrwiderstandsmessung (Teil 1): Zerstörungsarme Untersuchung alter Holzkonstruktionen. In: *Bau-Zeitung*, 1995 (4), 50–52.

Rug, Wolfgang; Held, Heidrun (1995b): Die Bohrwiderstandsmessung (Teil 2). In: *Bau-Zeitung*, 1995 (5), 58–59.

Schickhofer, Gerhard; Brandner, Reinhard (2011): Alterung und (Rest)Tragfähigkeit von Bauholz. In: *Historisch wertvolle Dachwerke in UNESCO-Weltkulturerbe-Zonen: Tagungsband*, hg. v. Gregor Silly. Graz: Verl. der TU.

Schubert, Sandy (2007): Acousto-Ultrasound Assessment of Inner Wood Decay in Standing Trees: Possibilities and Limitations. Dissertation, ETH.

Steiger, René (1996): Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung: Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall. Dissertation, ETH.

Thümmeler, Uli; Kugele, Carmen (2008): Zustandskartierung für historische Holzkonstruktionen: Grafische Dokumentation von konstruktiven Untersuchungen. In: *Johannesberger Arbeitsblätter*, 2008 (Themenbereich 10.2).

Vorreiter, Leopold (1949): Holztechnologisches Handbuch: Holzkunde, Holzschutz, Holzvergütung : mit 159 Tabellen. Wien: Fromme (Holztechnologisches Handbuch: 1).

Wikipedia: CE – Kennzeichnung: Seite „CE-Kennzeichnung“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 14. August 2018, 10:11 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=CE-Kennzeichnung&oldid=180001818> (Abgerufen: 17. September 2018, 21:22 UTC)

Normen

DIN 1052:1947-10, Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung

DIN 1052:2008-12, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

DIN 4074-1:2012-06, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz

DIN 4074-5:2008-12, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz

DIN 20000-5:2016-06, Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt

DIN 52182:1976-09, Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte

DIN 68364:2003-05, Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten

DIN 68365:2008-12, Schnittholz für Zimmererarbeiten - Sortierung nach dem Aussehen – Nadelholz

DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN 338:2016

DIN EN 384:2016-12, Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte

DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

DIN EN 1912:2013-10, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten

DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau

DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

DIN EN 13183-1:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren

DIN EN 13183-2:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren

DIN EN 14081-1:2016-06, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen

DIN EN 14081-2:2013-03, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung

DIN EN 14081-3:2012-04, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 3: Maschinelle Sortierung, zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit gemäß § 22 Abs. 2 Satz 1 i.V.m. § 19 Abs. 2 APO, dass ich die vorstehende Masterarbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden, dass Zitate kenntlich gemacht sind und die eingereichte Masterarbeit noch in keinem anderen Prüfungsverfahren vorgelegt wurde und dass die in unveränderbarer maschinenlesbarer Form eingereichte Fassung (CD) mit der schriftlichen Fassung identisch ist.

Bamberg den
Ort, Datum

Unterschrift