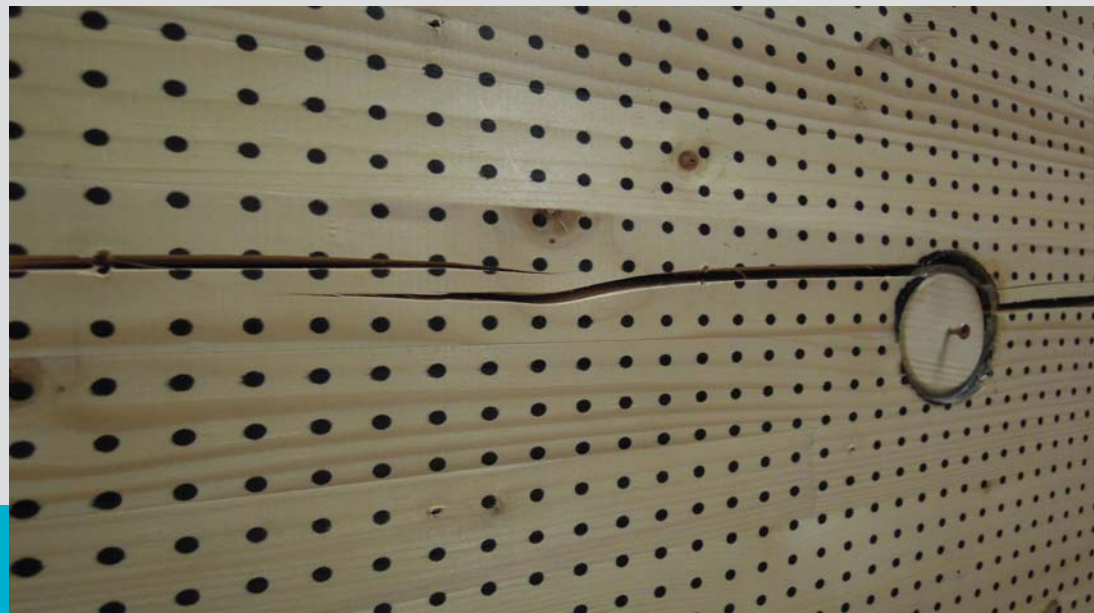


Versuchstechnische Evaluierung feuchteinduzierter Kräfte in Brettschichtholz verursacht durch das Einbringen von Schraubstangen

M-4-04/2012



Bernhard Wallner
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Versuchstechnische Evaluierung feuchteinduzierter Kräfte in Brettschichtholz verursacht durch das Einbringen von Schraubstangen

Masterarbeit von
Bernhard Wallner, BSc

Eingereicht am
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

Begutachtung:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer:
Dipl.-Ing. Manfred Augustin

Graz, Juni 2012

*...Gewidmet allen, die an mich glaubten,
und vor allem denjenigen, die es nicht taten.*

Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Bernhard Wallner

Graz, Juni 2012

Danksagung

Zunächst möchte ich meinen Betreuer DI Manfred Augustin für seine tatkräftige Unterstützung, auch zu später Stunde und an Wochenenden bei der Erstellung dieser Arbeit danken. Er schaffte es immer wieder mich zu motivieren, aber auch mich zu beruhigen wenn mich meine Nerven verliesen.

Weiters möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer, Leiter des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz für die freundliche Aufnahme bei der holz.bau forschungs gmbh vor zwei Jahren, und für die Durchsicht und Beurteilung der Masterarbeit danken.

Großer Dank auch an alle Mitarbeiter des Institutes für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschungs gmbh die immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatten und mich tatkräftig unterstützten.

Auch dem Labor für konstruktiven Ingenieurbau möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die Zusammenarbeit aussprechen.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern Annemarie und Bernhard. Erst durch sie war es letztendlich möglich mein Studium zu absolvieren.

Auch allen meinen Verwandten, Freunden und Nachbarn danke ich für die Unterstützung, aber auch für die Zerstreuung während meines Studiums.

Meinen Studienkollegen möchte ich an dieser Stelle ein Dankeschön für die schöne Zeit an der TU Graz aussprechen. Durch unsere Lerngemeinschaften war es möglich, auch die schwierigsten Prüfungen zu meistern.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Freundin Christine. Sie musste während der gesamten Studienzzeit meine Launen ertragen, hielt immer zu mir und baute mich wieder auf, wenn mich mein Mut verlies.

Vielen Dank!

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der versuchstechnischen Evaluierung feuchteinduzierter Spannungen durch eingebrachte Schraubstangen in Brettschichtholz.

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt das grundsätzliche Verhalten von Holz bei einer Feuchteeinwirkung. Dabei wird zunächst auf den mikroskopischen und makroskopischen Aufbau des Holzes eingegangen, welcher die Holzfeuchte beeinflusst. Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte und der Vorgang des Quellens und Schwindens werden erläutert. Abschließend wird eine mögliche Modellierung des Feuchtetransportes und den damit verbundenen Spannungen vorgestellt.

Der Hauptteil beschäftigt sich mit der versuchstechnischen Evaluierung zu entstehenden Spannungen bzw. Kräften in einer Querszugverstärkung in Form von Schraubstangen und dem Holz selbst. Insgesamt wurden 24 Prüfkörper aus BSH der Klasse GL24h mit unterschiedlichen Abmessungen hergestellt. Die Prüfkörper wurden 18 Monate bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 90 % rel. Luftfeuchte gelagert. Dadurch stellte sich in den Prüfkörpern eine Holzfeuchte von rund 18 % ein. Die hohe Holzfeuchte verursachte in weiterer Folge ein Quellen der Prüfkörper.

Anschließend wurden die Schraubstangen mit Gewinde nach DIN 7998 eingebracht. Nach Fertigstellung der Prüfkörper und Festlegung aller erforderlichen Messeinrichtungen wurde bei gleichbleibender Temperatur die relative Luftfeuchte auf 40 % abgesenkt. Dadurch kam es in den Prüfkörpern zu einer Abnahme der Holzfeuchte mit den damit verbundenen Schwindverformungen. Da die Schraubstangen dieser Schwindung entgegenwirken, entstanden dadurch Spannungen bzw. Kräfte in den Schraubstangen und im BSH.

Ziel war es, diese auftretenden Spannungen zu erfassen. Weiters wurde die Holzfeuchte mit verschiedenen Verfahren bestimmt, sodass auch die Eignung unterschiedlicher Methoden zur Erfassung der Holzfeuchte überprüft werden konnte. Um den Einflussbereich einer Schraubstange auf das umgebende Holz zu bestimmen, wurden die Verformungen an der Oberfläche der Prüfkörper verfolgt.

Abstract

This thesis deals with moisture induced stress within lateral tension fortified glued laminated timber (GLT).

The first part deals with the basic character of timber under the influence of moisture. First of all the micro and macroscopic composition of timber is dealt with, which influences the moisture of the timber. The technique used for ascertaining the timber moisture content as well as the processes of moisture expansion and contraction will be described. Further to this, a model of moisture transportation and the complimentary stress is introduced.

The main part deals with the practical tests of the emerging stresses within a lateral tension fortification consisting of a screw-in rod and the timber itself. One goal of this thesis is to develop a suitable test configuration.

In total, 24 glued-laminated timber GL24h specimens with different dimensions were produced.

Then the test objects were stored in an ambient atmosphere for 18 months. They were stored at 20° and a relative humidity of 90 %. Through this, the timber moisture content of the test objects should set itself at 18 %. The high moisture content of the timber caused a moisture expansion within the test objects.

Next, the screw-in rods with thread according to the DIN 7998 [3] are put in place. When the test objects were ready, all the necessary readings were taken while the temperature stayed the same but the relative humidity was decreased to 40%. This caused a reduction in the timber moisture content which led to contraction of the test objects. Because the screw-in rod counteracted the contraction, stresses occurred in the screw-in rod and the GLT.

The goal was to determine the stresses that occur. Further to this, the timber moisture content was defined through different methods, so that the eligibility of the different methods for determining the timber moisture content could be checked indirectly. The strain was traced through the contraction so that the affected area around the screw-in rod within the timber could be defined.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einleitung

1	Einleitung	2
1.1	Motivation / Ziele der Arbeit	2
1.2	Gliederung der Arbeit	3

Kapitel 2: Stand des Wissens

1	Einführung.....	6
1.1	Aufbau des Holzes	6
1.1.1	Mikrosystem	7
1.1.2	Makrosystem	11
1.2	Kenngößen	13
1.2.1	Holzfeuchtegehalt u	14
1.2.2	maximaler Feuchtegehalt von Holz	14
1.3	Bestimmung der Holzfeuchte.....	15
1.3.1	direkte Holzfeuchtebestimmung	15
1.3.2	indirekte Holzfeuchtebestimmung	17
2	Grundlagen der Feuchteaufnahme und -abgabe	21
2.1	Sorption.....	21
2.2	Phasen der Adsorption	24
2.3	Sorptionshysterese	25
2.3.1	Erklärung der Hysterese	26
3	Quell- und Schwindverhalten von Holz.....	28
3.1	Kenngößen	28
3.1.1	lineares Quellmaß α	29
3.1.2	lineares Schwindmaß β	30
3.1.3	Quellungskoeffizient h	31
3.1.4	differentielle Quellung q	32
3.1.5	Anisotropie der Quell und Schwindmaße	32
3.2	Quell- und Schwindmaße	34
3.3	freies- und behindertes Quellen bzw. Schwinden	35

4	Spannungen in BSH aufgrund Feuchtigkeitsänderungen	38
4.1	Rissbildung in BSH infolge Feuchtigkeitsänderungen	38
4.2	Modellierung des Feuchtigkeitstransportes	43
4.3	hygro-mechanisches Modell	46
4.3.1	elastische Verzerrung	46
4.3.2	Verzerrung durch lineares Quellen und Schwinden	46
4.3.3	mechano-sorptive Kriechverzerrung	47
4.3.4	zeitabhängige Kriechverzerrung	48
4.4	Berechnungsmodelle für die Spannungsermittlung	48
4.4.1	eindimensionales Berechnungsmodell	48
4.4.2	zweidimensionales Berechnungsmodell	50
4.4.3	Eingangsparameter und Ergebnisse zum Feuchtigkeitstransport	50
4.4.4	Eingangsparameter und Ergebnisse für das 1D-hygro-mechanische Modell ..	52
4.4.5	Eingangsparameter und Ergebnisse für das 2D-hygro-mechanische Modell ..	53
4.5	Schlussfolgerung und Vergleich.....	55
5	Spannungen in querzugverstärktem BSH	58
5.1	feuchteinduzierte Spannungen in Gewindestangen bzw. Schraubstangen	58
5.2	Einflussbereiche von eingebauten Gewindestangen	61

Kapitel 3: Versuchskonfiguration zur Erfassung feuchteinduzierter Spannungen in querzugverstärktem Brettschichtholz

1	Versuchsplanung	66
1.1	Herstellung der Prüfkörper	67
1.1.1	Abmessungen der Prüfkörper	68
1.1.2	Hirnholzversiegelung	72
1.1.3	Konditionierung der Prüfkörper	72
1.2	Querzugverstärkung	73
1.3	Messung der Spannungen zufolge Schwinden	76
1.3.1	Eindrehen der Schraubstangen	82
1.4	Messung der Verformungen des BSH zufolge Schwinden	85
1.4.1	Messung mittels Messschieber	85
1.4.2	Messung mittels Fotogrammetrie	89

1.5	Messung der Holzfeuchte	92
1.5.1	Darrmethode	92
1.5.2	kapazitives Messverfahren	96
1.5.3	Widerstands-Messverfahren	97
2	Versuchsdurchführung	101

Kapitel 4: Auswertung der Versuche

1	Versuchsauswertung	106
1.1	Klima.....	109
1.2	Ergebnisse der Feuchtemessungen	110
1.2.1	Darrproben	110
1.2.2	Widerstands-Messverfahren	111
1.2.3	kapazitives Messverfahren	114
1.2.4	Hydrometer	116
1.2.5	Vergleich der angewandten Methoden der Holzfeuchtemessung	117
1.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Feuchtemessungen	120
1.3	Ergebnisse der Oberflächenmessung	121
1.3.1	Oberflächenmessung mittels Fotogrammetrie	121
1.3.2	Oberflächenmessung mittels Messschieber	121
1.4	Spannungen in den Prüfkörpern	125
1.4.1	Prüfkörper der Gruppe 1 (l=1280 mm)	129
1.4.2	Prüfkörper der Gruppe 2 (l=640 mm)	132
1.4.3	Prüfkörper der Gruppe 3 (l=320 mm)	134
1.4.4	Prüfkörper der Gruppe 4 (l=160 mm)	136
1.5	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchteänderung im Querschnitt und den Kräften in den Schraubstangen	138

Kapitel 5: Schlussbetrachtung

1	Resümee	146
2	Ausblick auf geplante Forschungen.....	147

Literatur

3	Normen	150
4	Bücher/Dissertationen/Abschlussarbeiten	151
5	Berichte/Skripten	152
6	Zulassungen/ Produktinformationen	154
7	Internet	154

Einleitung

1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen die Gründe für die Entstehung dieser Arbeit, sowie die damit verbundenen Ziele geschildert werden. Weiters wird der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation / Ziele der Arbeit

Bei gekrümmten oder geneigten BSH-Trägern kommt es geometriebedingt zu Kraftumleitungen im Firstbereich, wodurch Querkzugspannungen entstehen. Aber auch bei Ausklinkungen und Durchbrüchen kommt es lokal zu erhöhten Querkzugspannungen. Übersteigen diese die Bemessungswerte der Spannungen $f_{t,90,d}$ so sind Querkzugverstärkungen erforderlich. Aber auch zur Sanierung von bereits bestehenden Bauwerken werden oftmals Querkzugverstärkungen angeordnet.

Der Einsatz von Querkzugverstärkungen ist längst zum Stand der Technik geworden. Vor allem der Einsatz von Schraubstangen mit Gewinde nach DIN 7998 [3] hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Bemessung dieser Verbindungsmittel ist in ÖNORM EN 1995-1-1 [1] bzw. in den Zulassungen der jeweiligen Schraubenhersteller geregelt.

In einer der vorliegenden Zulassungen wurde darauf hingewiesen, dass auftretende Spannungen in der Schraubstange aufgrund des Quellens und Schwindens zu berücksichtigen sind. Dies ergibt Sinn, bedenkt man das ein Träger mit einer Höhe von 1000 mm bei einer Holzfeuchteänderung von 4 % bereits um 10 mm quillt bzw. schwindet. Weder der ÖNORM EN 1995-1-1 [1] noch den Zulassungen der Hersteller ist jedoch ein entsprechendes Verfahren zur Berücksichtigung der feuchteinduzierten Spannungen zu entnehmen.

Das Hauptziel der Arbeit bestand nun darin, einen Zusammenhang zwischen der Änderung der Holzfeuchte und den Spannungen bzw. Kräften in eingebauten Schraubstangen und dem Holz herzustellen. Methodisch erfolgte dies über eine versuchstechnische Evaluierung. Dabei wurden auch verschiedene Messverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte verwendet und miteinander verglichen. Um den Einflussbereich einer Schraubstange auf das Holz zu erfassen, wurden weiters auch die lokalen Verformungen des Holzes verfolgt.

1. 2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in vier Hauptkapitel gegliedert.

In Kapitel 2 „Stand des Wissens“ wird auf die beeinflussenden Parameter des vorliegenden Problems eingegangen. Insbesondere betrifft dies die Holzfeuchte und den damit verbundenen Quellen und Schwinden. Weiters wird auf eine mögliche Modellierung zur Bestimmung von Zwängungsspannungen im ungestörten Holzquerschnitt eingegangen.

In Kapitel 3 werden die verwendete Versuchskonfiguration zur Bestimmung der Spannungen in den Schraubstangen, die Messung der Verformungen sowie die Erfassung der Holzfeuchte geschildert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Auswertung der durchgeführten Messungen.

In Kapitel 5 werden die vorliegenden Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere mögliche Arbeiten zu dieser Thematik vorgestellt.

Stand des Wissens

1 Einführung

In diesem Kapitel soll das grundsätzliche Verhalten von Holz bei einer Feuchteeinwirkung beschrieben werden. Um dieses Verhalten verstehen zu können, wird daher vorab auf den Aufbau des Holzes eingegangen.

1.1 Aufbau des Holzes

Holz besteht aus unterschiedlichen Zellelementen und Bestandteilen, welche im lebenden Baum folgende Funktionen erfüllen

- Wasserleitung,
- Festigung,
- Speicherung.

Beim Aufbau des Holzes wird hierarchisch in fünf Strukturebenen unterschieden

- die molekulare Ebene (Cellulose, Hemicellulosen, Lignin,...),
- die Nanoebene (Zellwände),
- die Mikroebene (tracheale- und parenchymatische Zellen),
- die Makroebene (Holzstrahlen, Jahrringe, Harzkanäle,...) und
- die Stammebene (Rinde, Mark,...).

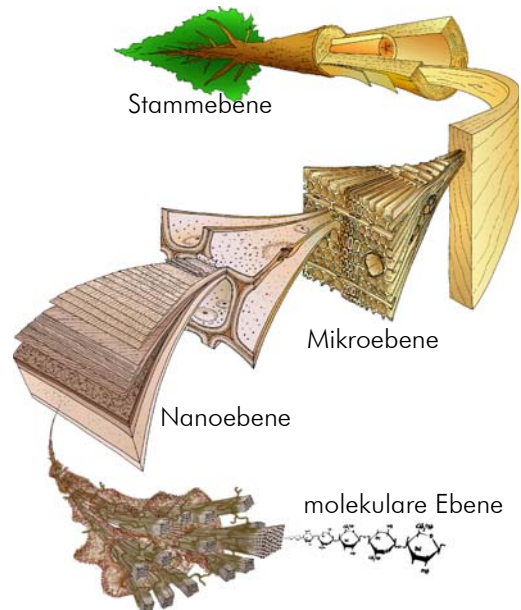


Abb. 1.1 Strukturebenen des Holzes [Wimmer 2002]; [13]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird lediglich auf die Mikro- und die Makroebene eingegangen, da sich einfache Modelle zur Beschreibung des Feuchtetransports in diesen Ebenen abbilden lassen. Für detaillierte Informationen über den Aufbau des Holzes sei z.B. auf die Werke von Kollmann [5] und Niemz [6] verwiesen.

1. 1. 1 Mikrosystem

Das Mikrosystem ist für die Wasseraufnahme aus der Luft (hygroskopisches Verhalten) verantwortlich.

Beim Mikrosystem des Nadelholzes unterscheidet man in zwei Zelltypen

- tracheale Zellen und
- parenchymatische Zellen.

tracheale Zellen

Das tracheale System ist für die Wasserversorgung des lebenden Baumes zuständig, es besteht aus zwei wesentlichen Komponenten

- den Tracheiden und
- den Gefäßen (Tracheen).

Tracheiden sind röhrenförmige oder faserförmige geschlossene Zellen mit einzelnen „Durchbrüchen“, sog. Tüpfel. Sie bilden mit bis zu 95 Volumsprozent das Holz der Nadelbäume. Die Orientierung der Tracheiden ist axial zur Längsrichtung des Baumes. Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser liegt meist bei rund 100, wobei die Länge bei Nadelhölzern zwischen 2 mm und 5 mm liegen kann. Sie sind für Wasserleitung und mechanischer Stabilität verantwortlich. Man unterscheidet weiters zwischen den Tracheiden des Früh- und Spätholzes (Abb. 1.2) und (Abb. 1.3).

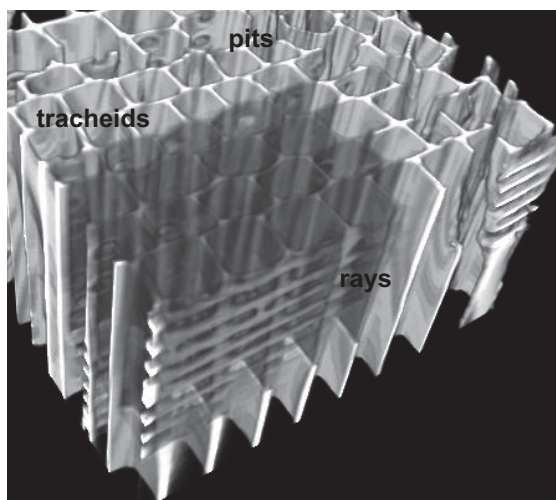


Abb. 1.2 Tracheiden des Frühholzes, Tüpfel (pits) und Holzstrahlen (rays) [25]

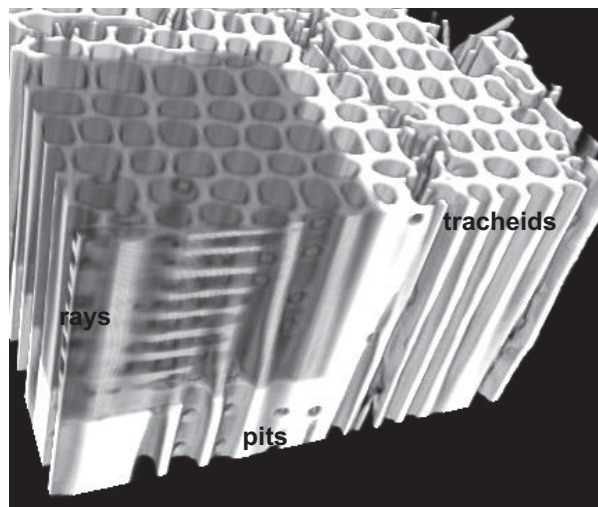


Abb. 1.3 Tracheiden des Spätholzes, Tüpfel (pits) und Holzstrahlen (rays) in Querrichtung [25]

Die Tracheiden des Frühholzes sind dünnwandig, weitlemig und besitzen an den Wänden benachbarter Zellen bis zu 300 Hoftüpfel (Abb. 1.5), welche für den Flüssigkeitsaustausch von Zelle zu Zelle verantwortlich sind. Frühholztracheiden sind vor allem für den Flüssigkeitstransport zuständig. Tracheiden des Spätholzes, welche vorwiegend der Festigung des Baumes dienen weisen nur einige wenige (10-50) Tüpfel auf. Der Unterschied zwischen Tracheiden des Früh- und Spätholzes ist in Abb. 1.4 gut erkennbar.

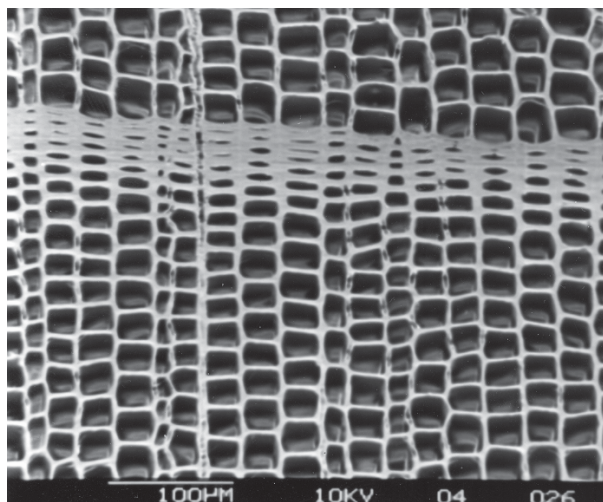


Abb. 1.4 Vergleich Tracheiden Früh- und Spätholz [26]

Da bei den Hoftüpfeln die Wasserleitung zwischen den Tracheiden des Frühholzes erfolgt, sind diese im Vergleich zu den Spätholztüpfeln größer. Der Hof kann laut Kollmann [5] einen Durchmesser von 0,027 mm, die Pore von bis zu 0,007 mm erreichen. Da sich die Sekundärlamellen auf beiden Seiten wölben, entsteht ein „Hof“ daher auch der Name Hoftüpfel.

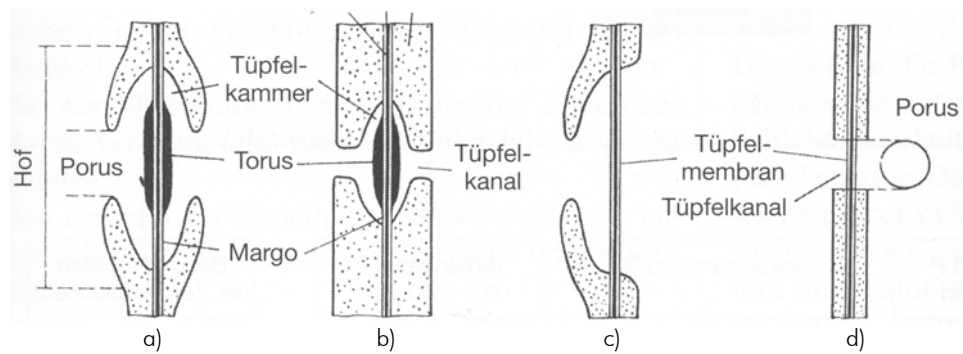


Abb. 1.5 Grundbautypen der Nadelholz-Tüpfelpaare, schematisch
 a) Frühholzhof-Tüpfel (Hof-Tüpfel)
 b) Spätholzhof-Tüpfel
 c) halbbehöfter Tüpfel
 d) einfacher Tüpfel
 [WAGENFÜHR 1999]; [13]

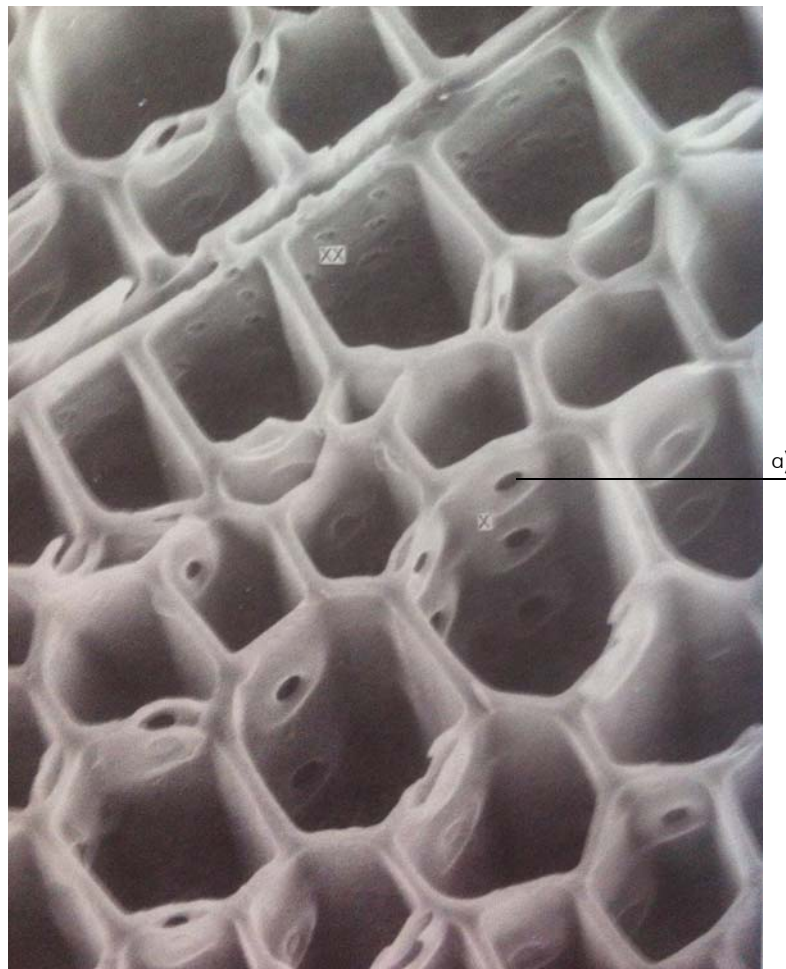


Abb. 1.6 a) Frühholzhof-Tüpfel (Hof-Tüpfel) [27]

Bei Gefäßen handelt es sich um röhrenförmige Gebilde mit sich änderndem Durchmesser. Die Länge schwankt zwischen mehreren Zentimetern bis zu einigen Metern. Sie können sich auch über die gesamte Länge des Baumes erstrecken. An den Enden sind die Gefäße durch Öffnungen miteinander verbunden, sodass durchgehende Röhren entstehen. In diesen Röhren gelten die Gesetze der Kapillarität.

parenchymatische Zellen

Parenchymzellen dienen hauptsächlich der Speicherung und Abgabe von Reservestoffen. Unter Reservestoffen versteht man Stärke, Fette, Harze usw. [5].

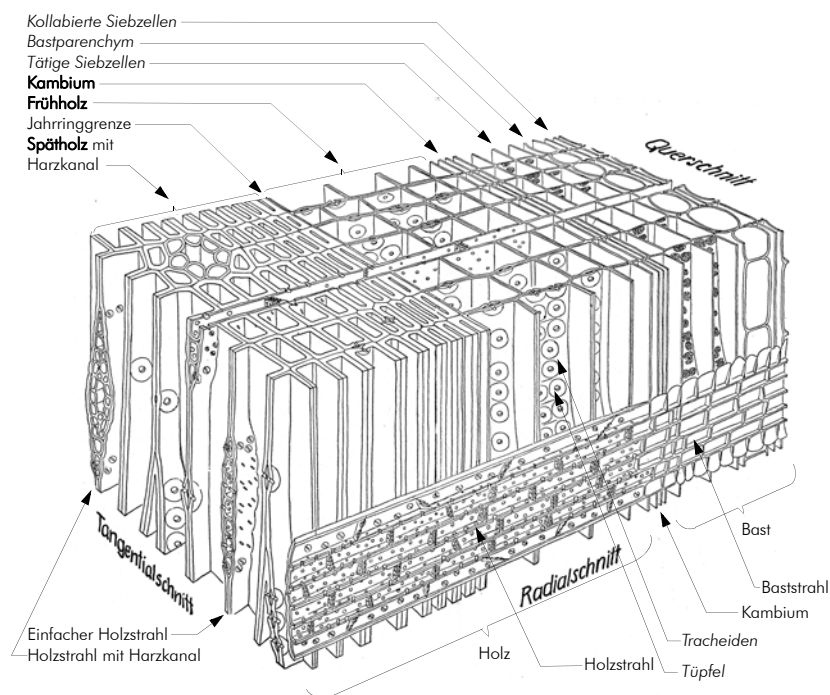


Abb. 1.7 Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast der Lärche in dreidimensionaler Darstellung [nach MÄGDEFRAU 1951]; [13]

1. 1. 2 Makrosystem

Die Aufnahme von flüssigem Wasser erfolgt über das Makrosystem. In Faserlängsrichtung erfolgt der Feuchtetransport über das Hohlraumsystem der Zellelemente. Öffnungen (Tüpfel, Abb. 1.5), welche sich zwischen den Zellen befinden, leiten das Wasser quer zur Faserrichtung weiter. Ein Teil der Feuchtigkeit quer zur Faserlängsrichtung wird auch über Holzstrahlen transportiert.

Der Feuchtetransport über das Makrosystem ist abhängig von

- Durchmesser und Querschnittsform der Strukturelemente sowie
- Volumenanteil der Strukturelemente (Poren, Tüpfel, Holzstrahlen).

Das Makrosystem beinhaltet jene Elemente des Holzes, die man bereits mit freiem Auge oder mit einer Vergrößerung durch eine Lupe erkennen kann [5].

- Holzstrahlen

Holzstrahlen wurden früher auch als Markstrahlen bezeichnet, wobei Letztere immer vom Mark bis in die Rinde reichen. Sie kommen bei allen Nadel- und Laubhölzern vor. Vor allem bei Laubhölzern wie der Eiche sind sie bereits mit freiem Auge erkennbar. Sie dienen der radialen Leitung und Speicherung von Wasser und der vom Baum gebildeten Stoffe, aber auch der Festigung in radialer Richtung [13].

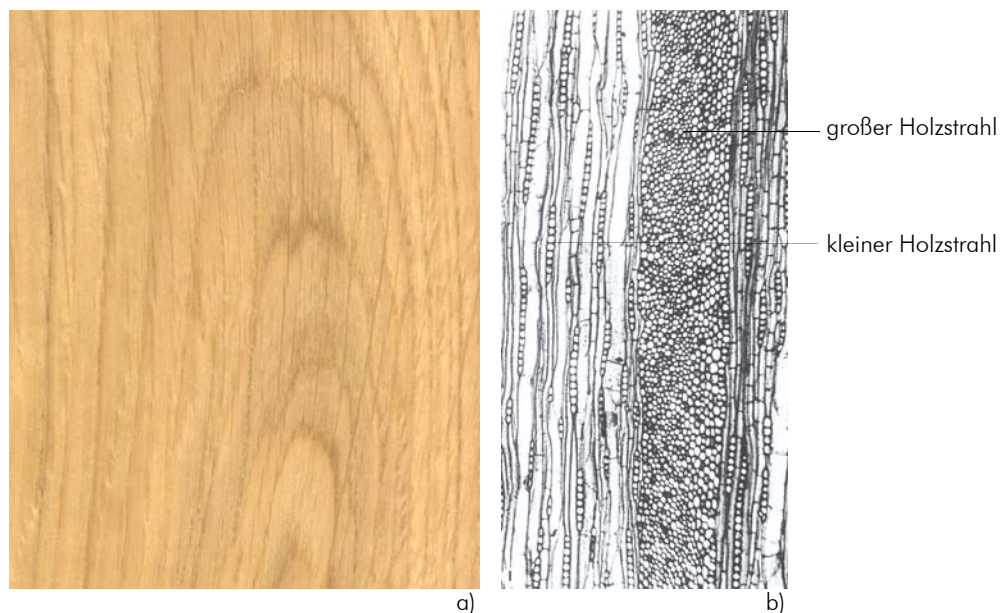


Abb. 1.8 Tangentialschnitt Eichenholz
a) makroskopisch
b) mikroskopisch M 80:1 [WAGENFÜHR 1999]
Holzstrahlen in zwei verschiedenen Größen:
große Holzstrahlen 6...38...80 mm hoch (min..MW..max)
kleine Holzstrahlen 80...160...240 µm hoch (makroskopisch nicht sichtbar!) [13]

- Jahrringe bzw. Zuwachszonen

Zuwachszonen entstehen als Folge eines durch Ruhepausen unterbrochenen Baumwachstums. In allen Klimagebieten mit winterlicher Vegetationsruhe (gemäßigte und kalte Zonen) sind diese Zuwachszonen i. d. R. dem jährlichen, ringförmigen Zuwachs eines Baumes gleichzusetzen. Daher werden sie Jahrringe genannt. Sie ermöglichen am unteren Baumquerschnitt in etwa das Alter des Baumes abzulesen und sie geben v. a. Auskunft über wachstumsfördernde oder -hemmende Faktoren (z. B. Klima), die während des Baumwachstums auftraten. Laub abwerfende Bäume subtropischer und tropischer Gebiete bilden in Abhängigkeit vom Wechsel der Trocken- und Regenzeiten Zuwachszonen aus, die nicht den Jahrringen entsprechen. Hölzer aus immergrünen Tropenwäldern mit ununterbrochener Wachstumstätigkeit (also ohne Knospenruhe) weisen fast oder überhaupt keine Zuwachszonen auf [13].

- Harzkanäle

Harzkanäle erscheinen auf dem Querschnitt als helle oder dunkle Punkte überwiegend im Spätholz einiger Nadelhölzer (z. B. Kiefer, Fichte, Lärche, Douglasie; einige tropische Laubhölzer, z. B. Meranti). Sie beeinflussen die Be- und Verarbeitbarkeit sowie die Verwendbarkeit des Holzes [13].

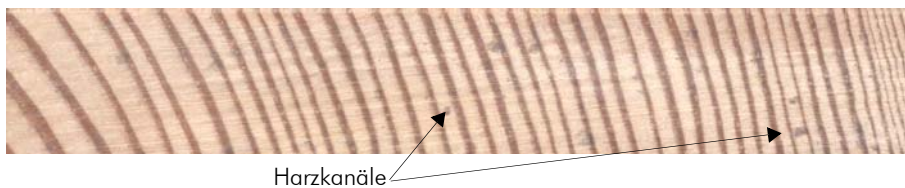


Abb. 1.9 makroskopischer Querschnitt von Kiefer mit Harzkanälen (mikroskopische Abbildung eines Harzkanals [13])

1.2 Kenngrößen

Holz ist ein kapillarporöser Stoff. Der Porenanteil beträgt je nach Rohdichte des Holzes im Durchschnitt zwischen 50 % und 60 %. Dadurch bedingt hat Holz eine sehr große innere Oberfläche. Dieses Hohlraumsystem absorbiert wie alle porösen Stoffe, Wasser aus der Luft und kann darüber hinaus durch kapillare Transportprozesse unmittelbar flüssiges Wasser oder andere Flüssigkeiten (z. B. Holzschutzmittel, Klebstoffe) aufnehmen [6].

Abhängig vom Wasseranteil im Holz unterscheidet man drei Grenzzustände:

- Darrtrocken
Es befindet sich kein Wasser im Holz, die Holzfeuchte nach Gleichung (1.1) beträgt 0 %.
- Fasersättigungsbereich (u_{FS})
Das gesamte interzelluläre Hohlraumsystem (Mikrosystem) ist mit Wasser gefüllt, d.h. es befinden sich keine Lufträume mehr im Holz. Bei den meisten Holzarten liegt der Fasersättigungsbereich im Bereich von $24 \% \leq u_{FS} \leq 32 \%$, im Schnitt also bei 28 % Holzfeuchte. Diese relativ großen Schwankungen sind durch die Unterschiede des Anteils der Holzinhaltsstoffe erklärbar.
Der Fasersättigungsbereich für verschiedene Holzarten wurde in der Arbeit von Popper, Niemz [24] experimentell bestimmt. Bei der Fichte liegt der Fasersättigungsbereich u_{FS} im Bereich von $21 \% \leq u_{FS} \leq 31 \%$.
- Wassersättigung (u_{max})
Steigt der Wassergehalt über den Fasersättigungsbereich hinaus, wird neben dem Mikrosystem auch das Makrosystem (Zelllumina, Hohlräume in Zellwänden) mit Wasser gefüllt.

Der Wasseranteil im Holz oberhalb des Fasersättigungsbereiches wird dabei als freies Wasser, jener Wasseranteil unterhalb des Fasersättigungsbereiches als gebundenes Wasser bezeichnet [6], [24].

1. 2. 1 Holzfeuchtegehalt u

Der prozentuale Holzfeuchtegehalt u ist wie folgt definiert:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.1)$$

Wobei: u ... (prozentualer) Holzfeuchtegehalt [%]

m_u ... Masse des feuchten Holzes [g]

m_0 ... Masse des darrtrockenen Holzes ($u=0$) [g]

Nach dieser Definition kann der Holzfeuchtegehalt u auch mehr als 100 % betragen. Dies kann etwa im Splintbereich von Nadelhölzern auftreten, da hier der Feuchtetransport des lebenden Baumes stattfindet. Hier kann die Holzfeuchte Werte von bis zu 150 % annehmen [13].

1. 2. 2 maximaler Feuchtegehalt von Holz

Wenn der Fasersättigungsbereich des Holzes überschritten wird, kommt es zu einer Einlagerung von freiem Wasser in das Makrosystem. Der maximale Feuchtegehalt ist näherungsweise wie folgt definiert [13]:

$$u_{\max} \cong u_{FS} + \frac{1500 - \rho_{dtr}}{1,5 \cdot \rho_{dtr} \cdot 10^{-2}} \quad [\%] \quad (1.2)$$

Wobei: u_{\max} ...maximaler Feuchtegehalt [%]

u_{FS} ...Feuchtegehalt Fasersättigungsbereich [%]

ρ_{dtr} ...Darrdichte [kg/m^3]

1.3 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte kann über mehrere Methoden erfolgen. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen direkten und indirekten Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte.

1.3.1 direkte Holzfeuchtebestimmung

Zur direkten Holzfeuchtebestimmung gehören

- das *thermische Trocknen*, insbesondere die *Darrmethode*, das Trocknen über *Absorbentien* oder im *Vakuum (Exsikkator)* sowie
- das *Destillations- bzw. Extraktionsverfahren*, das in besonderen *Glasapparaturen* mit *Lösungsmitteln*, die sich nicht mit Wasser mischen, durchgeführt und bei Vorliegen *harz- und inhaltsstoffreicher* oder mit *öligen Mitteln imprägnierter Hölzer* bevorzugt wird.

Bei den direkten Methoden der Feuchtebestimmung wird der Holzprobe die gesamte Feuchte entzogen und der Wasseranteil entweder gravimetrisch aus dem Masseverlust der Probe oder volumetrisch nach Kondensation des entwichenen Wasserdampfes bestimmt. Sie erfordern einen verhältnismäßig hohen Zeitaufwand und sind für die kontinuierliche Erfassung der Holzfeuchte wenig geeignet, sie liefern aber die zuverlässigeren und von einer Kalibrierung unabhängigen Ergebnisse [13].

In der Praxis wird bei den Methoden der direkten Feuchtebestimmung vor allem die **Darrmethode** mittels Darrschrank angewandt.

- **Darrmethode**

Die Darrmethode ist eine sehr exakte Messmethode, die insbesondere für wissenschaftliche Untersuchungen, aber auch als Vergleichsmethode zur Kalibrierung von Holzfeuchtemessgeräten und -verfahren eingesetzt wird. Von allen Methoden zur Holzfeuchtebestimmung ist es das einzige genormte Verfahren (u. a. in DIN 52 183 (1977)).

Die Holzprobe wird dabei sofort nach der Entnahme gewogen (Masse m_u) und anschließend bei $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in einem Wärmeschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Das Austreiben der Feuchte kann auch im Vakuumofen bei niedrigeren Temperaturen, zwischen Heizplatten, unter Infrarotstrahlern, im Hochfrequenzfeld usw. vorgenommen werden. Nach Abkühlung der Probe im Exsikkator über einem Trockenmittel zur Vermeidung einer erneuten Feuchteaufnahme wird die Masse der darrtrockenen Probe (Masse m_0) ermittelt [13].

Mit den Werten von m_u und m_0 kann somit die Holzfeuchte u nach Glg. (1.1) berechnet werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - messtechnisch einfach zu realisieren - preiswert 	<ul style="list-style-type: none"> - zeitaufwändig 20 h - 60 h Trocknungszeit je nach Ausgangsfeuchte - erfordert sorgfältiges Arbeiten - Zerstörung des Probenmaterials - thermische Zersetzung beginnt bereits bei der vorgeschriebenen Temperatur, genau genommen wird eine Gewichtskonstanz nicht erreicht - eingeschränkte Genauigkeit, denn durch akzessorische Stoffe im Holz mit Siedepunkten unterhalb oder im Bereich desjenigen des Wassers (z. B. ätherische Öle, Terpene, Harze, Fette) kann das Ergebnis um 5 % - 10 % verfälscht werden

Tab. 1.1 Vor- und Nachteile des Darrverfahrens [13]



Abb. 1.10 Darrschrank zur Trocknung des Holzes

- **das Destillations- bzw. Extraktionsverfahren**

Es gibt Hölzer, die ätherische Öle, Terpene, Harze, Fette oder auch ölige Imprägniermittel enthalten. Durch diese akzessorischen Stoffe kommt es bei der Darrmethode zu fehlerhaften Holzfeuchte-Messwerten. Die fehlerhaften Werte entstehen durch die Verflüchtigung der oben genannten Stoffe. Nach Kollmann [5] kann die Abweichung vom tatsächlichen Holzfeuchtegehalt bis zu 10 % betragen! Daher wird für diese Holzarten das Destillations- bzw. Extraktionsverfahren angewandt.

Die Holzprobe wird zerkleinert in einen Glaskolben mit einem Lösungsmittel (Xylol, Tylol), welches sich durch Erhitzung nicht verflüchtigt vermischt. Durch die Erhitzung entweicht der Wasserdampf aus dem Holz. Er kondensiert an einem über der Vorlage angebrachten Kühler und schlägt sich nieder. Das so gewonnene Wasser wird in einem Steigrohr gesammelt. Somit kann die enthaltene Wassermenge, und daraus die Holzfeuchte u nach Glg. (1.1) berechnet werden [6].

$$u = \frac{m_w}{m_u - m_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

Wobei: u ... (prozentualer) Holzfeuchtegehalt [%]

m_w ... Masse des Wassers [g]

m_u ... Masse des feuchten Holzes [g]

1. 3. 2 indirekte Holzfeuchtebestimmung

Verfahren und Messgeräte der indirekten Holzfeuchtebestimmung verändern den Feuchtegehalt des Holzes nicht. Sie benutzen als Messgröße bestimmte feuchteabhängige Eigenschaften des Holzes, wie z. B.

- den Wasserdampfdruck über dem Holz in Verbindung mit dem Feuchtegleichgewicht,
- die elektrische Leitfähigkeit,
- die Reflexion, Absorption oder Transmission elektromagnetischer Strahlung (Infrarot, Mikrowellen) sowie
- die Abschwächung von auftreffenden Elementarteilchen (schnelle Neutronen, Beta-Teilchen) [13].

Für die indirekte Holzfeuchtebestimmung kommen vor allem die Methoden der **elektrischen Leitfähigkeit** zum Einsatz. Daher wird auf diese Messverfahren näher eingegangen.

- elektrische Leitfähigkeit

- Widerstandsmessung

Der elektrische Widerstand [Ω] ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit eines Stoffes. Wasser ist bekanntermaßen ein relativ guter elektrischer Leiter. Je höher der Wassergehalt im Holz ist, desto geringer ist der elektrische Widerstand [Ω]. Infolgedessen steigt er mit sinkendem Wassergehalt an. Bei einer Holzfeuchte zwischen 5 % und 22 % ist der Logarithmus des elektrischen Widerstandes annähernd linear zur Holzfeuchte (Abb. 1.12). Beeinflusst wird der elektrische Widerstand weiters durch die Holzart und die Temperatur des Holzes. Deshalb muss für jede Holzart eine eigene Kalibrierungskurve zur Ermittlung der Holzfeuchte mit der Widerstandsmessung ermittelt werden. In Abb. 1.11 ist ein gängiges Holzfeuchtemessgerät, basierend auf dem Prinzip der elektr. Widerstandsmessung dargestellt. Die Rammsonde im linken Abschnitt des Bildes wird dabei in das Holz eingeschlagen. Die Messung des Widerstandes und der Feuchtigkeit erfolgt im Bereich zwischen den Elektrodenspitzen [13].



Abb. 1.11 Holzfeuchtemessgerät basierend auf elektrischer Widerstandsmessung

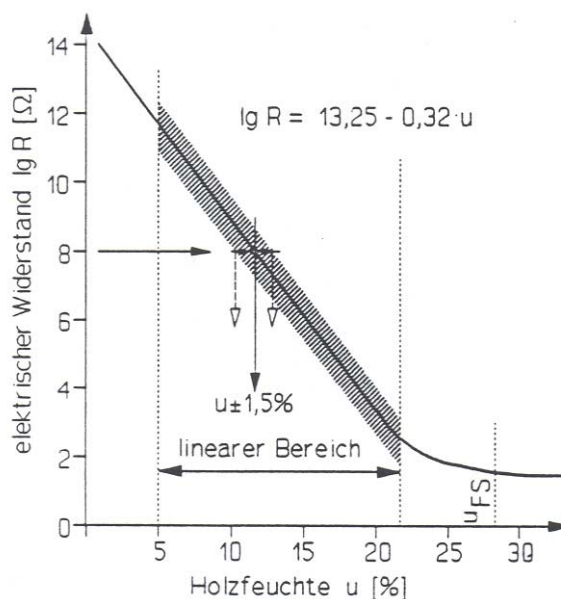


Abb. 1.12 Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Holzfeuchte [RESSEL 1992] [13]

Der elektrische Widerstand des Holzes soll weiters auch von der Orientierung der Fasern zwischen den Elektroden abhängig sein. Demnach müsste es einen Unterschied geben, ob man die Elektroden parallel oder quer zur Faserrichtung einschlägt. Dem widerspricht aber der Bericht von Forsen [9]. In dieser Untersuchung wurden insgesamt 16 Holzfeuchtemessgeräte basierend auf der elektrischen Widerstandsmessung getestet. Es konnte jedoch kein Unterschied der elektrischen Leitfähigkeit zwischen parallel und quer zur Faserrichtung festgestellt werden.

Auch die Behauptung der Abstand der Elektroden spiele eine Rolle, konnte in [9] nicht bestätigt werden. Forsen [9] variierte den Abstand der Elektroden zueinander mit 20 mm, 30 mm, 60 mm und 120 mm die, elektr. Widerstände waren jedoch immer ident. Lediglich der gemessene Bereich der Holzfeuchte wurde dadurch größer. Wählt man die Abstände größer, dürfte es einen Einfluss geben, jedoch ist der Abstand bei den gängigen Holzfeuchtemessgeräten nicht relevant.

Die Genauigkeit der Messung mit marktgängigen Holzfeuchtemessgeräten liegt nach Forsen [9] bei $\pm 1,5\%$ bis $\pm 2\%$ für Laborbedingungen, in der Praxis können sich jedoch auch größere Abweichungen einstellen ($\pm 2\%$ bis $\pm 5\%$).

- kapazitive Messverfahren

Das Verfahrensprinzip beruht auf dem Unterschied der relativen Dielektrizitätskonstanten zwischen darr trockenem Holz ($\epsilon_r=2...3$) und Wasser ($\epsilon_r=81$).

Der Messbereich beginnt bei 0 % Holzfeuchte; oberhalb der Fasersättigungsfeuchte (ab rund 25 %) überwiegt der Einfluss des Wassers auf die resultierende Dielektrizitätskonstante, sodass die Messgenauigkeit rasch abfällt.

Die Messungen erfolgen ohne Beeinträchtigung des Holzgefüges durch bloßes Anlegen der Messbügel, wobei die HF-Wellen (Hochfrequenzwellen) das Messgut bis in etwa 50 mm Tiefe durchdringen.

Im Gegensatz zum Widerstands-Messverfahren bestimmen nicht die feuchtesten Holzschichten das Messergebnis, sondern der jeweilige Mittelwert. Jedoch besteht eine erhebliche Abhängigkeit von der Rohdichte des Holzes. Um eine hinreichend genaue Aussage zu erhalten, sind für jede Holzart empirisch zu bestimmende Eichkurven erforderlich.

Das dielektrische (kapazitive) Verfahren wird industriell vor allem zur Spanfeuchtemessung genutzt [13].

Die Genauigkeit der Messung liegt nach Forsen [9] bei $\pm 2,5$ % bis ± 4 % für Laborbedingungen, in der Praxis können sich größere Abweichungen einstellen (± 3 % bis ± 5 %).



Abb. 1.13 Materialfeuchtesensor basierend auf einer kapazitiven Messung

2 Grundlagen der Feuchteaufnahme und -abgabe

2.1 Sorption

Wie bereits in Abschnitt 1 festgestellt wurde, ist Holz ein kapillarporöser Stoff, indem sowohl das Mikro-, als auch das Makrosystem Wasser aufnehmen können. Holz ist immer bestrebt, mit seinem Umgebungsklima in Feuchtgleichgewicht zu kommen. Dies geschieht durch Wasserdampfaufnahme (Adsorption) bzw. Wasserdampfabgabe (Desorption). In Abb. 2.1 sind die unterschiedlichen Bindungsformen von Wasser im Holz dargestellt.

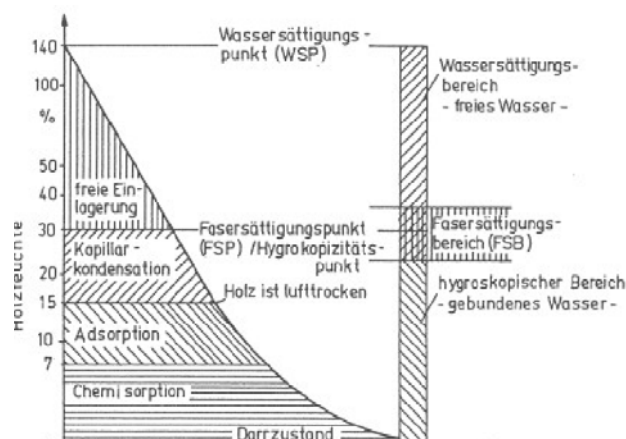


Abb. 2.1 schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz [6]

Die Adsorption oder Desorption findet so lange statt, bis der Wasserdampfdruck p_D des Holzes jenem der umgebenden Luft entspricht. Die Ausgleichsfeuchte $u_{gl,ad}$ bzw. $u_{gl,de}$ [%] des Holzes ist immer abhängig von

- der Temperatur [9],
- der relativen Luftfeuchte $[\varphi]$ der umgebenden Luft,
- dem Luftdruck und
- dem Aufbau des Holzes bzw. der Holzart.

Diesen Sachverhalt bezeichnet man als hygrokopisches Verhalten von Holz [6].

Da die relative Luftfeuchte immer abhängig von der Temperatur ist, ist auch die Holzgleichsfeuchte u_{gl} von der Umgebungstemperatur abhängig. Die geschilderten Vorgänge werden in Abb. 2.2 für Fichtenholz in Zusammenhang gebracht. Um die Holzgleichsfeuchte zufolge Abb. 2.2 zu bestimmen, benötigt man die Umgebungstemperatur [9] sowie die rel. Luftfeuchte [φ]. Der Einfluss des Luftdruckes kann vernachlässigt werden. So erhält man für eine Umgebungstemperatur [9] von 20 °C und einer rel. Luftfeuchte [φ] von 65 % eine Holzgleichsfeuchte u_{gl} von rund 12 %.

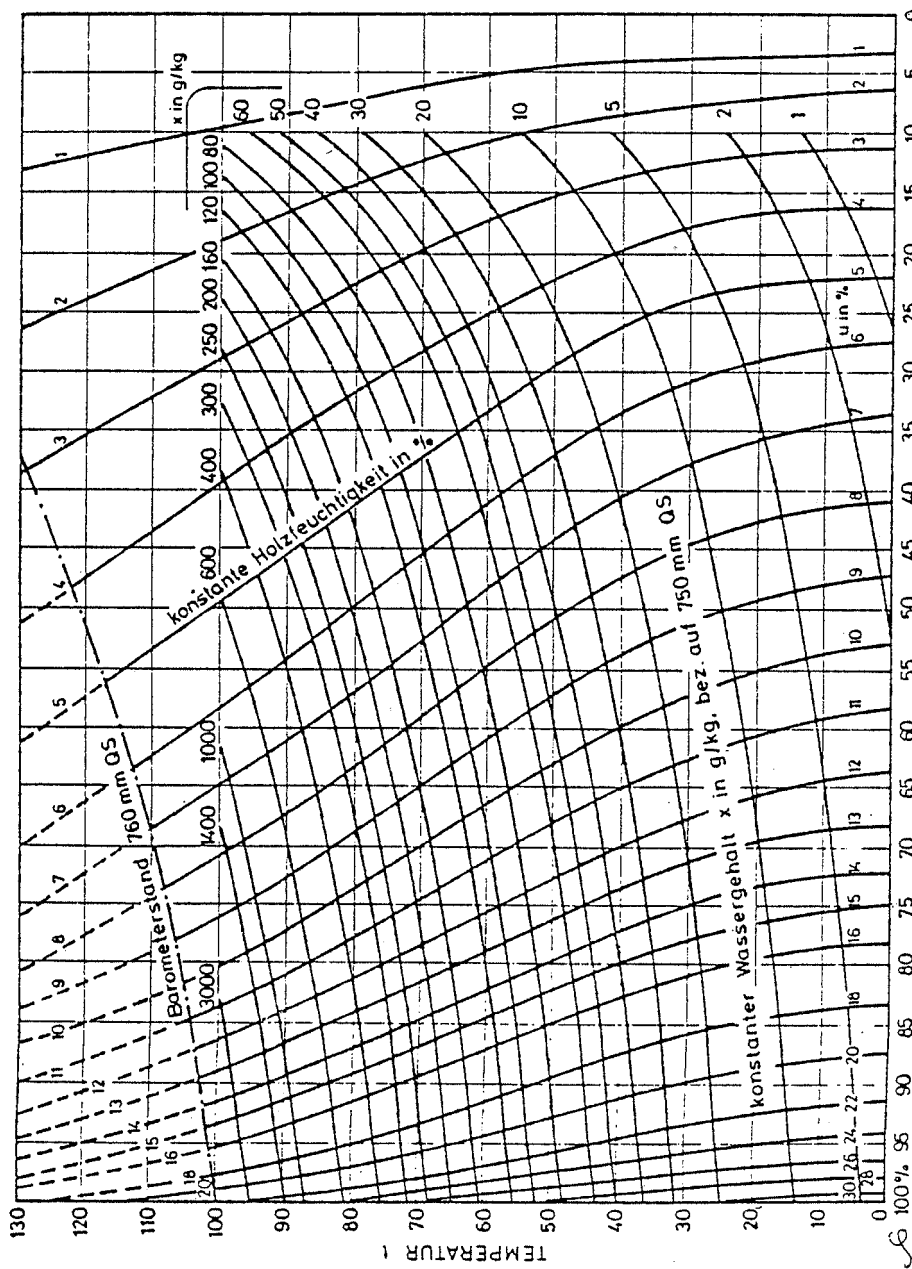


Abb. 2.2 Holzgleichsfeuchten nach Loughborough für Fichte [12]

In Abb. 2.3 ist das Adsorptionsverhalten von Fichte bei einer konstanten Temperatur [9] von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte $[\varphi]$ zwischen 0 % und 100 % dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse stützen sich auf den Untersuchungen von Popper/Niemz [24].

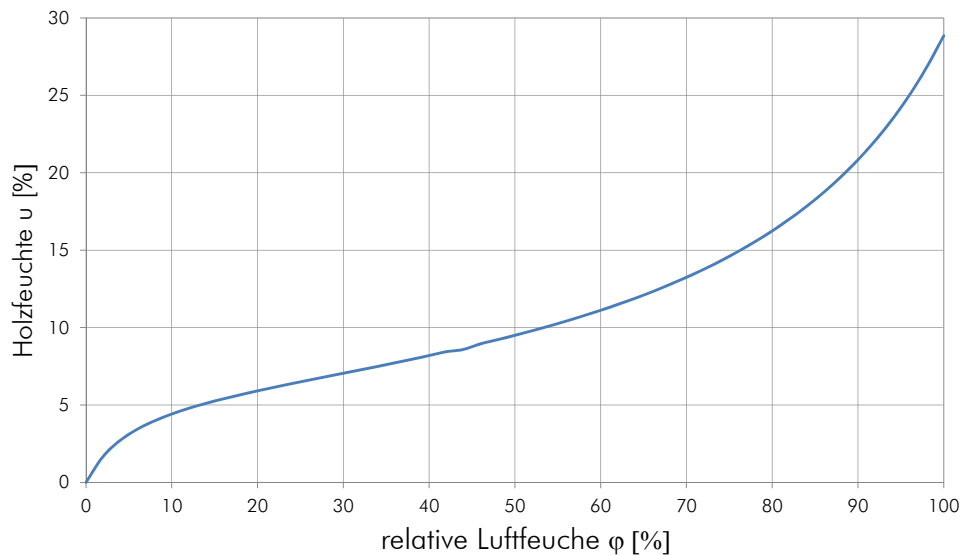


Abb. 2.3 Adsorptionsverhalten von Fichte bei 20 °C und variabler relativer Luftfeuchte

Die Ausgleichsfeuchte des Holzes ist bei Adsorption und Desorption unterschiedlich ($u_{gl,ad} \neq u_{gl,de}$). Durch dieses unterschiedliche Verhalten entsteht bei u_{gl} Kurven konstanter Temperatur eine Sorptionshysterese (Abb. 2.4).

Der Feuchtegehalt bei der Desorption ist um rund 1-2 % höher als bei der Adsorption.

Zur Erklärung dieses Phänomens dienen verschiedene Modelle, welche in Abschnitt 2. 3 erläutert werden [6].

2.2 Phasen der Adsorption

Je nach Umgebungsklima unterscheidet man drei Stufen der Adsorption.

- **Chemisorption**
Sorption infolge molekularer Anziehungskräfte
 Holzfeuchte $0 \% \leq u \leq 6 \%$; relative Luftfeuchte $0 \% \leq \varphi \leq 20 \%$

Die Chemisorption, oder auch physikalische Adsorption, ist die erste Phase der Sorption. Aufgrund der ungeordneten Moleküllagerung im amorphen Bereich des Cellulosegerüsts entstehen zwischenmolekulare Kräfte (Nebervalenzen). Durch Wasserstoffbrücken werden Wassermoleküle zwischen benachbarten Celluloseketten eingelagert. Dadurch bildet sich eine monomolekulare Schicht, welche bei voller Ausbildung einen Feuchtegehalt von 4-6 % erreichen kann. Das Holzvolumen nimmt durch diese Einlagerung jedoch noch nicht an Volumen zu.

- **(Polymolekulare) Adsorption (BET-Adsorption)**
Sorption infolge von Anziehungskräften der „inneren Oberfläche“ des Holzes
 Holzfeuchte $6 \% \leq u \leq 20 \%$; relative Luftfeuchte $20 \% \leq \varphi \leq 90 \%$

Durch elektrische Anziehungskräfte entsteht eine weitere Anlagerung von Wasser. Es bildet sich eine polymolekulare Wasserschicht. Es kommt zum Quellen des Holzes.

- **Kapillarkondensation**
Sorption infolge von Kapillarkräften
 Holzfeuchte $20 \% \leq u \leq \text{Fasersättigungsbereich } u_{FS}$;
 relative Luftfeuchte $90 \% \leq \varphi \leq 100 \%$

Ein Teil des Wasserdampfes kondensiert in den Kapillaren. Dadurch entsteht flüssiges Wasser, welches sich in die Hohlräume einlagern kann [6].

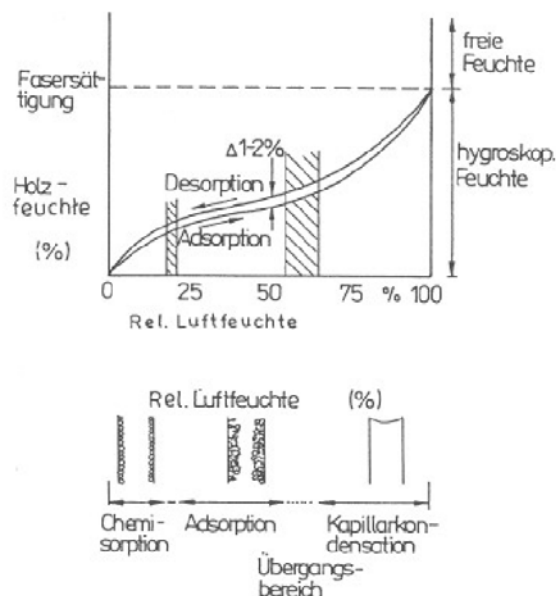


Abb. 2.4 Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers [6]

2.3 Sorptionshysterese

Der Grund für die Sorptionshysterese von Holz ist nach heutigem Wissensstand noch nicht eindeutig geklärt. Die nachfolgenden Angaben stützen sich auf den Veröffentlichungen von Time [8] und Kollmann [5].

Wird frisch eingeschnittenes (grünes) Holz, welches über dem Fasersättigungsbereich ($u > u_{FS}$) liegt einer ersten Trocknung unterworfen, und anschließend wieder über den Fasersättigungsbereich hinaus befeuchtet, so ist festzustellen, dass sich nicht mehr die ursprüngliche Holzgleichsfeuchte u_{gl} einstellt. Es bildet sich eine sogenannte Sorptionshysterese aus.

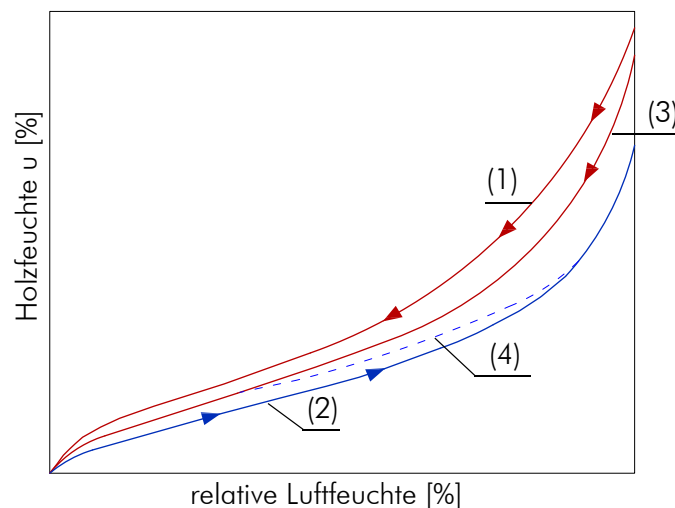


Abb. 2.5 Sorptionshysterese
(1) Desorptions-Isotherme von frisch eingeschnittenem Holz
(2) Adsorptions-Isotherme
(3) Desorptions-Isotherme nach erneutem Trocknen
(4) mittlere Isotherme [8]

Die Desorptions-Isotherme des frisch eingeschnittenen Holzes ist höher als die Adsorptions-Isotherme. Nach einmaligem Trocknen und Wiederbefeuchten liegt die Desorptions-Isotherme bereits unter der Isotherme des frisch eingeschnittenen Holzes, jedoch noch über der Adsorptions-Isotherme. Bei sehr niedrigem Dampfdruck scheint die Hysterese zu verschwinden. Da bei niedrigem Dampfdruck Chemisorption vorliegt, dürfte es sich hier um einen reversiblen Vorgang handeln. Bei höherem Dampfdruck liegt Adsorption- und Kapillarkondensation vor. Hier ist der Vorgang irreversibel. Der Zusammenhang der Sorptionshysterese und den Bindungsformen des Wassers ist in Abb. 2.4 dargestellt.

Durch Änderungen im Umgebungsklima kommt es zu einer oszillierenden Sorption. Das bedeutet, dass ein Wechsel zwischen Adsorption und Desorption sich ständig wiederholt. Durch diesen Wechsel rücken die Sorptionsisothermen enger aneinander, wodurch die Hysterese kleiner wird. Die Begründung liegt in der Trägheit der Moleküle, welche in Abschnitt 2. 3. 1 näher erläutert wird [8];[5].

Für die Erklärung der Hysterese gibt es unterschiedliche Modelle, wobei in dieser Arbeit nur auf das am weitesten verbreitete Modell in der Veröffentlichung von Kollmann [5] eingegangen wird.

2. 3. 1 Erklärung der Hysterese

Die Begründung der Sorptionshysterese muss auf zwei Bereiche aufgespalten werden:

Zum einen den Bereich der Chemisorption und Adsorption, zum anderen jenen der Kapillarkondensation.

Die Theorie der Sorptionshysterese bei der Chemisorption basiert auf der Annahme, dass bei der Adsorption weniger freie Hydroxylgruppen vorhanden sind als bei der Desorption. Die Hydroxylgruppen sind für die Einlagerung bzw. Abgabe von Wasser im Holz in den Zellwänden verantwortlich.

Die Hydroxylgruppen im feuchten Holz sind an die Wassermoleküle gebunden. Kommt es nun zu einer Trocknung des Holzes, verlieren die Hydroxylgruppen ihre Bindung mit den Wassermolekülen. Durch das Schwinden des Holzes werden die Hydroxylgruppen näher aneinander gedrückt und verbinden sich miteinander.

Durch die Trägheit der Fadenmoleküle erreichen sie jedoch nicht jene Lage in der die potentielle Energie ein Minimum annimmt. Je trockener die Cellulose wird, umso mehr nähern sie sich dieser Lage. Kommt es wieder zu einer Befeuchtung, so haben die Moleküle das Bestreben sich wieder mit Wasser zu binden. Durch die Trägheit des Systems sind aber nicht alle Moleküle für die Wasserbindung verfügbar, wodurch es für die Wasserbindung zu ungünstigeren Verhältnissen als bei der Wasserabgabe kommt.

Bei einer Luftfeuchte von mehr als 60 % gibt es eine andere Erklärung für die Sorptionshysterese. Kommt es zur Desorption, so sind die Wände der submikroskopischen Kapillaren feucht, während die darin „stehenden“ Wassersäulen bereits kleiner geworden sind. Dadurch ist die Benetzung in den Kapillaren besser. Dies hat zur Folge, dass die sich bildenden konkaven Menisken (Abb. 2.6) einen kleineren Krümmungshalbmesser aufweisen.

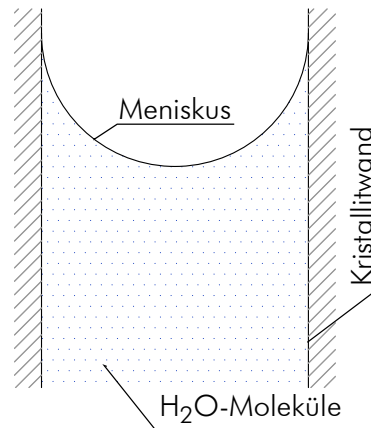


Abb. 2.6 Meniskusbildung in einer submikroskopischen Kapillare nach Kollmann [5]

Hingegen sind bei der Adsorption die Kristallitwände nicht mit Wasser benetzt, wodurch sich bei den konkaven Menisken größere Krümmungshalbmesser ausbilden. Durch die unterschiedlichen Krümmungen der Menisken entstehen auch unterschiedliche Dampfspannungen. Die Dampfspannungen sind bei gleicher Stofffeuchtigkeit bei der Desorption geringer als bei der Adsorption. Bei hohen Feuchtigkeiten nähern sich die Sorptionskurven und laufen bei Sättigung zusammen. Da bei gesättigter Atmosphäre die Krümmungshalbmesser unendlich groß werden, steht diese Theorie im Einklang mit den praktischen Beobachtungen [5].

3 Quell- und Schwindverhalten von Holz

3.1 Kenngrößen [13]

Holz erfährt durch Wasseraufnahme bzw. -abgabe im hygroskopischen Bereich ($u < u_{FS}$) eine Volumenänderung: es „arbeitet“. Die Desorption führt zu einer Volumenverringerng (Schwinden), die Adsorption zu einer Volumenzunahme (Quellung). Diese Volumenänderungen sind auf Einlagerung bzw. Abgabe von Wasser in die intermizellaren und interfibrillaren Zellen zurückzuführen. Überschreitet der Wassergehalt den Fasersättigungsbereich ($u > u_{FS}$) ist die Volumenänderung weitgehend beendet.

Um eine Aussage über das Quell- und Schwindverhalten von Holz treffen zu können, wurde das Quellmaß α und das Schwindmaß β definiert, wobei sich das Quellmaß auf den Darrzustand und das Schwindmaß auf den maximal gequollenen Zustand des Holzes bezieht.

Aufgrund dieser Definition gilt immer: $\alpha > \beta$! Da sich Quell- und Schwindmaß nur durch ihre Bezugsbasis voneinander unterscheiden, können sie ineinander umgerechnet werden. Durch den anisotropen Aufbau des Holzes ergeben sich unterschiedliche Formänderungsverhalten in den drei Hauptrichtungen.

Man unterscheidet Quell- und Schwindmaße in

- tangentialer (Index **T**),
- radialer (Index **R**) und
- longitudinaler (Index **L**) Richtung.

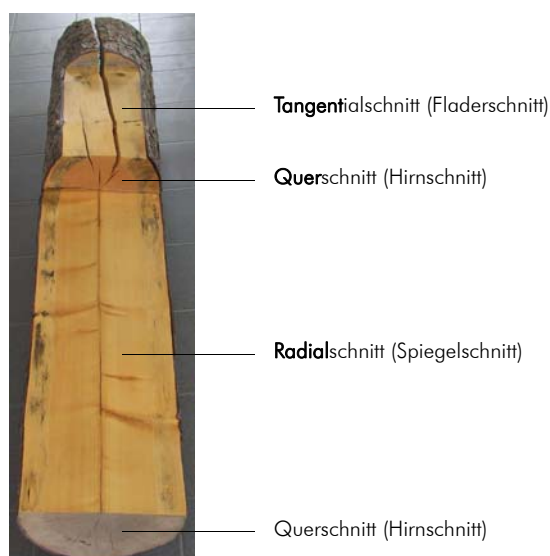


Abb. 3.1 Schnittführung bei den drei anatomischen Hauptschnitttrichtungen [13]

Aus den Quell- und Schwindmaßen in den drei Hauptrichtungen errechnet sich das resultierende Volumenquellmaß bzw. Volumenschwindmaß (Index **V**).

3. 1. 1 lineares Quellmaß α

Das **lineare Quellmaß α** beschreibt die Maßänderung des Holzes in einer bestimmten Hauptrichtung, bei Zunahme der Holzfeuchte von u_1 auf u_2 (l_2-l_1) bezogen auf das Maß im darrtrockenen Zustand ($u_0=0$ %).

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

Wobei: l_0, l_1, l_2 ..Maße des Holzes in einer Hauptrichtung bei Holzfeuchtegehalt u_0, u_1 und u_2 [mm]

Das **maximale lineare Quellmaß** ist ein Sonderfall des linearen Quellmaßes. Es ergibt sich bei der Quellung vom darrtrockenen Zustand auf den nassen Zustand des Holzes.

$$\alpha_{\max} = \frac{l_W - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

Wobei: l_W ...Maß des nassen Holzes ($u > u_{FS}$) in eine Hauptrichtung [mm]

Das **Volumenquellmaß α_V** ergibt sich aus den linearen Quellmaßen der drei Hauptrichtungen des Holzes.

$$\alpha_V = \frac{(100 + \alpha_t) \cdot (100 + \alpha_r) \cdot (100 + \alpha_l)}{10^4} - 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

Wobei: α_t ...Quellmaß tangential [%]
 α_r ...Quellmaß radial [%]
 α_l ...Quellmaß längs [%]

näherungsweise gilt: $\alpha_V \approx \alpha_t + \alpha_r + \alpha_l$ bzw. $\alpha_V \approx \alpha_t + \alpha_r$ (3.4)

Das Volumenquellmaß α_V kann auch durch Kenntnis der Darrdichte und der Feuchte im Fasersättigungsbereich empirisch ermittelt werden.

$$\alpha_V = u_F \cdot \rho_{dtr} \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

Wobei: u_F ...Feuchtegehalt Fasersättigungsbereich [%]
 ρ_{dtr} ...Darrdichte [kg/m³]

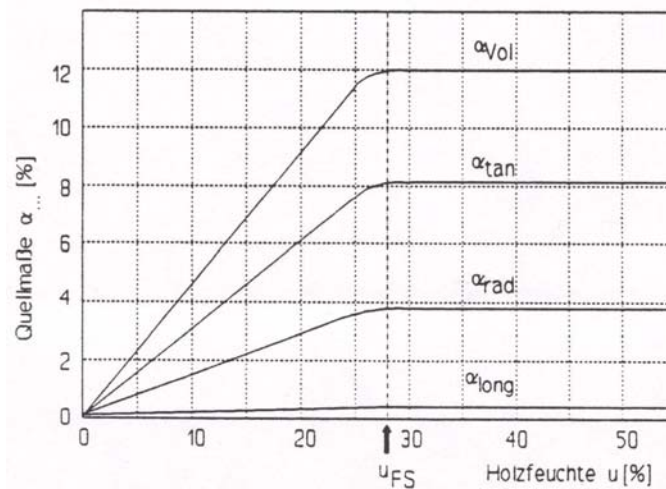


Abb. 3.2 Quellmaße α in den drei anatomischen Hauptrichtungen und Volumenquellmaß für Fichte. Die horizontalen Linien kennzeichnen das maximale lineare Quellmaß. [Ressel 1992]; [13]

3. 1. 2 lineares Schwindmaß β

Das **lineare Schwindmaß β** beschreibt die Maßänderung des Holzes in einer bestimmten Hauptrichtung, bei Abnahme der Holzfeuchte von u_2 auf u_1 (l_2-l_1) bezogen auf das Maß im nassen Zustand ($u > u_{FS}$) (l_W).

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_W} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

Wobei: l_W ...Maß des nassen Holzes ($u > u_{FS}$) in eine Hauptrichtung [mm]

Das **Trocknungs-Schwindmaß β_{max}** ist ein Sonderfall des linearen Schwindmaßes β . Es bezieht sich auf die Trocknung des nassen Holzes auf die Ausgleichsfeuchte bei einem Normklima (20 °C Temperatur und 65 % relativer Luftfeuchte).

$$\beta_{max} = \frac{l_W - l_N}{l_W} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

Wobei: l_N ...Maß des nassen Holzes in eine Hauptrichtung nach Lagerung bei Normklima (20 °C, 65 % relative Luftfeuchtigkeit) [mm]

Das **Volumenschwindmaß** β_V ergibt sich aus den linearen Schwindmaßen der drei Hauptrichtungen des Holzes.

$$\beta_V = \frac{(100 + \beta_t) \cdot (100 + \beta_r) \cdot (100 + \beta_l)}{10^4} - 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

Wobei: β_t ...Schwindmaß tangential [%]
 β_r ...Schwindmaß radial [%]
 β_l ...Schwindmaß längs [%]

näherungsweise gilt: $\beta_V \approx \beta_t + \beta_r + \beta_l$

Bei der **Umrechnung zwischen α und β** gelten folgende Beziehungen:

$$\beta = \frac{100 \cdot \alpha}{100 + \alpha} \quad (3.9)$$

$$\alpha = \frac{100 \cdot \beta}{100 - \beta} \quad (3.10)$$

3. 1. 3 Quellungskoeffizient h

Der Quellungskoeffizient h gibt das prozentuale Quellmaß des Holzes je 1 % Änderung der relativen Luftfeuchte an. Er gilt für einen relativen Luftfeuchtegehalt von etwa $\varphi_T \approx 35\%$ bis $\varphi_F \approx 85\%$, was dem baupraktisch relevanten Luftfeuchtebereich entspricht. Für die Praxis ist der Quellungskoeffizient ein gängiges Werkzeug, um das Quellverhalten von Holzbauteilen zu beurteilen.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100 \quad [\%/ \%] \quad (3.11)$$

Wobei: φ_F ...relative Luftfeuchte Feuchtklima [%]
 φ_T ...relative Luftfeuchte Trockenklima [%]
 l_F ...Maß des Holzes im Feuchtklima [mm]
 l_T ...Maß des Holzes im Trockenklima [mm]
 l_0 ...Maß des Holzes im darrtrockenen Zustand [mm]

Die Maße l_F und l_T sind nach Erreichen der Holzgleichsfeuchte zu messen!

3. 1. 4 differentielle Quellung q

Die differentielle Quellung q bezieht sich im Gegensatz zum Quellungskoeffizienten h nicht auf die Änderung der relativen Luftfeuchte φ , sondern auf die Änderung der Holzfeuchte u .

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100 \quad [\%/ \%] \quad (3.12)$$

Wobei: u_F ...Holzausgleichsfeuchte im Feuchtklima [%]
 u_T ...Holzausgleichsfeuchte im Trockenklima [%]
 l_F ...Maß des Holzes im Feuchtklima [mm]
 l_T ...Maß des Holzes im Trockenklima [mm]
 l_0 ...Maß des Holzes im darrtrockenen Zustand [mm]

3. 1. 5 Anisotropie der Quell und Schwindmaße

Die Quell- und Schwindmaße in den drei Hauptrichtungen des Holzes unterscheiden sich deutlich voneinander. Das geringste Quell- und Schwindmaß ist das Längsquellmaß α_l bzw. Längsschwindmaß β_l . Der Grund hierfür liegt in der Orientierung der Fibrillen in Längsrichtung und dem geringen Anteil von quer zur Faserrichtung liegenden Zellwänden. Eine Umrechnung der Quell- und Schwindmaße ist näherungsweise nach Gleichung (3.13) möglich.

$$\alpha_t \approx 1,66 \alpha_r \quad \text{und} \quad \alpha_t \approx 23 \alpha_l \quad (3.13)$$

Die Quell- und Schwindmaße in tangentieller und radialer Richtung unterscheiden sich aufgrund folgender Ursachen

- größere Durchmesser von radial verlaufenden quellfähigen Mittellamellen,
- unterschiedlichen Fibrillenaufbau in Radial- und Tangentialwand sowie
- bessere Verankerung der Zellwände in radialer Richtung durch Holzstrahlen.

Bei Schnittholz kommt es aufgrund der oben genannten Unterschiede der Quell- und Schwindmaße zu Verzerrungen im Holz, welche in Abb. 3.3 dargestellt sind.

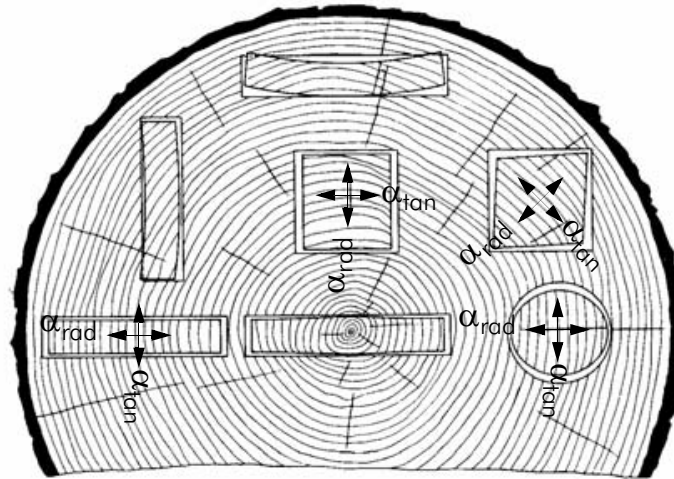


Abb. 3.3 Verzerrung von Holz durch unterschiedliches Schwinden bzw. Quellen [6]

Um die Querschnittsverformungen bei einer Quellung abschätzen zu können, bildet man vielfach den Quotienten aus der differentiellen Quellung in tangentialer und radialer Richtung, welcher als Quellungsanisotropie A_q bezeichnet wird.

$$A_q = \frac{q_t}{q_r} \quad (3.14)$$

Wobei: q_t ...differentielle Quellung tangential
 q_r ...differentielle Quellung radial

Um die Querschnittsverformungen beim Schwinden abschätzen zu können, bildet man analog den Quotienten der Trocknungs-Schwindmaße in radialer und tangentialer Richtung. Dieser wird als Trocknungs-Schwindmaß A_β bezeichnet.

$$A_\beta = \frac{\beta_{N,t}}{\beta_{N,r}} \quad (3.15)$$

Wobei: $\beta_{N,t}$...Trocknungs-Schwindmaß tangential
 $\beta_{N,r}$...Trocknungs-Schwindmaß radial

Bei den unterschiedlichen Holzarten stellen sich erhebliche Unterschiede bei den Quell- bzw. Schwindmaßen ein. Die Quellungs- und Schwindungsanisotropie ist jedoch für nahezu alle Holzarten konstant.

3.2 Quell- und Schwindmaße

Je nach Holzart variieren die Quell- und Schwindmaße. Die vorher beschriebenen mikro- und makroskopischen Strukturen des Holzes schwanken zwischen den einzelnen Holzarten, aber auch innerhalb einer Holzart. In Tab. 3.1 sind die linearen Quellmaße α_{max} , der Quellungskoeffizient h und die differentielle Quellung q angeführt. Steigt die Rohdichte des Holzes an, so steigt auch das Quellmaß. Der Grund hierfür liegt im höheren Zellwandanteil und der damit verbundenen größeren inneren Oberfläche. In guter Näherung kann man die unterschiedlichen linearen Quell- und Schwindmaße in den anatomischen Hauptrichtungen des Holzes mit einem Verhältnis von $L : R : T = 1 : 10 : 20$ beschreiben [13].

Holzart	maximales lineares Quellmaß α_{max} [%]			Quellungskoeffizient h [%/%]		differentielle Quellung q [%/%]	
	längs*	rad	tan	rad	tan	rad	tan
	L	R	T	R	T	R	T
Fichte	0,2...0,4	3,7	8,5	0,037	0,070	0,19	0,36
Kiefer	0,2...0,4	4,2	8,3	0,035	0,068	0,19	0,36
Lärche	0,1...0,3	3,4	8,5	0,027	0,057	0,14	0,30
Rotbuche	0,2...0,6	6,2	13,4	0,032	0,065	0,20	0,41
Eiche	0,3...0,6	4,6	10,9	0,033	0,063	0,18	0,34

Tab. 3.1 lineare Quellmaße, Quellungskoeffizient und differentielle Quellung [13]

* min und max. Werte des linearen Quellmaßes längs

Zur Illustration sollen die geschilderten Fakten anhand eines kurzen Beispiels näher gebracht werden:

Ein BSH-Träger aus Fichte mit einer Höhe von 1000 mm wird mit einer Holzfeuchte von $u=12\%$ eingebaut. Durch die klimatischen Verhältnisse am Einbauort stellt sich eine Holzgleichsfeuchte von $u=18\%$ ein, es tritt eine Differenz der Holzfeuchte $\Delta u=6\%$ auf. Bildet man für eine Näherung den Mittelwert der differentiellen Quellung in radialer und tangentialer Richtung so erhält man

$$q_{mittel} = \frac{0,19 + 0,36}{2} = 0,27 \text{ [%/%]}.$$

Die daraus resultierende Quellung quer zur Faser errechnet sich somit zu

$$\Delta h = h \cdot q_{mittel} \cdot \Delta u = 1000 \cdot 0,27 \cdot 0,06 = 16,2 \text{ mm}.$$

Schon bei einer Schwankung der Holzfeuchte im Bereich der üblichen Sollfeuchten von Holzprodukten entstehen bereits erhebliche Verformungen. Daher sollte das verwendete Holz immer mit den zu erwartenden Holzausgleichsfeuchten eingebaut werden. Jedoch kann dies in der Praxis nicht immer realisiert werden, man denke etwa an eine offene Halle. Durch diese Verformungen können bei Behinderung sehr große Zwängungskräfte entstehen, welche es im Rahmen der konstruktiven Ausbildung zu berücksichtigen gilt.

3.3 freies- und behindertes Quellen bzw. Schwinden

In den Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden die grundsätzlichen Kenngrößen sowie die Quell- und Schwindmaße erläutert bzw. angeführt. Diese Größen beziehen sich jeweils auf die zu erwartenden Holzausgleichsfeuchten. Betrachtet man nur diese Anfangs- und Endzustände, so wird der Eindruck erweckt, das Quellen bzw. Schwinden des Holzes ohne die Entstehung von Zwängungsspannungen erfolgt. Man spricht hier vom sogenannten **freien Quellen bzw. Schwinden**.

Die Entstehung von **behinderten Quellen bzw. Schwinden** im Holz ist durch zwei Mechanismen möglich.

- strukturell bedingtes behindertes Quellen und Schwinden
Die Spannungen entstehen in einem ungestörten Holzquerschnitt, bedingt z.B. durch den Aufbau des Holzes.
- behindertes Quellen und Schwinden aufgrund konstruktiver Maßnahmen
Durch Zwängungen, aber auch beim Einbau von Schraubstangen, Schrauben oder sonstigen Mitteln, die den natürlichen Aufbau des Holzes stören, entsteht eine zusätzliche Behinderung des Quell- und Schwindvorganges.

In weiterer Folge wird auf **strukturell bedingtes behindertes Quellen bzw. Schwinden** näher eingegangen.

Soweit dem Verfasser bekannt wurde, findet eine erste Erwähnung in der Literatur zum Unterschied über freie und behinderte Quellung bei Keylwerth [23] in einer Serie von Aufsätzen zum Thema statt.

In seiner ersten Mitteilung befasst sich Keylwerth [23] mit der freien Quellung und fasst die, zum Teil heute noch gültigen, Erkenntnisse zusammen. Er weist darauf hin, dass von einer freien Quellung nur dann die Rede sein kann, wenn neben einer fehlenden mechanischen Behinderung des betrachteten Holzvolumens auch kein nennenswertes inneres Holzfeuchtegefälle im Querschnitt auftritt. Er führt weiters aus, dass infolge der Anisotropie des Holzes sowie der gleichfalls anisotropen Quell- bzw. Schwindmaße selbst bei geringsten Holzfeuchteänderungen Zwängungen, mit den damit verbundenen Eigenspannungen im Querschnitt entstehen. Weiters spricht Keylwerth [23] an, dass im Bereich praktischer Gebrauchsfeuchtigkeiten ein linearer Zusammenhang für die differentielle Quellung q vorliegt.

Die jeweiligen Quell- bzw. Schwindmaße sind stark von der Holzart abhängig mit der Tendenz, dass diese mit zunehmender Rohdichte ebenfalls ansteigen (Abb. 3.4). Für niedrige und hohe Holzfeuchten treten holzartenspezifische Verläufe auf. Er weist weiters darauf hin, dass der Quellungsverlauf verschiedener Holzarten durch unterschiedliche Kriech- und Relaxationserscheinungen beeinflusst wird.

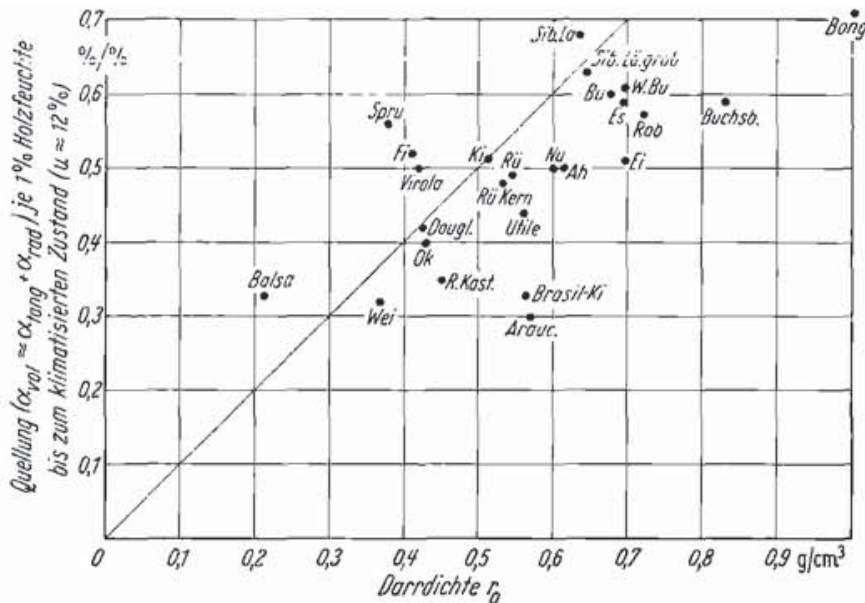


Abb. 3.4 Quellung gedarrter Holzproben mit verschiedener Rohdichte [23]

In seinem zweiten Bericht zur behinderten Quellung (oder Schwindung) gibt Keylwerth [23] einen Überblick über die, zu seiner Zeit bekannten, Arbeiten zum Thema an und stellt Überlegungen zu den Ergebnissen eigener Untersuchungen an. Er schildert, dass aufgrund einer Quellungsbehinderung im Holzquerschnitt komplexe, nicht konstante Spannungsverläufe entstehen und führt neben einer Modellierung einer Spannungsfunktion die Begriffe der totalen und partiellen Quellungsbehinderung ein.

Bei einer totalen Behinderung der Quellung treten holzartenspezifische Verläufe der feuchteinduzierten Spannungen über die Zeit mit ebensolchen Abhängigkeiten der maximalen Quellungsdrücke von der Ausgangsholzfeuchte auf. Als wesentliche Feststellung des Berichtes erwähnt Keylwerth [23], dass die Verhältniszahlen des maximalen Quellmaßes zwischen einer total behinderten (einachsigen) und einer freien Quellung in Abhängigkeit von der Holzart und der Orientierung der Faserrichtung bei rund 0,5 liegen (z. B. ergibt sich für Kiefer dann ein „elastischer Anteil“ des Schwindmaßes von 0,64). Die maximalen Quellungsdrücke sind für Nadelhölzer in tangentialer Richtung im Allgemeinen höher als für die Radiale (für Laubhölzer liegt der inverse Fall vor) und für niedrige Ausgangsholzfeuchten höher als bei feuchterem Holz. Keylwerth [23] weist weiters auf den Umstand hin, dass das rheologische Verhalten des Holzes (Kriech- und Relaxationserscheinungen) einen bedeutenden Einfluss auf den Quelldruck ausübt.

Er begründet seine Feststellung damit, dass die maximal auftretenden Spannungen infolge Quellung wesentlich niedriger sind, als dies bei einer rein elastischen Betrachtung der Fall wäre. Die erwähnten Aussagen werden dabei auf Ergebnissen von durchgeführten Untersuchungen mit Holz unterschiedlicher Ausgangsfeuchte ($u = 1,50\%$ bzw. $u = 10,5\%$) bei einer Unterwasserlagerung sowie in einem konstanten Klima gestützt.

Weiters weist Keylwerth [23] darauf hin, dass die aus einer freien Quellung ermittelten Quell- bzw. Schwindmaße ein sehr unzureichendes Kriterium für das Verhalten des Holzes bei behinderter Quellung sind und fügt an, dass die Größe der entstehenden Quellungsspannungen von den mechanischen Eigenschaften (E-Moduln in Querrichtung, elastischer Anteil der Quelldeformationen) und vom rheologischen Verhalten (Kriechen bzw. Spannungsrelaxation) im betrachteten Holzfeuchtebereich beeinflusst werden. Für die maximalen Quellungsspannungen bei einer totalen Quellungshinderung gibt Keylwerth [23] Werte in radialer und tangentialer Richtung für die Holzarten Bongossi, Buche und Kiefer im praktischen Feuchtebereich an. Diese reichen von rund $3,75\text{ N/mm}^2$ (tangential) bzw. rund $3,25\text{ N/mm}^2$ (radial) für Kiefer, rund $5,00\text{ N/mm}^2$ (radial) und rund $3,75\text{ N/mm}^2$ (tangential) bei Buche sowie rund $10,5\text{ N/mm}^2$ (radial) bzw. rund $8,00\text{ N/mm}^2$ (tangential) bei Bongossi.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass ein **freies Quellen oder Schwinden** in der Praxis nicht auftreten kann.

Die Gründe dafür sind

- der anisotrope Aufbau des Holzes,
- die zeitverzögerte Holzfeuchteänderung und der damit verbundene Quellungsspannungsgradient sowie
- die schwankende Rohdichte innerhalb des Holzvolumens.

Ein Modell zur Beschreibung des Feuchte- und Quellungsspannungsgradienten unter Berücksichtigung des anisotropen Aufbaus des Holzes und den damit verbundenen Spannungen erfolgt in Abschnitt 4 [23].

4 Spannungen in BSH aufgrund Feuchtigkeitsänderungen

In den vorhergehenden Abschnitten wurde festgestellt, dass der Holzfeuchtegehalt immer einen Gleichgewichtszustand mit dem Umgebungsklima zustrebt. Jedoch erfolgt dieser Vorgang nicht abrupt, sondern zeitverzögert. Dadurch stellen sich über den Holzquerschnitt unterschiedliche Holzfeuchten ein, welche zu unterschiedlichen Quell- bzw. Schwindverformungen führen. Diese führen wiederum zu unterschiedlichen Spannungen im Holzquerschnitt. Zu dieser Thematik liegen einige Arbeiten vor, welche in den folgenden Abschnitten überblicksmäßig dargestellt werden sollen.

Die mögliche Rissbildung in BSH zufolge einer klimatischen Beanspruchung wird in der Veröffentlichung von Möhler / Steck [15] untersucht.

Die Veröffentlichung von Häglund [16] beschäftigt sich mit feuchteinduzierten Spannungen quer zur Holzfasern.

Eine weitere Veröffentlichung zu dieser Thematik liegt von Angst [14] vor. Hier werden die Ergebnisse der Versuche von Jönsson [22] mit einem aufgestellten Berechnungsmodell verglichen [14] [16] [18] [19] [20].

4.1 Rissbildung in BSH infolge Feuchtigkeitsänderungen

Bevor auf die Spannungen in BSH aufgrund einer Feuchtigkeitsänderung näher eingegangen wird sollen in diesem Abschnitt vorweg die Ergebnisse der Untersuchung von Möhler und Steck [15] zusammenfassend vorgestellt werden.

In dieser Untersuchung wird die Rissbildung in BSH zufolge einer klimatischen Beanspruchung behandelt. Dafür wurden Prüfkörper aus BSH bei unterschiedlichen Klimaten gelagert.

Möhler und Steck [15] weisen darauf hin, dass wegen der damit verbundenen Rissegefährdung eine Schwindung bzw. von der Randzone her verlaufende Austrocknung kritischer zu sehen ist, als eine Quellung des Holzes. Ziel der geschilderten Untersuchungen war es Aussagen über die Beanspruchungen bei den verschiedenen Trocknungs- bzw. Befeuchtungsstadien sowie über den Feuchteverlauf im Inneren des Holzkörpers festzustellen bzw. unter welchen Verhältnissen eine Rissbildung im BSH stattfindet und in welchem Maße dies durch geeignete Schutzanstriche beeinflusst werden kann.

Die untersuchten Prüfkörper wurden mit zwei unterschiedlichen Jahrringkonfigurationen (vorwiegend liegende Jahrringe, Prüfkörper A und vorwiegend stehende Jahrringe, zu meist mit Mark, Prüfkörper B) unterschiedlichen Klimata ausgesetzt und dabei hinsichtlich des Auftretens einer Rissbildung beobachtet.

- Versuchsserie 1: Lagerung im Feuchtklima F
Lagerung im Normalklima (20 °C und 65 % relative Luftfeuchte) für 20 Tage, anschließend Lagerung im Feuchtklima (20 °C bis 25 °C und 95 % relative Luftfeuchte) für 42 Tage und abschließend Lagerung im Normalklima.
- Versuchsserie 2: Lagerung im Trockenklima T
Lagerung im Normalklima für 34 Tage, anschließend Lagerung bei 32 °C und 19 % relativer Luftfeuchte für 68 Tage und abschließend Lagerung im Normalklima.
- Versuchsserie 3: Lagerung im Feuchtklima F, anschließend im Trockenklima T
Lagerung für 139 Tage im Normalklima, anschließend 56 Tage im Feuchtklima, unmittelbar danach Lagerung bei 20 °C bis 25 °C und 44 % relative Luftfeuchte für 15 Tage, anschließend Lagerung bei 32 °C und 27 % relative Luftfeuchte für 32 Tage und abschließend Lagerung im Normalklima.

Der Verlauf der jeweiligen Holzfeuchten über den Querschnitt wurde mittels Darrproben festgehalten. Nach einer Veränderung des Umgebungsklimas stellten sich im Querschnitt die typischen parabolischen Verläufe nach Abb. 4.1 ein.

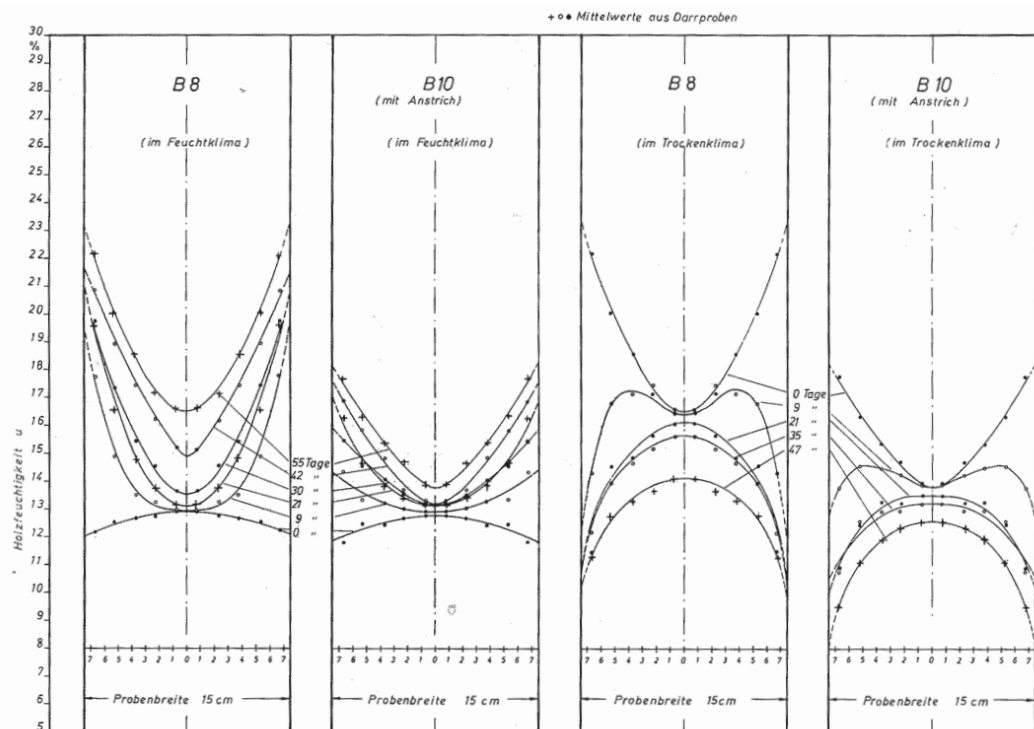


Abb. 4.1 Feuchtigkeitsverteilungen in den Probekörpern der Versuchsserie B aufgrund unterschiedlicher Klimata [15]

In allen Fällen war die Wirkung eines aufgetragenen Anstriches deutlich erkennbar. Ein Einfluss der Jahrringlage auf die Feuchteverteilung im Querschnitt konnte nicht festgestellt werden. Die in den unterschiedlichen Versuchsserien mit den dazugehörigen unterschiedlichen Klimata festgestellten Rissbildungen waren von untergeordneter Bedeutung und verliefen weitestgehend im Holz innerhalb einer Lamelle oder schräg von einer Lamelle zur benachbarten. Die Autoren weisen darauf hin, dass bei einer Quellung Quersugspannungen im Inneren des Querschnittes entstehen, während dies bei einer Schwindung in umgekehrter Weise auftritt.

Mithilfe der Untersuchungsergebnisse wurde im Weiteren eine Modellbildung des Quell- bzw. Schwindvorganges vorgenommen. Dazu wurde an zu Vergleichszwecken hergestellten Prüfkörpern die Abhängigkeit der E-Moduln bei einer Quersug- bzw. Querdruckbeanspruchung von der Holzfeuchte ermittelt, wobei sich zeigte, dass die Mittelwerte der beiden Kennwerte im Feuchtebereich zwischen rund 10 % und rund 24 % in annähernd gleicher Weise linear mit der Holzfeuchte abfallen. Die mittlere differentielle Quellung wurde für Fichtenholz mit dem für freie Quellung gültigen Wert von $q = 0,244$ [%/%] angenommen. Aufgrund der behinderten Quellung wurde dieser Wert, entsprechend den Angaben von Keylwerth, noch um rund 50 % abgemindert. Unter Verwendung des von den Autoren aufgestellten Rechenmodells konnten die Autoren bei den Probekörpern ohne Anstrich eine Überschreitung der Quersugfestigkeit des BSH feststellen, während die entsprechenden Quersugspannungen bei den Probekörpern mit Anstrich unter der Quersugfestigkeit zu liegen kamen (Versuchsserie 1) bzw. geringfügig überschritten (Versuchsserie 2). Die Quersugfestigkeiten wurden aus einer parallel zu den Hauptuntersuchungen geprüften Prüferserie ermittelt und weisen verhältnismäßige hohe 5 % Fraktilewerte von 1,19 N/mm² bis 1,34 N/mm² auf (im Vergleich dazu: charakteristische Quersugfestigkeit von BSH-Bauteilen nach ÖNORM EN 1194:1999 [4] $f_{t,90,k} = 0,5$ N/mm² !).

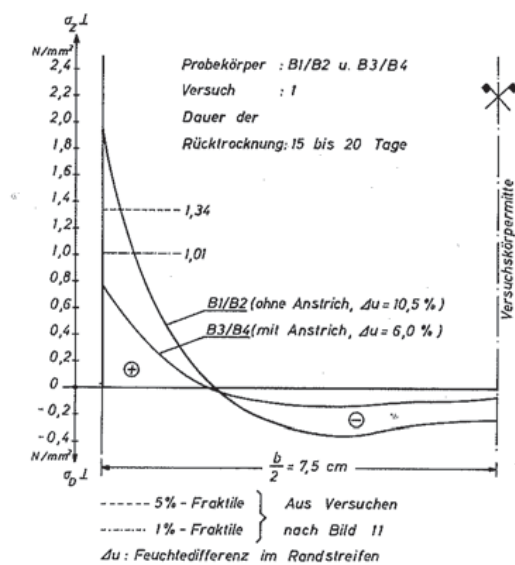


Abb. 4.2 Verlauf der Eigenspannungen in Querschnittsmittie bei Probekörpern der Reihe B infolge Rücktrocknung im Normalklima bei der ersten Versuchsserie [15]

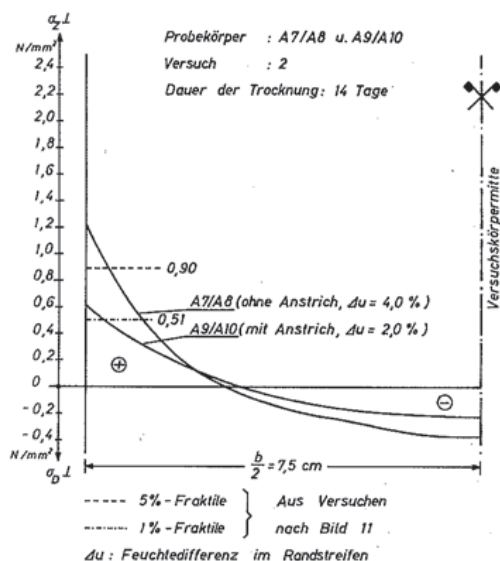


Abb. 4.3 Verlauf der Eigenspannungen in Querschnittsmitte bei Probekörper der Reihe A infolge Trocknung im Trockenklima bei der zweiten Versuchsserie [15]

Entsprechende Ergebnisse konnten auch für die Probekörper der Versuchsserie 3 festgestellt werden.

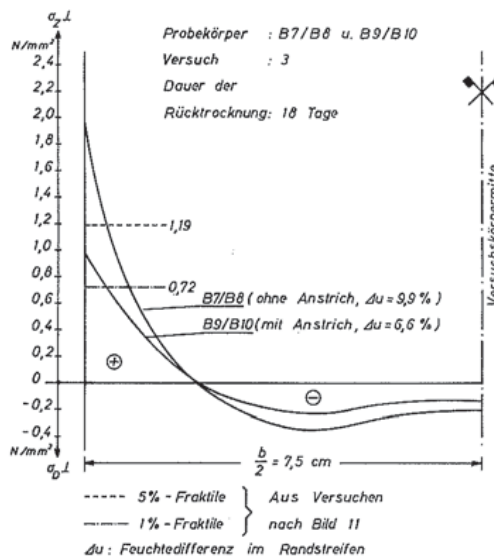


Abb. 4.4 Verlauf der Eigenspannungen in Querschnittsmitte bei Probekörper der Reihe B infolge Trocknung im Trockenklima bei der dritten Versuchsserie [15]

Aus den Ergebnissen einer weiteren Versuchsserie mit unterschiedlichen Anstrichen konnte der Schluss gezogen werden, dass der Einfluss des Anstriches von dessen Art und Auftragsmenge abhängen, obwohl alle verwendeten Anstriche zugelassen waren.

Zusammenfassend stellen Möhler und Steck [15] fest, dass Brettschichtholzträger ohne Feuchteschutz (Anstrich) der Oberflächen bei einer Lagerung im Feucht- bzw. Trockenklima sich in den Randzonen verhältnismäßig schnell den Gleichgewichtsholzfeuchten des vorliegenden Klimas anpassen. Bei einer Trocknung entstehen dabei in den Randzonen des Querschnitts parabolisch verlaufende Querkzugspannungen, während diese bei Befeuchtung im Inneren entstehen. Bei einer Überschreitung der Querkzugspannungen oder vorliegen von Wuchsunregelmäßigkeiten (z. B. Schälrisse) entstehen in weiterer Folge Risse im Querschnitt. Die Gefahr der Rissbildung ist dabei vom Feuchtegradienten abhängig. Im 10 mm breiten Randstreifen trat die Rissbildung in den unbehandelten Probekörpern der Versuchsserie 1 bei einer Feuchtedifferenz von 10 % bis 12 % auf, bei der Versuchsserie 2 ohne vorangegangene Feuchtlagerung betrug die kritische Feuchtedifferenz bei verschärfter Trocknung etwa 4 %. Die Rissegefahr ist dann am größten, wenn relativ trocken hergestellte Brettschichtholzbauteile nach einer Feuchtlagerung einer scharfen Trocknung ausgesetzt waren. Aufgrund der verzögerten Feuchteanpassung im Randbereich mit den damit verringerten Feuchtegradienten in den Randzonen konnte eine Rissbildung bei den Prüfkörpern mit ausreichendem Anstrich weitestgehend vermieden werden. Rissbildungen bei wechselndem Klima können nur durch einen entsprechenden Oberflächenschutz vermieden werden. Bei stark schwankenden Verhältnissen wird zur Erreichung eines möglichst gleichmäßigen Feuchteverlaufes im Querschnitt auf die Notwendigkeit deren Erneuerung in regelmäßigen zeitlichen Abständen hingewiesen [15].

4.2 Modellierung des Feuchtigkeitstransportes

Um die feuchteinduzierten Spannungen in einem Holzquerschnitt ermitteln zu können, ist zunächst die Beschreibung des Feuchtigkeitstransports im Holz erforderlich. Bei der Modellbildung wird dabei näherungsweise nur die Diffusion betrachtet. Die Konvektion wird vernachlässigt. Der Feuchtigkeitstransport in Holz lässt sich durch das 2. Fick'sche Gesetz abbilden:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

Wobei: u ...Holzfeuchtegehalt [-]

$$u = \left(\frac{m_u - m_0}{m_0} \right) \quad (4.2)$$

t ...Zeit [s]

D ...Diffusionskoeffizient [$m^2 s^{-1}$]

x ...Weg, Abstand [m]

Der Diffusionskoeffizient D ist von der Orientierung der Holzfasern und vom Holzfeuchtegehalt u abhängig. Je feuchter das Holz ist, desto höher ist der Diffusionskoeffizient. Die Ermittlung des Diffusionskoeffizienten erfolgt über Versuche. In guter Näherung wird D oftmals mit dem Wert quer zur Faser angenommen. Für den Diffusionskoeffizienten liegen in der Literatur unterschiedliche Werte vor. Einige Ansätze zur Festlegung sind der Abb. 4.5 zu entnehmen.

Bei niedrigen Holzfeuchten weichen die Diffusionskoeffizienten aus der Literatur nur unwesentlich voneinander ab. Während diese bei Holzfeuchten von $u > 15 \%$ sehr stark voneinander differieren.

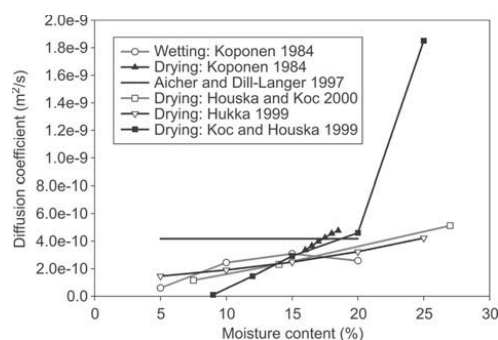


Abb. 4.5 Diffusionskoeffizienten von Fichte quer zur Faser bei $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ [14]

Der Einfluss der verschiedenen Diffusionskoeffizienten auf den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Holzfeuchten für einen 90 mm breiten Holzquerschnitt mit einer Veränderung der Holzgleichsfeuchte $u_{gl} = 9 \%$ auf $u_{gl} = 16 \%$ ist in Abb. 4.6 dargestellt.

Der Unterschied in der Holzfeuchte entspricht einer Steigerung der relativen Luftfeuchte von 40 % auf 80 %, bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. Die Gradienten bilden den Verlauf der Feuchtigkeit nach 11 bzw. 38 Tagen unter Verwendung unterschiedlicher Diffusionskoeffizienten ab. Man erkennt, dass sich nach 38 Tagen bereits eine Differenz von 3 % ergibt.

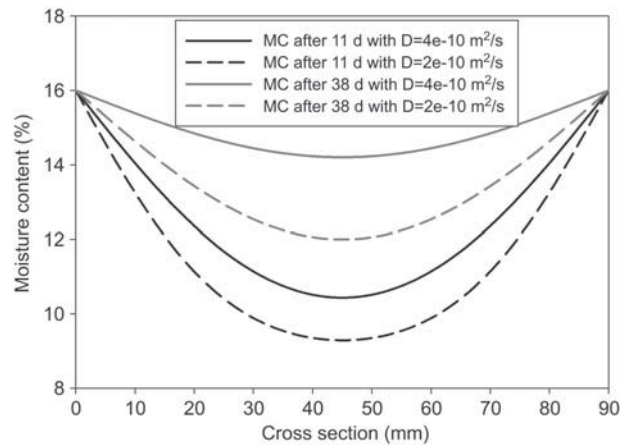


Abb. 4.6 Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Holzfeuchte u [%] [14]

Der Diffusionskoeffizient ist weiters abhängig von der Orientierung der Holzfasern. So kann man davon ausgehen, dass der Diffusionskoeffizient in Längsrichtung rund zwölf mal höher ist als jener quer zur Faser. Aus diesem Grund erfolgt der Feuchtetransport über die Hirnholzfläche wesentlich schneller als quer zur Faser [11].

Basierend auf der Differentialgleichung des 2. Fick'schen Gesetzes bestehen zur Beschreibung des Feuchtetransportes an der Oberfläche des Holzes zwei Möglichkeiten um die jeweiligen Randbedingungen einzuarbeiten. Der erste Fall geht davon aus, dass die äußerste Schicht, also die Oberfläche des Holzes jene Holzfeuchte annimmt, bei der sie mit der umgebenden Luft und in ihr enthaltenen Feuchte im Gleichgewicht steht.

$$u_{\text{surf}} = u_{\text{eq}} \quad (4.3)$$

Wobei: u_{surf} ...Feuchtegehalt Holzoberfläche [%]
 u_{eq} ...Feuchtegehalt umgebende Luft [%]

In diesem Fall ändert sich die Holzfeuchte ohne Zeitverzögerung unmittelbar mit der Veränderung der relativen Luftfeuchte.

Die zweite Möglichkeit berücksichtigt den Feuchteunterschied der Holzoberfläche gegenüber der umgebenden Luftfeuchte.

$$\left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) = S(u_{\text{eq}} - u_{\text{surf}}) \quad (4.4)$$

Wobei: S ...Oberflächenemissionsfaktor [m s^{-1}]

Der Oberflächenemissionsfaktor wurde in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Die publizierten Werte schwanken dabei je nach Autor relativ stark (Tab. 4.1).

Oberflächenemissionsfaktor [m/s]	Autor
$2,2 \times 10^{-8}$	Aicher und Dill-Langer 1997
$8,36 \times 10^{-8}$	Houska und Koc 2000
$1,05 \times 10^{-6}$	Koc und Houska 2002
$12,4 \times 10^{-8} - 22 \times 10^{-8}$	Koponen 1985

Tab. 4.1 Oberflächenemissionsfaktor von Fichte bei 20 ± 2 °C [14]

Verringert sich der Widerstand an der Oberfläche, so steigt der Oberflächenemissionsfaktor, bis sich wieder der erste Fall einstellt.

Bei Zunahme der Feuchte kann der Feuchtetransport ausreichend genau mit der ersten Möglichkeit beschrieben werden. Bei Abnahme sollte man die zweite Möglichkeit heranziehen [18].

Mit Hilfe des Oberflächenemissionsfaktors besteht weiters die Möglichkeit, den Einfluss von Anstrichen und Beschichtungen in der Modellbildung zu berücksichtigen.

4.3 hygro-mechanisches Modell

Das hygro-mechanische Modell erfasst Dehnungen bzw. Verzerrungen über die Zeit zufolge einer äußeren Belastung sowie Verzerrungen, die durch das hygroskopische Verhalten des Holzes bedingt sind. Ein verbreiteter Ansatz um dieses Verhalten des Holzes zu beschreiben erfolgt über eine gemittelte Verzerrung, welche sich aus mehreren Einzelkomponenten zusammensetzt [14].

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_s + \dot{\varepsilon}_{ms} + \dot{\varepsilon}_c \quad (4.5)$$

Wobei:

- $\dot{\varepsilon}$...gesamte Verzerrung [-]
- $\dot{\varepsilon}_e$...elastische Verzerrung[-]
- $\dot{\varepsilon}_s$...Verzerrung durch lineares Schwinden bzw. Quellen [-]
- $\dot{\varepsilon}_{ms}$...mechano-sorptive Kriechverzerrung [-]
- $\dot{\varepsilon}_c$...zeitabhängige Kriechverzerrung [-]

4.3.1 elastische Verzerrung $\dot{\varepsilon}_e$

Die elastische Verzerrung $\dot{\varepsilon}_e$ errechnet sich nach dem Hook'schen Gesetz mit

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{\sigma}{E} \quad (4.6)$$

Wobei:

- σ ...Spannungen [N/mm²]
- E ...E-Modul [N/mm²]

Dieser Term berücksichtigt die elastische Verzerrung zufolge einer äußeren Beanspruchung.

4.3.2 Verzerrung $\dot{\varepsilon}_s$ durch lineares Quellen und Schwinden

Die Verzerrung $\dot{\varepsilon}_s$, verursacht durch lineares Quellen und Schwinden berechnet sich mit den Parametern aus Abschnitt 3. 2:

$$\dot{\varepsilon}_s = q \cdot \dot{u} \quad (4.7)$$

Wobei:

- q ...differentielles Quellmaß bzw. Schwindmaß [%/%]
- u ...Holzfeuchte [%]

4. 3. 3 mechano-sorptive Kriechverzerrung $\dot{\epsilon}_{ms}$

Das mechano-sorptive Kriechen beschreibt das rheologische Verhalten von Holz, bei Belastung und einer gleichzeitig auftretenden Holzfeuchteänderung.

Anmerkung:

Als Rheologie bezeichnet man die Lehre, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Werkstoffen befasst. Ihre Aufgabe ist es, die Bewegung der Teilchen, die ein Material bilden, mit den sie verursachenden Kräften und den dazu benötigten Zeiten zu erfassen und unter Berücksichtigung der das Material von außen beeinflussenden Größen (Feuchte, Temperatur) in definierte Komponenten zu trennen [5].

Die für den praktischen Gebrauch von Holz und Holzwerkstoffen maßgeblichen rheologischen Eigenschaften sind

- das Kriechen,
- die Spannungsrelaxation und
- die Dauerstandsfestigkeit [5].

Um das mechano-sorptive Kriechen zu beschreiben können mehrere unterschiedliche Modelle angewendet werden. Dabei können sowohl die inneren Spannungen durch Holzfeuchteänderungen als auch die Beanspruchung durch äußere Lasten berücksichtigt werden. Die beiden hier erwähnten Modelle sind dem Forschungsbericht von Angst [14] entnommen.

Models	Parameters for spruce	References
Maxwell type models		
1a $\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{ms}^r \\ \dot{\epsilon}_{ms}^t \\ \dot{\gamma}_{ms}^{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_r & -\mu_r m_r & 0 \\ -\mu_r m_r & m_r & 0 \\ 0 & 0 & m_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \end{bmatrix} \dot{u} $	$m_r=0.15 \text{ MPa}^{-1}, m_t=0.2 \text{ MPa}^{-1},$ $m_{rt}=0.8 \text{ MPa}^{-1}, \mu_r=1,$ $\mu_{rt}=0.75$	Ormarsson 1999
1b $\dot{\epsilon}_{ms} = \sigma (m \dot{u} - \beta \dot{u})$	$m=0.085 \text{ MPa}^{-1}, \beta=0.045 \text{ MPa}^{-1}$ (parameters from Häglund)	Aicher and Dill-Langer 1997; Häglund 2008
Kelvin type models		
2a For wetting: $\dot{\epsilon}_{ms} = m(\sigma - E_{ms} \epsilon_{ms}) \dot{u}$ General form ^b : $\dot{\epsilon}_{ms} = m(\sigma - E_{ms} \epsilon_{ms}) \dot{u} $	$m=0.2 \text{ MPa}^{-1}, E_{ms}=69 \text{ MPa}$ (parameters and model from Virta et al. for wetting)	Salin 1992; Virta et al. 2006 ^a
2b $\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{ms}^r \\ \dot{\epsilon}_{ms}^t \\ \dot{\gamma}_{ms}^{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_r & -\mu_r \kappa_r & 0 \\ -\mu_r \kappa_r & \kappa_r & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_s^r \\ \dot{\epsilon}_s^t \\ \dot{\gamma}_s^{rt} \end{bmatrix}$ $\frac{1}{s_{max}} \begin{bmatrix} \beta_r & 0 & 0 \\ 0 & \beta_t & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{rt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_s^r - \epsilon_s^t \\ \epsilon_s^t - \epsilon_s^r \\ \gamma_s^{rt} \end{bmatrix} \dot{\epsilon}_s^t$	$\kappa_r=0.7 \text{ MPa}^{-1}, \kappa_r=0.3 \text{ MPa}^{-1},$ $\kappa_{rt}=2.5 \text{ MPa}^{-1}, \mu_r=1, \mu_{rt}=0.38,$ $s_{max}=-0.06, \beta_{rt}=0,$ $\beta_{r1}=2, \beta_{r2}=4, \beta_{r1}=1.8, \beta_{r2}=3.8$ (index 1: for drying, index 2: for wetting)	Mårtensson and Svensson 1997b

Note: The free shrinkage rate in tangential direction, $\dot{\epsilon}_s^t$, is used in all directions.
Note: In the original reference the strain rates are expressed as functions of free shrinkage and not time.

Terms: $\dot{\epsilon}_{ms}$, mechanosorptive creep strain rate; σ, τ , stress; \dot{u} , moisture content rate; m, μ, β, κ , mechano-sorptive creep parameters; E_{ms} , retardation coefficient of mechanosorptive creep; $\dot{\epsilon}_s$, linear shrinkage-swelling strain rate; ϵ, γ , total strain; s_{max} , value of the total shrinkage from green to dry condition.

^a Note that the model by Virta et al. (2006) is not as presented in the original reference. The authors of the present paper assume that there was a (typing) error in the model and that it actually should be the same model as Salin (1992).

^b To perform both wetting and drying analyses with the model by Virta et al. (2006), which was developed for wetting analyses only, the general form is used.

Abb. 4.7 Übersicht der Berechnungsmodelle für mechano-sorptives Verhalten von Fichte [14]

Das Maxwell-Modell ist das zumeist verwendete Modell zur Beschreibung derartiger Problemstellungen. Festzustellen ist dabei jedoch, dass es sich nicht zur Modellbildung für Holzbauteile unter einer äußeren Einwirkung eignet, weil es bei einer Entlastung keine Möglichkeit bietet die Relaxation zu berücksichtigen.

Das Kelvin Modell ist zwar aufwendiger in der Berechnung, es ermöglicht jedoch auch die Berücksichtigung der Relaxation bei einer Entlastung.

4. 3. 4 zeitabhängige Kriechverzerrung $\dot{\epsilon}_c$

Ein Ansatz um die zeitabhängige Kriechverzerrung bei konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchte abbilden zu können, ist die Abminderung der E-Moduli. Dies ist auch die Vorgehensweise nach ÖNORM EN 1995-1-1 [1]. Laut Häglund [16] ist die zeitabhängige Kriechverzerrung im Vergleich zur mechanosorptiven Kriechverzerrung bei niedrigen Holzfeuchten und Temperaturen sehr gering, sodass auf eine Berücksichtigung dieses Anteils in guter Näherung verzichtet werden kann.

4. 4 Berechnungsmodelle für die Spannungsermittlung

Um die Spannungen aufgrund von Feuchteänderungen im BSH berechnen zu können müssen das hygro-mechanische Modell und das Modell für den Feuchtigkeitstransport miteinander gekoppelt werden.

Das Modell für den Feuchtigkeitstransport berücksichtigt nicht die Orientierung der Jahrringe über den Querschnitt (radial, tangential). Beim hygro-mechanischen Modell spielen die Jahrringe jedoch sehr wohl eine Rolle. Oftmals wird dabei zwischen eindimensionalen und zweidimensionalen Modellen zur Berücksichtigung der unterschiedlichen E-Moduln unterschieden.

4. 4. 1 eindimensionales Berechnungsmodell

Beim eindimensionalen Berechnungsmodell wird der unterschiedliche E-Modul aufgrund der Orientierung der Jahrringe (rad. / tang.) durch einen mittleren E-Modul beschrieben. Auch die Quellmaße sind abhängig von der Orientierung der Jahrringe und werden somit ebenfalls berücksichtigt. Da sich der Winkel der Jahrringe über den Querschnitt lokal ändert, werden die beiden Parameter in einer Funktion abhängig vom Winkel θ ausgedrückt.

$$E_{\text{eff}} = \frac{E_R \cdot E_T \cdot G_{RT}}{E_T \cdot G_{RT} \cdot m^2 \cdot (m^2 - n^2 \cdot \nu_{RT}) + E_R \cdot G_{RT} \cdot n^2 \cdot (n^2 - m^2 \cdot \nu_{TR}) + E_R \cdot E_T \cdot m^2 \cdot n^2} \quad (4.8)$$

$$q_{\text{eff}} = q_R \cdot m^2 + q_T \cdot n^2 \quad (4.9)$$

$$m = \cos \theta \quad (4.10)$$

$$n = \sin \theta \quad (4.11)$$

- Wobei:
- θ ...Winkel zwischen Horizontaler und Tangente der Fasern [°]
 - E_R ...E-Modul des Holzes in radialer Richtung [N/mm²]
 - E_T ...E-Modul des Holzes in tangentialer Richtung [N/mm²]
 - G_{RT} ...Schubmodul in der RT-Ebene [N/mm²]
 - ν_{RT} ...Poison-Zahl[-]
 - q_{eff} ...differentielle Quellung[-]
 - q_R ...differentielle Quellung radial [-]
 - q_T ...differentielle Quellung tangential [-]

In Abb. 4.8 ist die Änderung des E-Moduls und der differentiellen Quellung aufgrund der unterschiedlichen Orientierung der Jahrringe in radialer und tangentialer Richtung eines BSH-Querschnitts dargestellt.

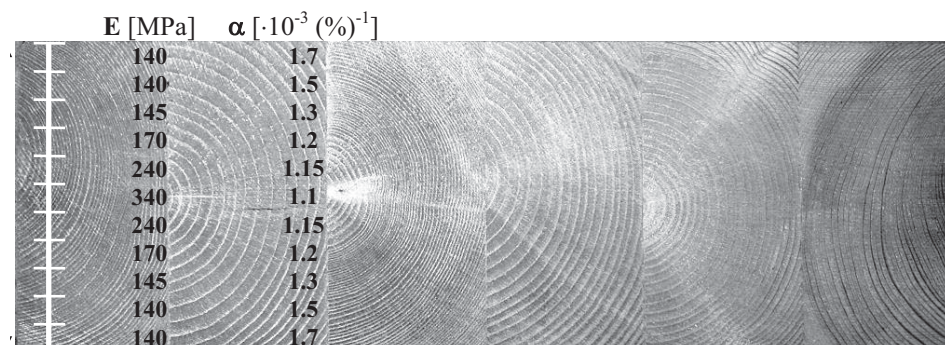


Abb. 4.8 Verlauf des E-Moduls und der differentiellen Quellung (hier als α bezeichnet) [17]

Der Einfluss der Holzfeuchte auf den mittleren E-Modul wird in diesem Modell nicht berücksichtigt. Um ein reines 1D-Modell zu erhalten muss die Poison-Zahl zu Null gesetzt werden [22].

4. 4. 2 zweidimensionales Berechnungsmodell

Das 2 D-Modell berücksichtigt die Lage und Orientierung der Jahrringe. Dafür wird in jede Lamelle ein lokales Zylinderkoordinatensystem eingefügt. Der Ursprung jedes Koordinatensystems wird in der Kern zugewandten Seite gewählt.

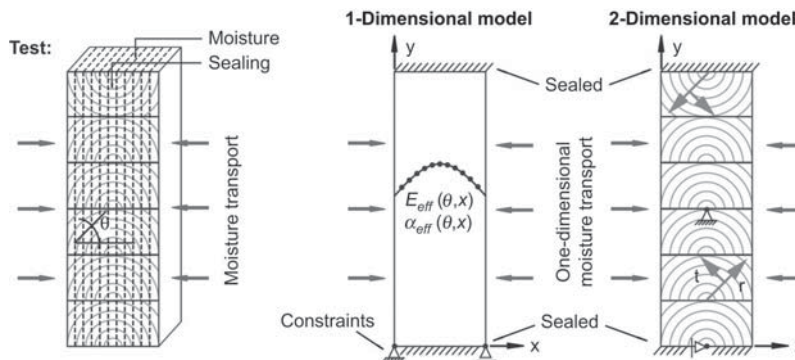


Abb. 4.9 Versuchsdurchführung Jönsson und Illustration des Berechnungsmodells [14]

4. 4. 3 Eingangsparmeter und Ergebnisse zum Feuchtigkeitstransport

In Abb. 4.5 wurde der Einfluss der unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten bereits dargestellt. Angst [14] wählte daher Diffusionskoeffizienten die zu ähnlichen Ergebnissen wie in der Arbeit von Jönsson [22] führten.

Für die Feuchtezunahme bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % auf 80 % lieferte ein konstanter Diffusionskoeffizient die besten Ergebnisse, während bei der Trocknung von 80 % auf 40 % relativer Luftfeuchte eine Funktion des Diffusionskoeffizienten die besten Ergebnisse liefert. Die gewählten Parameter für die durchgeführte Simulation können Abb. 4.10 entnommen werden.

Analysis	Boundary condition/parameters
Wetting: 40 → 80% RH	Boundary condition according to Eq. (2): $u_0=0.09, u_{eq}=0.16, D=3e-10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Drying: 80 → 40% RH	Boundary condition according to Eq. (3): $u_0=0.16, u_{eq}=0.08, S=5e-8 \text{ m s}^{-1}$ $D=2.857e-11 * (u)-1.57e-10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (which corresponds to: $D=1e-10$ for $u=0.09$, and $D=3e-10$ for $u=0.16$)

Abb. 4.10 Parameter für die Modellbildung des Feuchtigkeitsports [14]

Die Ergebnisse zufolge der gewählten Eingangsparmeter können Abb. 4.11 und Abb. 4.12 entnommen werden. Angst [14] vergleicht die Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen von Jönsson [22].

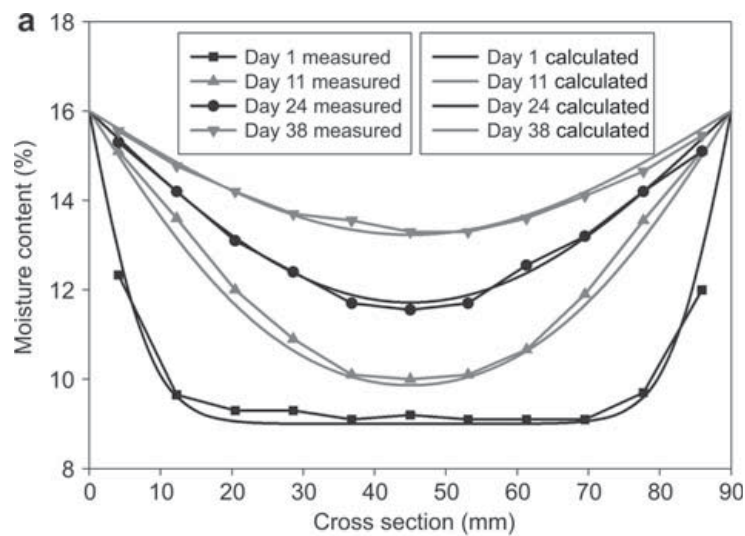


Abb. 4.11 Befeuchten von 40 % auf 80 % relativer Luftfeuchte [14]

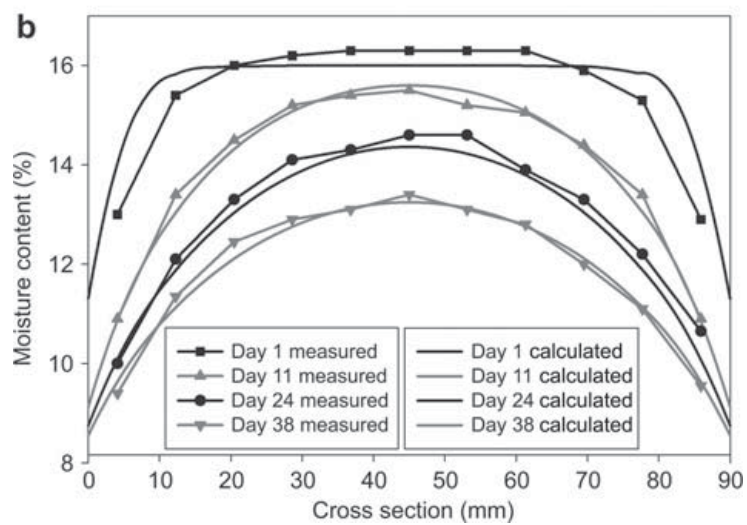


Abb. 4.12 Trocknen von 80 % auf 40 % relativer Luftfeuchte [14]

Wie aus den beiden Abb. 4.11 und Abb. 4.12 zu entnehmen ist, korrelieren die Simulation von Angst [14] ausgezeichnet mit den durchgeführten Prüfungen von Jönsson [22]. Der Feuchtetransport kann also in sehr präziser Weise simuliert werden.

4. 4. 4 Eingangsparameter und Ergebnisse für das 1D-hygro-mechanische Modell

Für die Berechnung wurden die in Abschnitt 4. 3 vorgestellten Maxwell- und Kelvin-Modelle verwendet. Der E-Modul, sowie der Quellungskoeffizient wurde mit den Gleichungen (4.8) und (4.9) als Funktion über den Querschnitt definiert.

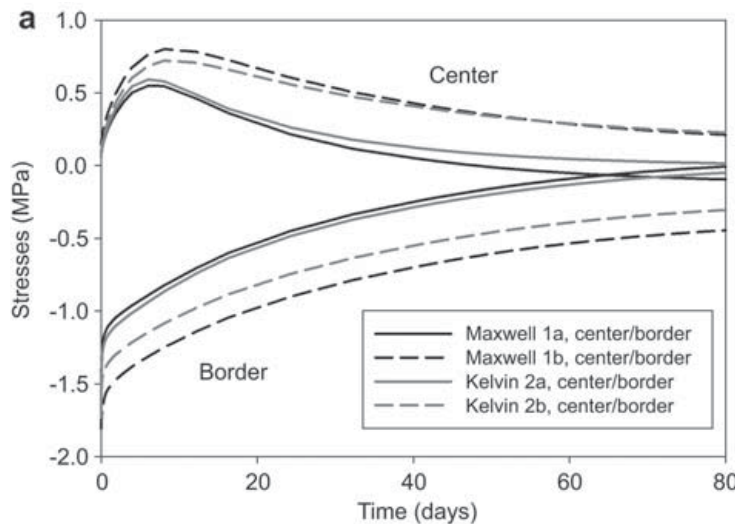


Abb. 4.13 Spannungen durch Befeuchten von 40 % auf 80 % relativer Luftfeuchte in der Mitte des Querschnitts (Kern) und an der Oberfläche [14]

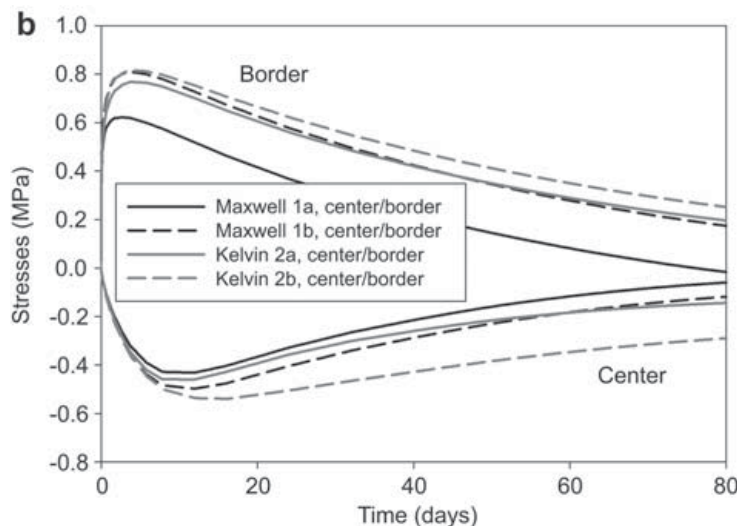


Abb. 4.14 Spannungen durch Trocknen von 80 % auf 40 % relativer Luftfeuchte in der Mitte des Querschnitts (Kern) und an der Oberfläche [14]

Aus den Abb. 4.13 und Abb. 4.14. wird ersichtlich das sich beim Befeuchten sowohl im Kern des Querschnitts als auch an der Oberfläche größere Spannungen als beim Trocknen einstellen. Die Änderung der Spannung erfolgt ohne Zeitverzögerung unmittelbar mit der Veränderung des Klimas. Nach 7-11 Tagen nehmen die Spannungen ab.

4. 4. 5 Eingangsparmeter und Ergebnisse für das 2D-hydro-mechanische Modell

Da beim 2 D-Modell die Lage der Jahrringe miterfasst werden kann wurden in der Studie von Angst [14] unterschiedliche Jahrringverläufe der Lamellen simuliert.

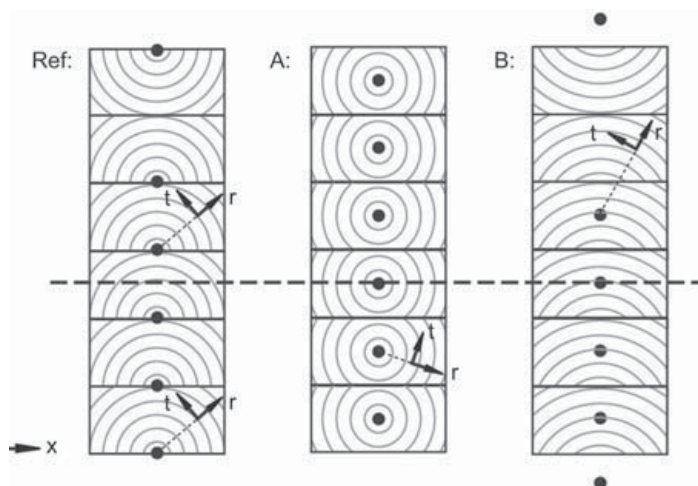


Abb. 4.15 unterschiedliche Lagen der Jahrringe im BSH-Querschnitt

In den unterschiedlichen oben dargestellten Lagen treten signifikante Unterschiede bei den feuchteinduzierten Spannungen auf.

Die zur Simulation verwendeten Parameter sind in Abb. 4.16 aufgelistet.

Variation	Legend	Configurations/parameters	References
Pith locations	Ref	On the bottom of the lamella	–
	A	In the center of the lamella	–
	B	Below the lamella	–
Hygro-expansion coefficients	Ref	$\alpha_r=0.11, \alpha_t=0.22$	Jönsson 2005
	C	$\alpha_r=0.19, \alpha_t=0.35$	Ormarsson 1999
	D	$\alpha_r=0.07, \alpha_t=0.15$	Dinwoodie 2004
Stiffness parameters	Ref	$E_r=467 \text{ MPa}, E_t=216 \text{ MPa}, G_{rt}=42 \text{ MPa}$ ($E_t=97 \text{ MPa}$ and $\nu_{rt}=0.55$ are not varied)	Häglund 2008
	E	$E_r=710 \text{ MPa}, E_t=430 \text{ MPa}, G_{rt}=23 \text{ MPa}$	Dinwoodie 2004
	F	$E_r=2200*(0.3-u)+400 \text{ [MPa]}$ $E_t=1300*(0.3-u)+220 \text{ [MPa]}$ $G_{rt}=72*(0.3-u)+25 \text{ [MPa]}$	Ormarsson 1999

Abb. 4.16 Simulationsparameter zu Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagen der Lamellen im Querschnitt [14]

Die Simulationen wurden wieder für Befeuchten von 40 % auf 80 % relativer Luftfeuchte und für Trocknen von 80 % auf 40 % relativer Luftfeuchte durchgeführt. Als Modell wurde das Maxwell-Modell aus Abb. 4.7 verwendet.

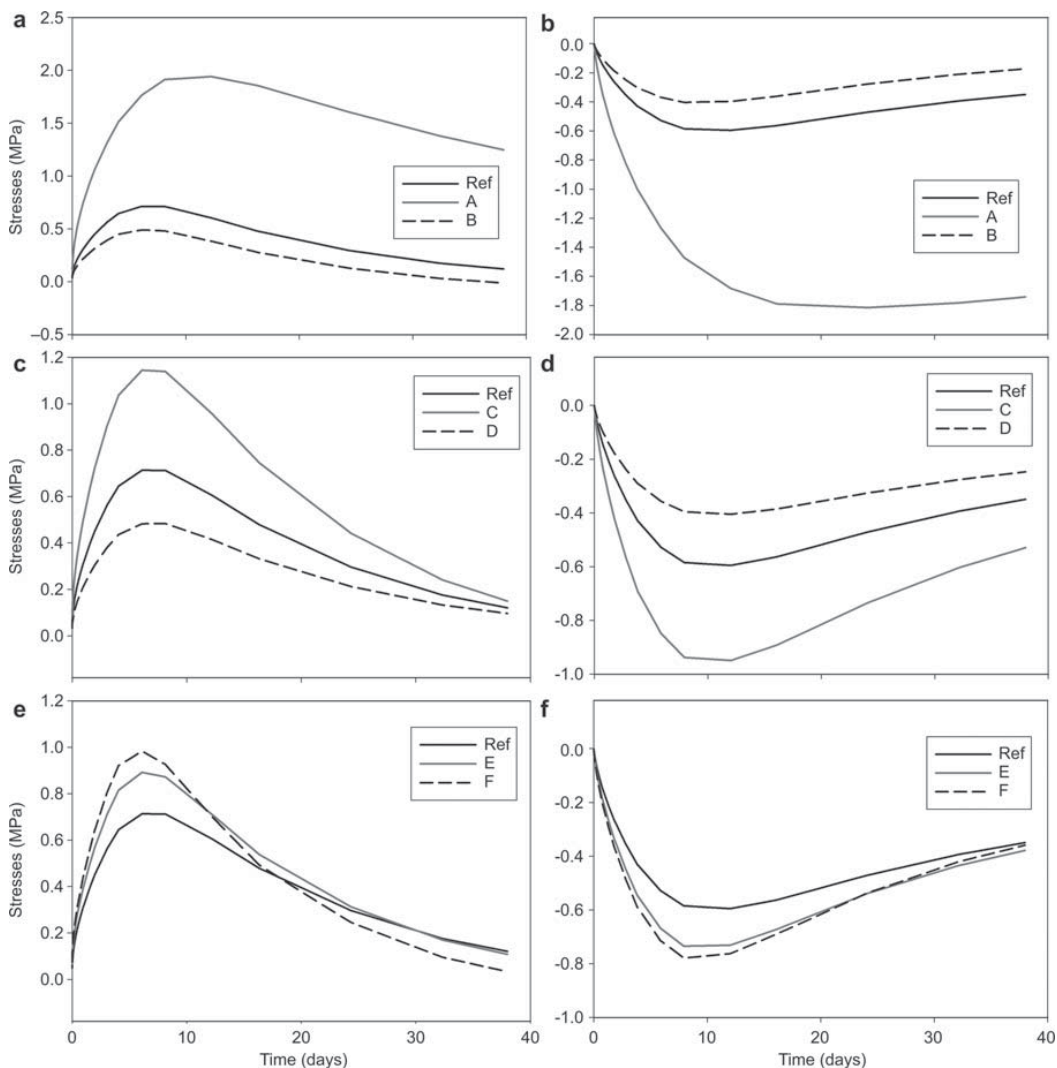


Abb. 4.17 Spannungen aufgrund:
a...Befeuchten, unterschiedliche Lagen in den Lamellen
b...Trocknen, unterschiedliche Lagen in den Lamellen
c...Befeuchten, unterschiedliche Quellmaße
d...Trocknen, unterschiedliche Schwindmaße
e...Befeuchten, unterschiedliche Steifigkeiten
f... Trocknen, unterschiedliche Steifigkeiten
aus [14]

Aus Abb. 4.17 kann entnommen werden, dass die verschiedenen Lagen der Jahrringe einen sehr großen Einfluss auf die auftretenden Spannungen ausüben. Wobei die Gradienten der Spannungen zwar unterschiedliche Werte aufweisen, ihr grundsätzlicher Verlauf jedoch qualitativ ähnlich verläuft. Auch hier kann eine Abnehmen der Spannungen nach 7-11 Tagen beobachtet werden. Die größten Unterschiede in den Gradienten ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Lagen der Lamellen und den unterschiedlichen Quell- und Schwindmaßen.

4.5 Schlussfolgerung und Vergleich

In den ersten Tagen steigen bzw. sinken die feuchteinduzierten Spannungen sehr stark, und nehmen nach 7-11 Tagen langsam ab und nähern sich asymptotisch gegen Null. Vergleicht man die Spannungen mit dem Verlauf der Feuchtigkeitsgradienten in Abb. 4.6, erkennt man den Grund für die aufgetretenen hohen Spannungen. Beim Befechten bleibt die Holzfeuchte im Kern zunächst konstant, während sich diese an der Oberfläche bereits nach kurzer Zeit der relativen Luftfeuchte anpasst und steigt. Dadurch kommt es an der Oberfläche zu einer Quellung, welche aber durch den unverändert feuchten Kern behindert wird. Es entstehen dadurch an der Oberfläche Druck-, und im Kern Zugspannungen. Beim Trocknen des Holzes hingegen entstehen an der Oberfläche Zug-, und im Kern Druckspannungen.

Zum selben qualitativen Feuchtegradienten und Spannungsverlauf kamen auch Jönsson [22] und Häglund [16] in ihren Untersuchungen. Die Spannungsverläufe über den Querschnitt mit einer Breite von 90 mm sind den Abb. 4.18-Abb. 4.20 zu entnehmen.

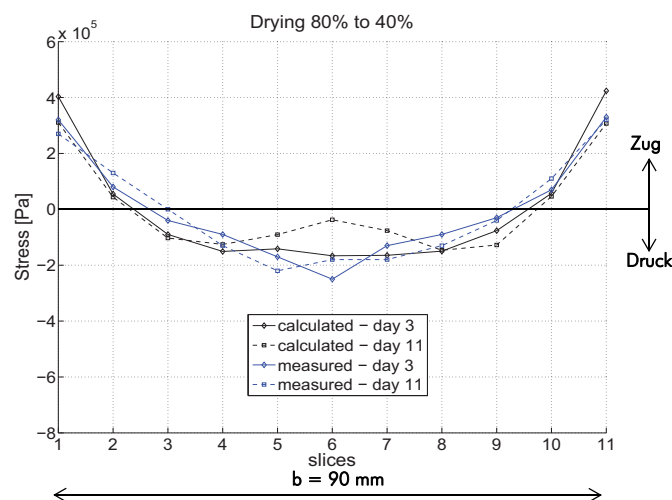


Abb. 4.18 Spannungsverläufe über den Querschnitt beim Trocknen [16]

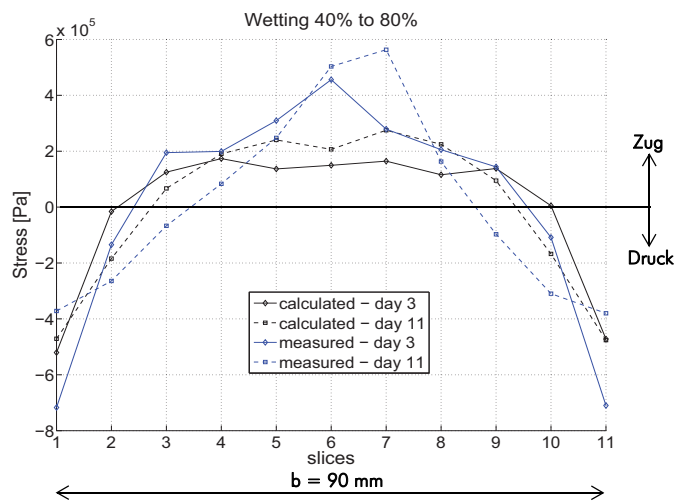


Abb. 4.19 Spannungsverläufe über den Querschnitt beim Befeuchten [16]

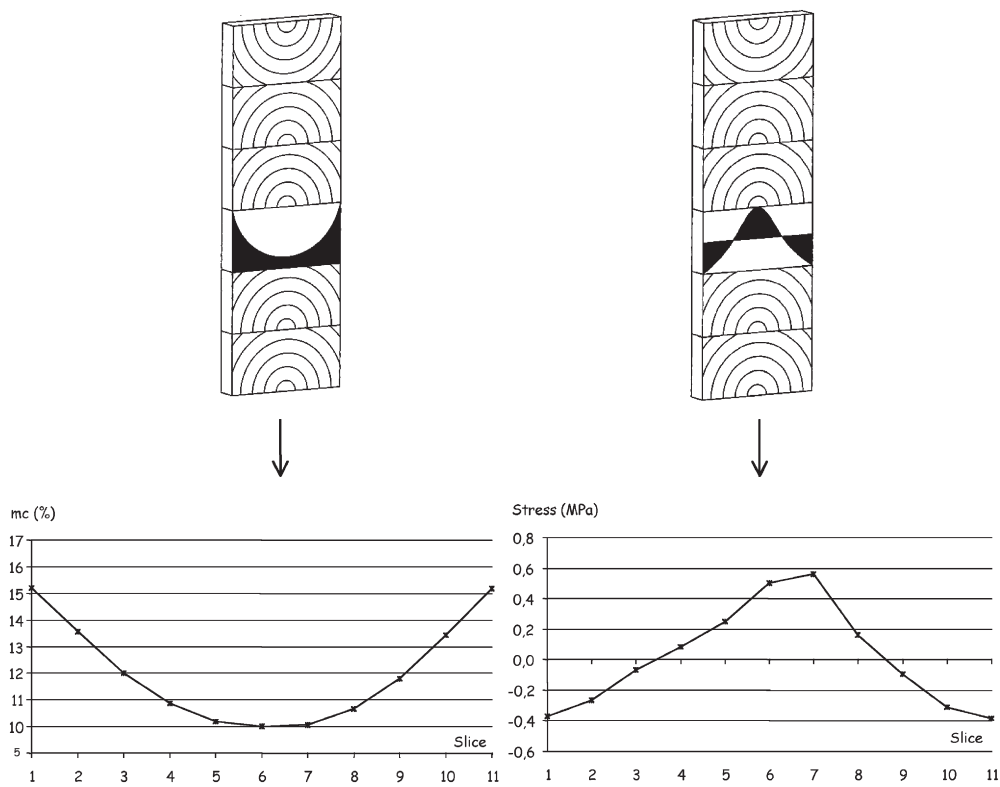


Abb. 4.20 Feuchtgradient aufgrund einer Zunahme der Holzfeuchte und daraus resultierende Spannungen [22]

Durch die Änderung der Holzfeuchte kommt es zu hohen feuchteinduzierten Spannungen, welche durchaus die charakteristische Festigkeit der Querkzugspannung $f_{t,90,k}$ überschreiten können. Je schneller sich die Holzfeuchte ändert, desto steiler wird der Feuchtegradient, welcher wiederum unterschiedliche Quell- und Schwindmaße über den Querschnitt hervorruft.

Bei der Befeuchtung entstehen höhere Spannungen als bei der Trocknung des Holzes. Da bei letzteren Querkzugspannungen an der Oberfläche entstehen, welche durchaus die maximal aufnehmbaren Querkzugspannungen übersteigen können, kommt es zu den bekannten Schwindrissen.

All diese Betrachtungen gelten für einen ungestörten Holzquerschnitt. Wenn nun im Querschnitt eine Querkzugverstärkung in Form von Schraubstangen oder eingeklebten Gewindestangen erfolgt, treten Zwängungen durch das Verstärkungsmittel auf, welche mit dem im Holz induzierten Spannungen im Gleichgewicht stehen müssen. Kann dieses Gleichgewicht durch die eingebrachten Verstärkungsmittel oder das umgebende Holz nicht gehalten werden, tritt eine Rissbildung oder ein Fließen der Querkzugverstärkung bzw. eine teilweise oder gänzliche Zerstörung des Verbandes zwischen Verstärkungsmittel und dem Holz ein.

5 Spannungen in querzugverstärktem BSH

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über den Stand des Wissens der entstehenden Spannungen in Gewindestangen bzw. Schraubstangen und BSH aufgrund einer äußeren Belastung bzw. durch Änderung der Holzfeuchte.

5.1 feuchteinduzierte Spannungen in Gewindestangen bzw. Schraubstangen

Ein Bemessungsvorschlag zur Berücksichtigung von feuchteinduzierten Spannungen von im Holz eingebrachten Gewindestangen bzw. Schraubstangen wird in der Veröffentlichung von Gerold [31] vorgestellt. Dieser baut auf Ergebnissen einer Veröffentlichung von Ehlbeck [29] auf, welcher das Langzeitverhalten von Stahlstangen unter wechselnden Klimabedingungen untersuchte. Eine weitere Arbeit die sich mit dem Verhalten von eingeklebten Stabelementen in BSH bei wechselnden Klimabedingungen beschäftigt wurde von Hollinsky [33] veröffentlicht.

In Abb. 5.1 wird die Modellbildung dargestellt, die dem Bemessungsvorschlag von Gerold [31] zugrunde liegt.

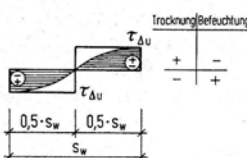

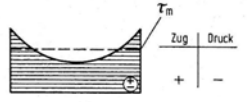

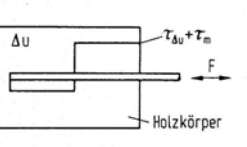
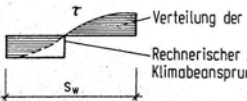
Art der Beanspruchung	Verteilung der Haftspannungen	Vorzeichen- definition	Rechenwerte
Wechselnde relative Luftfeuchte φ bzw. Temperatur T			Bestimmung der Ausgleichs- feuchten u nach KÖLLMANN 1951 $\tau_{\Delta u}$ vgl. Tabelle 2
Axialbelastung F			$\tau_m = \frac{F}{\pi \cdot d_{nom} \cdot s_w}$
Überlagerung			$\gamma \cdot (\tau_{\Delta u} + \tau_m) \leq \tau_{u,m,cor}$ $\tau_{u,m,cor}$ vgl. Tabelle 1 γ = Sicherheitsbeiwert
Erläuterungen			<p>F = Äußere Axialkraft im Gebrauchszustand d_{nom} = Außen- bzw. Nenn Durchmesser s_w = Haftlänge der Stahlstange im Holzkörper; Haftlängen von mehr als $20 \cdot d_{nom}$ ($\beta = 90^\circ$) bzw. $40 \cdot d_{nom}$ ($\beta = 0^\circ$) sollten nicht in Rechnung gestellt werden β = Winkel zwischen Stangenlängs- und Holzfaserrichtung</p>

Abb. 5.1 Verlauf der Haftspannungen entlang der Schraubstange zufolge äußerer Last bzw. Quellen und Schwinden des Holzes [31]

Das vorgestellte Berechnungsmodell basiert auf den aufnehmbaren Haftspannungen in der Verbundfuge zwischen dem Stahlstab und dem Holz. Da der Verlauf der Haftspannungen zufolge einer äußeren Belastung nicht konstant über die Längsachse des Stahlstabs ist, ergeben sich für die mittleren Haftspannungen τ_m abhängig von der Haftlänge unterschiedliche Größen. Wobei in diesem Berechnungsmodell für die Haftlänge s_w zur Berechnung der Tragfähigkeit einer ohne Kleber eingebrachten Schraubstange quer zur Faser nach Gerold [31] $s_w \leq 20 \cdot d_g$ gewählt werden sollte. Die Haftspannungen $\tau_{u,m}$ für die jeweilige Haftlänge, abhängig vom Nenndurchmesser (d_{nom}) der Schraubstange sind in Tab. 5.1 angeführt.

Haftlänge s_w	$\tau_{u,m}$ [N/mm ²]
$5 \cdot d_{nom}$	5,5
$10 \cdot d_{nom}$	5,0
$15 \cdot d_{nom}$	4,3
$20 \cdot d_{nom}$	2,9

Tab. 5.1 Mittelwerte der Haftspannungen in Abhängigkeit der Haftlänge [31]

Die Haftspannungen zufolge einer äußeren Belastung sind mit den entstehenden Haftspannungen zufolge Quellen und Schwinden überlagert. Dabei ist zu berücksichtigen das Quellen Zugkräfte und Schwinden Druckkräfte in der Schraubstange hervorrufen. Quellen stellt dabei den ungünstigsten Lastfall dar, da sich die Zugkräfte in der Schraubstange zufolge einer äußeren Belastung mit jenen Zugkräften aus dem Quellen überlagern. Die Druckkräfte in der Schraubstange zufolge Schwinden würden sich mit den Zugkräften zufolge einer äußeren Belastung kompensieren, jedoch kann es hier auch zu Querzügen kommen, da im Holz Querzugspannungen $\sigma_{1,90}$ entstehen.

Aufgrund der Modellbildung in Abb. 5.1 gilt für die Tragfähigkeit der Schraubstange zufolge einer äußeren Belastung und wechselnden Klimabedingungen:

$$F_u = \pi \cdot d_{nom} \cdot s_w \cdot \left[\left(\left(\frac{\rho}{\rho_k} \right)^c \cdot \frac{\tau_{u,m}}{\gamma} \right) \pm \tau_{\Delta u} \right] \quad (5.1)$$

- Wobei:
- F_u ...Tragfähigkeit der Schraubstange [N]
 - d_{nom} ...Aussendurchmesser der Schraubstange [N/mm²]
 - s_w ...rechnerisch wirksame Verbundlänge [mm]
 - ρ ...Rohdichte des Holzes [kg/m³]
 - ρ_k ...charakteristische Rohdichte [380 kg/m³]
 - c ...Exponent für Rohdichtekorrektur [-]
 - $\tau_{u,m}$...Mittelwert der Verbundfestigkeit [N/mm²]
 - $\tau_{\Delta u}$...Verbundspannung durch Holzfeuchteänderung Δu [N/mm²]
 - γ ...Teilsicherheitsbeiwert[-]

Die Parameter zur Berücksichtigung des Quell bzw. Schwindeinflusses für eine quer zur Faser eingebrachte Schraubstange können Tab. 5.2 entnommen werden.

Gewinde	c	$\tau_{\Delta u}$	$\tau_{\Delta u}$
		$\Delta u = 12 \%$ [N/mm ²]	$\Delta u = 4 \%$ [N/mm ²]
DIN 7998	1	2,0	0,8

Tab. 5.2 Parameter für Glg. 5.1 bzw. 5.2 [31]

Betrachtet man ausschließlich die Belastung zufolge einer feuchteinduzierten Spannung so reduziert sich Glg. (5.1) zu

$$F_{\Delta u} = \pi \cdot d_{nom} \cdot s_w \cdot \tau_{\Delta u} \quad (5.2)$$

Somit würde sich für eine Schraubstange mit einem Nenndurchmesser $d_{nom} = 16$ mm, einer max. Haftlänge von 320 mm und einer Feuchtedifferenz Δu von 12 % folgende Kraft in der Schraubstange einstellen:

$$F_{\Delta u} = \pi \cdot 16 \cdot 20 \cdot 16 \cdot 2 = 32200 \text{ [N]}$$

Nur durch feuchteinduzierte Spannungen würde sich somit die Tragfähigkeit der Gewindestange um $F_{\Delta u} = 32,2$ kN reduzieren und müsste bei einer Bemessung berücksichtigt werden [31].

5.2 Einflussbereiche von eingebauten Gewindestangen

In der Veröffentlichung von Fuyeo [32] wird ein gekrümmter BSH-Träger mit eingeklebten Gewindestangen verstärkt, um damit die Querzugtragfähigkeit zu erhöhen. In dieser Arbeit werden jedoch **keine** feuchteinduzierten Spannungen im Bauteil berücksichtigt. Für die Berechnung wurde zur Ermittlung der Einflussbereiche von Schraubstangen eine FE-Analyse durchgeführt.

Der untersuchte gekrümmte Träger ist in Abb. 5.2 dargestellt.

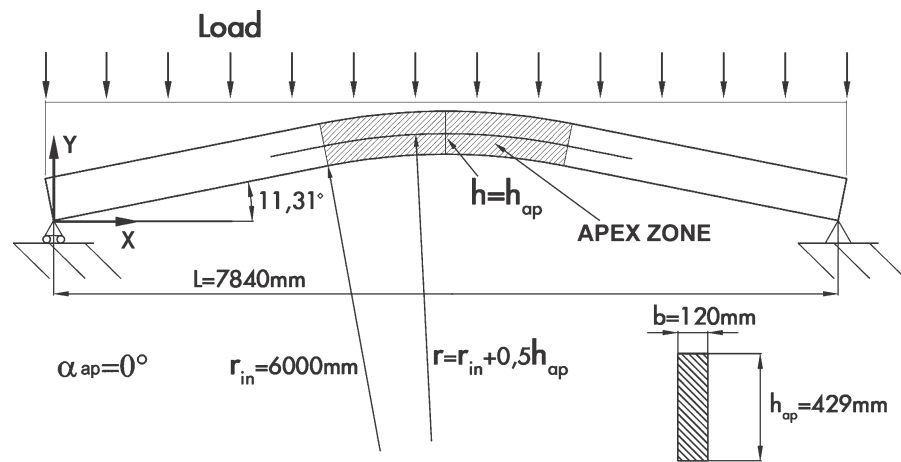


Abb. 5.2 untersuchter Träger der FE-Analyse [32]

Die Abmessungen des Querschnittes betragen 120 x 429 mm mit einer Lamellenstärke von 33 mm. Die Materialkennwerte des BSH entsprechen jener von GL28h. Der ungünstigste Lastfall zufolge der Einwirkungen Nutzlast, Schnee, Wind sowie dem Eigengewicht ergab eine gleichmäßig verteilte Bemessungslast von 7,80 kN/m. Der Nenndurchmesser der Gewindestangen aus Stahl in der Simulation variierte zwischen 5 mm bis 50 mm.

Abhängig von der Aufteilung der eingeklebten Gewindestangen ergeben sich die Spannungen im BSH nach Abb. 5.3. Die Durchmesser der Gewindestangen in der durchgeführten Studie entsprechen einem Nenndurchmesser von $d_{nom} = 15$ mm.

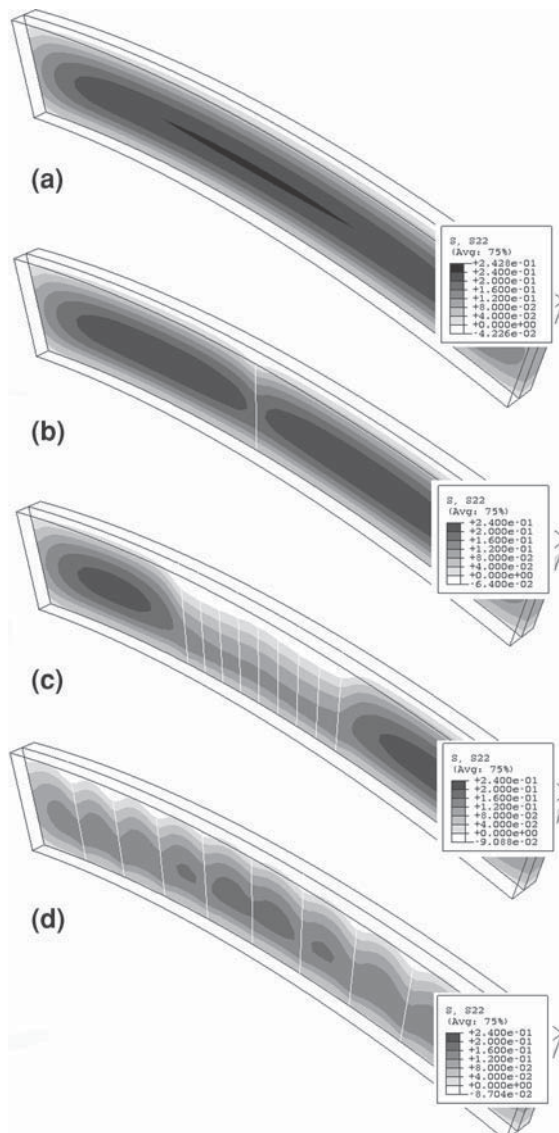


Abb. 5.3 Querspannungen im gekrümmten BSH-Träger unter Last
 a) keine Querszugverstärkung
 b) eine eingeklebte Gewindestange
 c) neun eingeklebte Gewindestangen im Firstbereich
 d) elf eingeklebte Gewindestangen gleichmäßig verteilt über die Firstbereich [32]

In Fall a) bei dem keine Querszugverstärkung verwendet wurde liegt mit $\sigma_{t,90} = 0,242 \text{ N/mm}^2$ die höchste Querspannung vor. Durch den Einbau einer eingeklebten Gewindestange in Fall b) kann die auftretende Querspannung $\sigma_{t,90}$ im Firstbereich bereits reduziert werden, jedoch ist der Einflussbereich einer eingeklebten Gewindestange gering, sodass durch diese Stange die maximale Querspannung lediglich um 2 % reduziert werden konnte.

Bei der Aufteilung der Gewindestange über den Firstbereich (Fall c) ist eine Reduktion um 25,5 %, im Fall d) um 31,7 % festzustellen. Die Reduzierung der auftretenden Quersugspannungen in Abhängigkeit der gewählten Anzahl an eingeklebten Gewindestangen ist in Abb. 5.4 dargestellt.

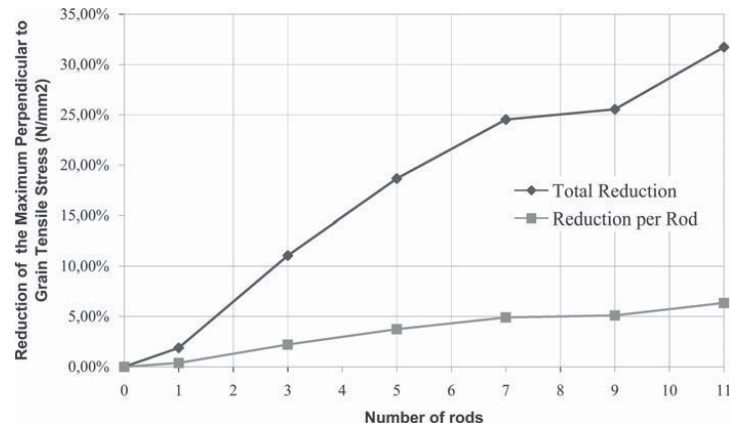


Abb. 5.4 Reduzierung der auftretenden Quersugspannung σ_{190} in Abhängigkeit der Anzahl der Gewindestangen [32]

Aus Abb. 5.5 ist zu entnehmen, dass ab einem Durchmesser von 15 mm die auftretende Quersugspannung in der durchgeführten Studie verbunden mit den angegebenen Randbedingungen nicht mehr signifikant abnimmt.

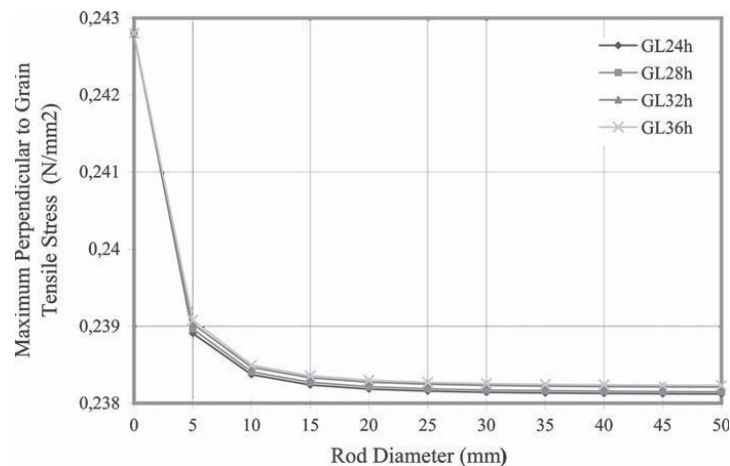


Abb. 5.5 auftretende Quersugspannung σ_{190} in Abhängigkeit des Durchmessers der Gewindestangen [32]

Durch Quersugverstärkungen sind signifikante Steigerungen der Quersugfestigkeit $f_{t,90}$ möglich. In dieser Berechnung müsste jedoch noch ein zusätzlicher Lastfall, jener der feuchtinduzierten Spannungen berücksichtigt werden. Auch auf die bereits erwähnte Problematik einer möglichen Rissbildung wird hier nicht eingegangen [32].

Versuchskonfiguration zur Erfassung
feuchteinduzierter Spannungen in
querzugverstärktem Brettschichtholz

1 Versuchsplanung

In diesem Kapitel wird der Weg zu einer Versuchskonfiguration der Messung feuchteinduzierter Kräfte in querzugverstärktem Brettschichtholz (BSH) geschildert. Durch eine Änderung des Umgebungsklimas in querzugverstärkten BSH wird die Messung folgender Parameter erforderlich

- Messung der Spannungen bzw. Kräfte in den Schraubstangen,
- Messung der Verformung im umgebenden Holz,
- Einflussbreite der Schraubstange im Holz,
- Überprüfung der Eignung verschiedener Verfahren zur Ermittlung der Holzfeuchtigkeit,
- Messung der Holzfeuchtigkeit sowie
- Überprüfung einer möglichen Rissentstehung im Holz.

Eine Literaturrecherche ergab, dass bereits einige Arbeiten zur Messung von Zwängungsspannungen in Holzkörpern durch eine Änderung der Holzfeuchte vorliegen, diese jedoch im Allgemeinen für den ungestörten Holzquerschnitt gelten. Für die Messung von auftretenden Spannungen in eingebauten Querzug-Verstärkungsmitteln zufolge einer Feuchteänderung konnten nur bedingt Publikationen angetroffen werden.

Aufgrund fehlender geeigneter Versuchskonfigurationen musste daher eine solche für die vorliegende Messaufgabe entwickelt werden.

Grundsätzlich stellte sich dabei vorab die Frage, ob die Spannungen bzw. Kräfte beim Quellen bzw. Schwinden des Holzes ermittelt werden sollen. Nach reiflicher Überlegung wurde der Vorgang des Schwindens gewählt. Somit sollten die Spannungen bei Einbau von feuchtem Holz mit anschließender Trocknung untersucht werden.

Um möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erzielen, wurden die klimatischen Randbedingungen so gewählt, dass diese möglichst realen Verhältnissen entsprechen, und andererseits mit den vorhandenen Prüfeinrichtungen umgesetzt werden konnten. Die Prüfkörper wurden dazu über rund 18 Monate in einem Klima mit 20 °C Temperatur und einer rel. Luftfeuchte von 90 % klimatisiert, sodass diese nach dieser Zeit eine homogene Holzfeuchte von $u = 18$ % aufwiesen. Nach Erreichen dieser Holzfeuchte wurden die Schraubstangen eingedreht und nach Installation aller notwendigen Messeinrichtungen die rel. Luftfeuchte bei konstanter Temperatur auf 40 % abgesenkt, und mit der Aufzeichnung der Messdaten begonnen.

1.1 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte nach zeitlicher Abfolge in folgenden Schritten:

- Festlegung der Abmessungen, Zuschnitt des BSH,
- Aufbringen einer Hirnholzversiegelung,
- Konditionierung der Holzfeuchte.

Nach Erreichen der Holzausgleichsfeuchte konnten die Prüfkörper weiter bearbeitet werden.

Die weiteren Schritte waren

- Aufbringen von Messpunkten zur Erfassung der Verformungen an der Holzoberfläche,
- Eindrehen der Schraubstangen,
- Installation und Festlegung der Feuchtigkeitsmessungen und
- Anschluss an Datenlogger

Alle zur Herstellung und zur Messung notwendigen Schritte werden in den nächsten Abschnitten ausführlich erklärt.

1. 1. 1 Abmessungen der Prüfkörper

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde ein Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h herangezogen.

Aus vorhergegangenen Prüfungen waren drei Träger (T1, T2, T3) mit einer Länge von jeweils $l = 7,0$ m vorhanden, welche mit einer Holzfeuchte von $u = 12$ % verklebt wurden. Der Querschnitt betrug 160 mm x 1280 mm. Da auch die Einflussbreite einer Schraubstange auf den Träger untersucht werden sollte wurden die Prüfkörper mit vier unterschiedlichen Längen hergestellt. Als Länge der Prüfkörper wurde jeweils ein Vielfaches der Querschnittsbreite von 160 mm gewählt. Die Prüfkörper wiesen im Schnitt eine Holzfeuchte von ca. 10 % und eine mittlere Rohdichte ρ von 435 kg/m³ auf. Um den Einfluss der Höhe eines BSH-Elementes zu erfassen, wurden weiters die Höhen variiert, sodass folgende Prüfkörper mit der zugehörigen Prüfkörperanzahl hergestellt wurden:

- $l = 1280$ mm:

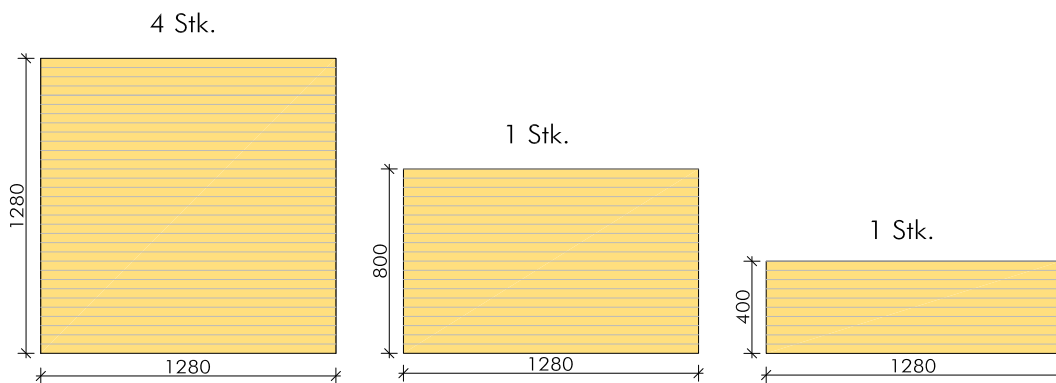


Abb. 1.1 Prüfkörper mit einer Länge von 1280 mm

- $l = 640$ mm:

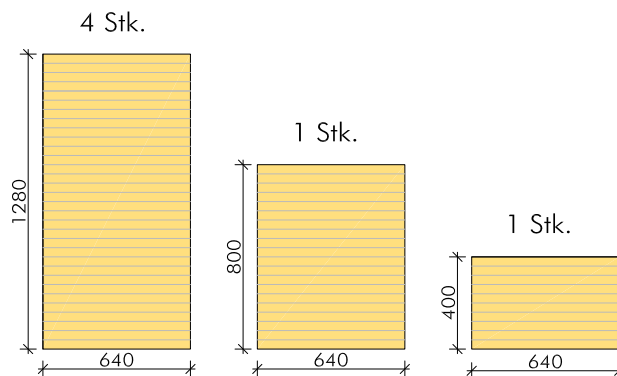


Abb. 1.2 Prüfkörper mit einer Länge von 640 mm

- $l=320$ mm:

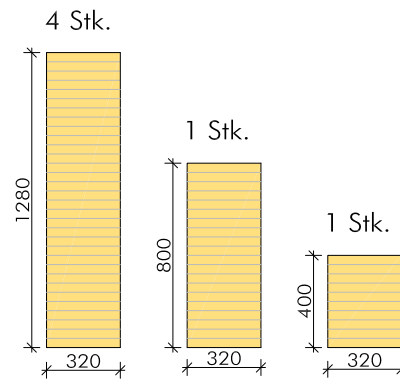


Abb. 1.3 Prüfkörper mit einer Länge von 320 mm

- $l=160$ mm:

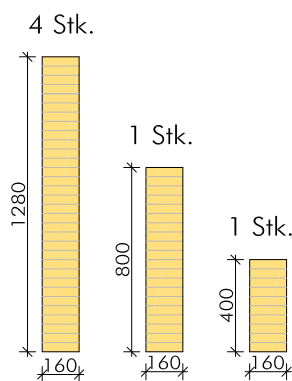


Abb. 1.4 Prüfkörper mit einer Länge von 160 mm

In der nachfolgenden Tab. 1.1 sind die Prüfkörper nach ihrer Größe und Gruppe nummeriert, wobei sich die jeweilige Gruppe immer über dieselbe Länge definiert.

Gruppe	Nr.	b [mm]	h [mm]	Schraubstange
1	1	1280	1280	ja
	2	1280	1280	ja
	3	1280	1280	ja
	4	1280	1280	nein
	5	1280	800	ja
	6	1280	400	ja
2	7	640	1280	ja
	8	640	1280	ja
	9	640	1280	ja
	10	640	1280	nein
	11	640	800	ja
	12	640	400	ja
3	13	320	1280	ja
	14	320	1280	ja
	15	320	1280	ja
	16	320	1280	nein
	17	320	800	ja
	18	320	400	ja
4	19	160	1280	ja
	20	160	1280	ja
	21	160	1280	ja
	22	160	1280	nein
	23	160	800	ja
	24	160	400	ja

Tab. 1.1 Prüfkörperbezeichnung

Die Prüfkörper 4, 10, 16, und 22 erhielten **keine** Schraubstange. Sie dienen als Referenzkörper für die Oberflächen- bzw. Feuchtemessung.

Die Rohdichten ermittelt aus dem gesamten Prüfkörpervolumen der einzelnen Prüfkörper können Tab. 1.2 entnommen werden. Sie weichen nur gering voneinander ab.

Nr.	Rohdichte [kg/m ³]	aus Träger
1	434	T2
2	431	T2
3	439	T1
4	442	T3
5	439	T3
6	433	T3
7	441	T1
8	433	T1
9	433	T2
10	442	T3
11	433	T3
12	430	T3
13	433	T1
14	439	T1
15	440	T3
16	434	T3
17	440	T3
18	435	T3
19	435	T3
20	435	T1
21	427	T1
22	447	T1
23	434	T3
24	435	T3

Tab. 1.2 Rohdichten der Prüfkörper

1. 1. 2 Hirnholzversiegelung

Um eine zu rasche Holzfeuchteänderung in den Prüfkörpern zu vermeiden, wurden nach dem Zuschnitt die Hirnholzflächen durch handelsübliches transparentes Silikon versiegelt. Der Grund für die Hirnholzversiegelung liegt in der wesentlich schnelleren Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Abgabe über die Hirnholzfläche. Dies hätte bei der Trocknung eine zu schnelle Veränderung der Holzfeuchte zur Folge, wodurch verstärkt mit Schwindrissen zu rechnen gewesen wäre. Weiters soll durch die Hirnholzversiegelung die Lage des Prüfkörpers in einem BSH Träger mit größeren Längsabmessungen simuliert werden. Das Silikon wurde mittels einer Spachtel vollflächig aufgetragen.

1. 1. 3 Konditionierung der Prüfkörper

Die so hergestellten „Rohlinge“ wurden nun bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90 % in der Klimakammer gelagert. Nach einer Lagerung von 18 Monaten wurde das Klima umgestellt und mit der Aufzeichnung der Messdaten begonnen.

1.2 Querzugverstärkung

Für die Querzugverstärkung wurden Schraubstangen mit einem Nenndurchmesser von $d=16$ mm und einem Kerndurchmesser von $d_{Gk}=12$ mm vom Hersteller SFS intec AG verwendet. Bei dem System WB-T-16 handelt es sich um kopflose Schraubstangen mit einer Länge von bis zu 3,0 m. Durch den kopflosen Antrieb mittels einer Antriebsnuss (Abb. 1.22) ist eine beliebige Ablängung möglich. Die Gewindegeometrie ist nach DIN 7998 [3] festgelegt, ein Einleimen der Schraubstange ist nicht erforderlich. Der Mindestwert der Zugfestigkeit beträgt $f_u=800$ N/mm².



Abb. 1.5 Gewinde nach DIN 7998

Die Schraubstangen werden mit dem Kerndurchmesser von $d_{Gk}=12$ mm vorgebohrt, und anschließend eingedreht.

Der Vorgang des Bohrens und Eindrehens wird in Abschnitt 1.3.1 ausführlich dargestellt.

Bei der Bemessung sind die Fälle Schraubenauszug aus dem Holz und Zugbruch der Stange zu berücksichtigen. Die Bemessung erfolgt nach Datenblatt Nr. 01 „Querzugverstärkung, Allgemeine Bemessungsgrundlagen“, welches sich auf die Regelungen in DIN 1052: 2008-12, Abschnitt 12.8.2 [2] stützt.

- Auszug aus dem Holz:

$$R_{ax,k} = f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef} \quad (1.1)$$

$$f_{1,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (1.2)$$

$$R_{ax,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{ax,k}}{1,3} \quad (1.3)$$

- Zugbruch der Stange:

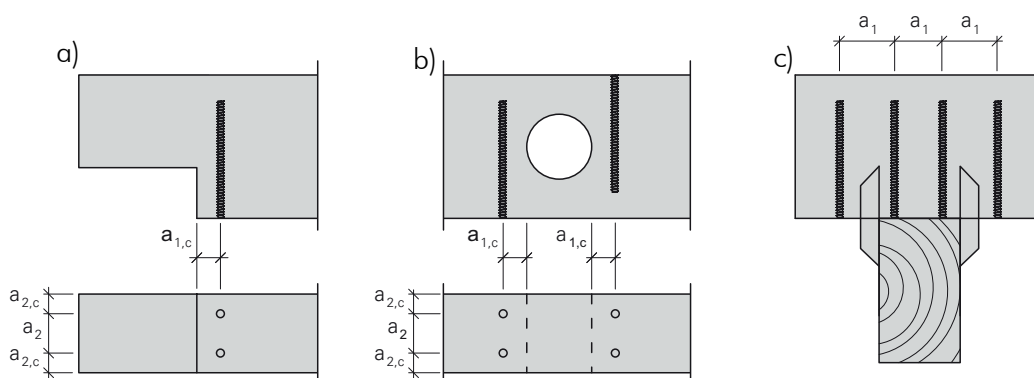
$$R_{ax,k} = 112,5 \cdot \pi \cdot d^2 \quad (1.4)$$

$$R_{ax,d} = \frac{R_{ax,k}}{1,25} \quad (1.5)$$

- Wobei:
- $R_{ax,k}$...charakteristische axiale Tragfähigkeit eines WB-Befestigers [N]
 - $f_{1,k}$...charakteristischer Wert des Ausziehparameters [N/mm²]
 - d ...Außendurchmesser eines WB-Befestigers [mm]
 - l_{ef} ...effektive Einbindelänge des WB-Befestigers. l_{ef} ist abhängig von der Geometrie der Anwendung! [mm]
 - $R_{ax,d}$...Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit eines WB-Befestigers [N]
 - k_{mod} ...Modifikationsbeiwert [-]
 - g_k ...charakteristische Rohdichte des Holzes [kg/m³]

Der Bemessungswert der Zugbruchkraft max. $R_{ax,d}$ der Schraubstange $d=16$ mm beträgt 72,40 kN [34].

Mögliche Anwendungen und dazugehörige Mindestabstände sind in Abb. 1.6 dargestellt.



Mindestabstände

	WB-T-16	WB-T-20
a_1	64 mm	80 mm
a_2	48 mm	60 mm
$a_{1,c}$	40 mm	50 mm
$a_{2,c}$	40 mm	50 mm
$a_{1,oben}$	250 mm	250 mm

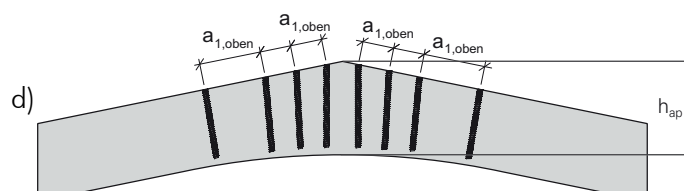


Abb. 1.6 mögliche Anordnungen von Schraubstangen:
a) Verstärkung bei Ausklinkung
b) Verstärkung bei Durchbruch
c) Verstärkung für Querdruck
d) Querzugverstärkung im Firstbereich von gekrümmten Trägern [34]

Bei der Verstärkung des Firstbereichs von Brettschichtholzträgern gilt für die Abstände in Trägerlängsrichtung:

-bei vollständiger Aufnahme der Querkzugspannungen durch WB: Der Abstand in Trägerlängsrichtung, gemessen an der Oberkante des Trägers, soll mindestens 250 Millimeter, jedoch drei Viertel der Firsthöhe h_{ap} nicht überschreiten:
 $250 \text{ mm} < a_{1,\text{oben}} < 0,75 \cdot h_{ap}$

-bei der Aufnahme zusätzlicher, klimatisch bedingter Querkzugspannungen durch konstruktive Verstärkungen sind diese gleichmäßig im querkzugbeanspruchten Bereich zu verteilen [34].

Erwähnt sei noch, dass Schraubstangen auch zur **Schubverstärkung** von Trägern verwendet werden können. In diesem Zusammenhang sei auf die Arbeit von Blaß, Krüger [28] verwiesen.

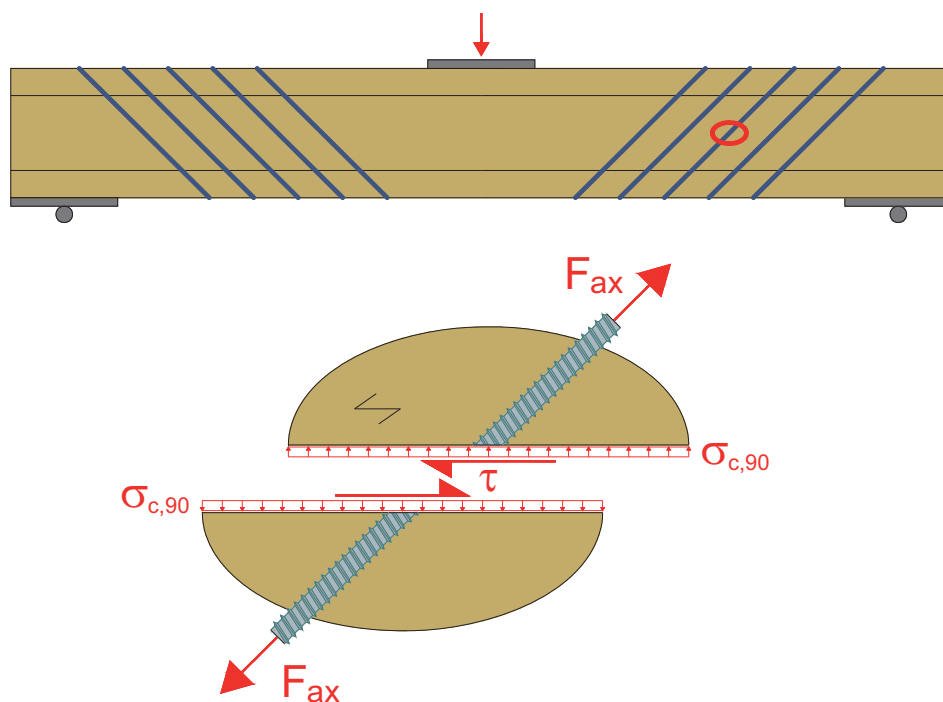


Abb. 1.7 Wirkungsprinzip einer Schubverstärkung [28]

1.3 Messung der Spannungen zufolge Schwinden

Die Messungen der Spannungen bzw. Kräfte in einem Stahlteil erfolgt allgemein über die Erfassung von Kraft und Dehnung. Die Kraft wird über Kraftmessdosens der jeweiligen Prüfeinrichtung gemessen. Dehnungen können über Dehnmessstreifen (DMS) (Abb. 1.8) erfasst werden, welche aufgeklebt werden. Über das Hook'sche Gesetz $\sigma = E \cdot \varepsilon$ kann die Spannung für den linearen Bereich berechnet werden.

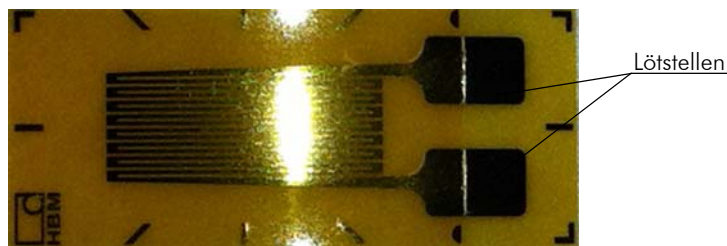


Abb. 1.8 Dehnmessstreifen (DMS)

Die Ermittlung der Spannungen in den Schraubstangen stellte sich als größte Herausforderung dar. Zwar ist die Spannungsermittlung mittels DMS nach dem oben erwähnten Verfahren prinzipiell kein großes Problem, doch wie sollte die Messung auf einer eingedrehten Schraubstange erfolgen?

Grundsätzlich musste jede Schraubstange mit zwei DMS bestückt werden. Zwei DMS waren notwendig um eine Vollbrückenschaltung realisieren zu können. Durch diese Vollbrückenschaltung zwischen den beiden DMS kann der Einfluss der Biegung in der Stange eliminiert werden, sodass nur noch die Normaldehnung erfasst wird.

Eine Variante bestand darin, die DMS nach dem Eindrehen der Schraubstangen zu applizieren, jedoch war dies aus mehreren Gründen nicht möglich: Um DMS applizieren zu können, muss die zu beklebende Stelle frei zugänglich sein. Eine Bohrung in Mitte des Prüfkörpers von 63 mm durch den gesamten Querschnitt, welche vor Eindrehen der Schraubstangen hergestellt werden musste, sollte einen Zugang ermöglichen. Durch die Breite der Prüfkörper von 160 mm war die Klebestelle für den Messtechniker jedoch nur schwer zugänglich, sodass eine sachgemäße Applizierung der DMS nicht möglich war.

Ein weiteres Problem bestand in der Kalibrierung der mit DMS bestückten Schraubstange. So muss jede Stange für sich einer Kalibrierung in Form einer Kraft-Verformungs-Messung unterzogen werden. Im eingedrehten Zustand ist das nicht mehr möglich. Dies führte letztendlich zur Erkenntnis, dass die DMS bereits vor dem Eindrehen der Schraubstangen appliziert und kalibriert werden mussten. Aus einer Reihe von Vorversuchen kristallisierte sich eine mögliche Lösung heraus, welche im Weiteren beschrieben wird.

Zunächst musste auf der Schraubstange ein Plateau für die Applizierung des DMS geschaffen werden. Dafür wurden die Schraubstangen entsprechend Abb. 1.9 bearbeitet. Das Gewinde wurde zunächst auf einer Länge von 55 mm abgedreht. Anschließend wurden zwei sich gegenüberliegende flache Fräsungen hergestellt. Auf diesen Flachstellen konnten später die DMS appliziert werden. Zwar wäre eine Applizierung der DMS bereits auf dem abgedrehten Durchmesser möglich, jedoch sind diese beim Eindrehen nicht geschützt und würden durch die Wandreibung zwischen Holz und Schraubstange abgerieben werden. Weiters war die Absenkung notwendig um kurze Drähte unterzubringen, die nach dem Eindrehen mit den Kabeln des Datenloggers verbunden werden mussten.

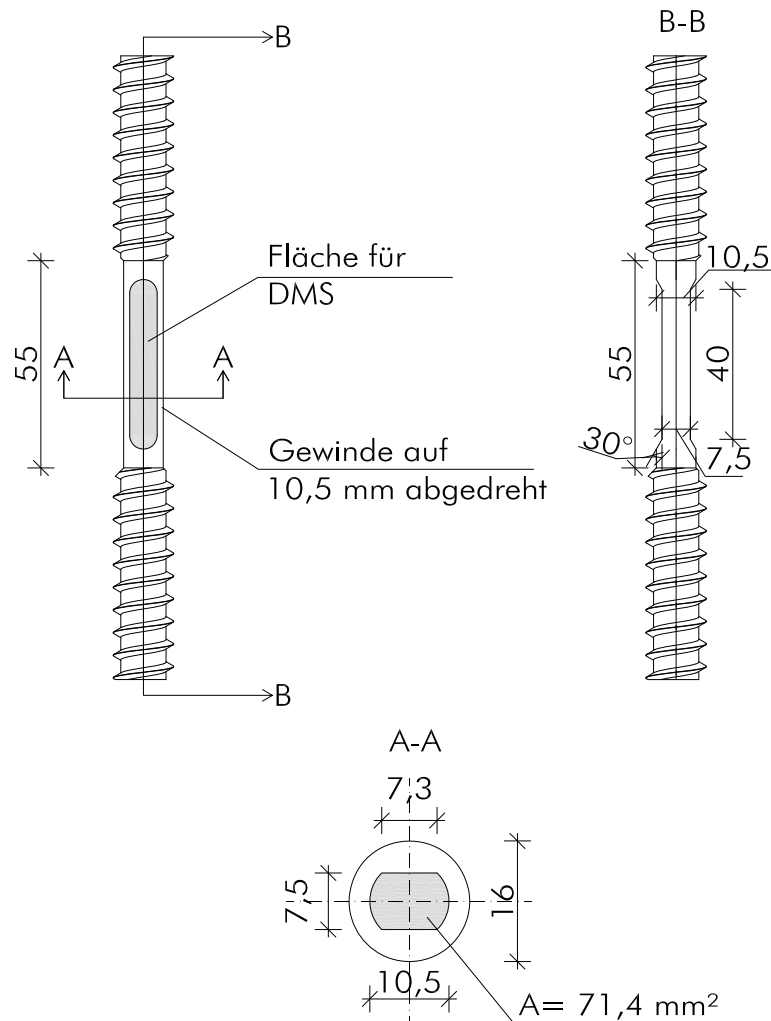


Abb. 1.9 Bearbeitung der Schraubstangen

Die Toleranzen der Fräsungen bzw. des Abdrehens liegen bei $\pm 0,05 \text{ mm}$.



Abb. 1.10 bearbeitete Schraubstange

Nach Vorbereiten der Schraubstangen konnten die DMS aufgeklebt werden. Verwendet wurden DMS vom Typ 6/120LY41 des Herstellers HBM. Zunächst musste jedoch festgestellt werden, welche Temperaturen beim Eindrehen entstehen können. Ein Vorversuch ergab, dass die Temperatur in der Nähe der DMS nicht höher als 60 °C war. Dadurch konnte ein 1-K-Klebstoff verwendet werden, der leichter zu verarbeiten ist als ein 2-K-Klebstoff mit höherer Temperaturtoleranz. Ein applizierter DMS mit entsprechender Verkabelung ist in Abb. 1.11 dargestellt. In diesem Zustand erfolgte die Kalibrierung der Schraubstangen. Diese erfolgte auf einer Universalprüfmaschine vom Type Zwick 275. Die aufgebrauchten Vorkräfte betragen 52 kN. Neben der kontinuierlichen Aufzeichnung der Kräfte wurden gleichzeitig die Spannungen in den DMS gemessen, sodass den Messwerten der DMS die entsprechenden Kräfte in der Schraubstange zugeordnet werden können.

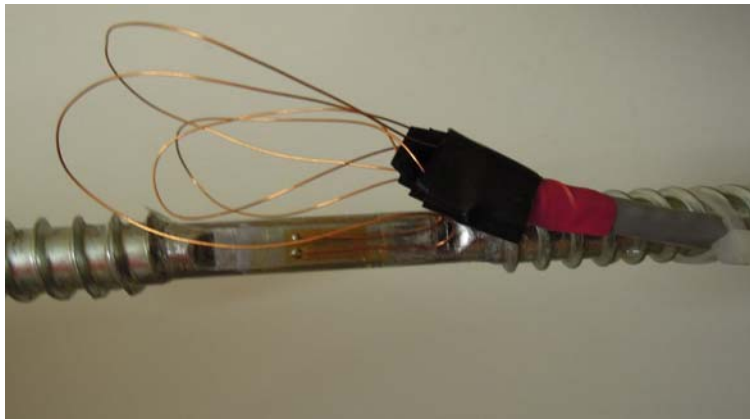


Abb. 1.11 applizierter DMS mit notwendiger Verkabelung

Um die Schraubstangen Eindrehen zu können, mussten der Bereich der DMS und die dazugehörigen Drähte geschützt werden. Dies wurde durch aufgeklebte Edelstahlhülsen mit einer Wandstärke von 0,5 mm bewerkstelligt (Abb. 1.12).



Abb. 1.12 Edelstahlhülse

Wichtig war, dass der Außendurchmesser der aufgeklebten Hülse nicht größer als der Durchmesser des Bohrloches von 12,5 mm war. Daher wurden die Schraubstangen mit einem Kerndurchmesser $d_{Gk} = 12$ mm auch mit 10,5 mm abgedreht. Somit ergab sich der Außendurchmesser mit der aufgeklebten Hülse etwas kleiner als 12 mm.

Die Hülse war so geformt, dass sie leicht auf die Schraubstange geschoben werden konnte, ohne dabei die DMS zu beeinträchtigen. Anschließend wurde die Hülse mit eigens angefertigten „Klemmböcken“ auf die Schraubstange aufgeklebt.



Abb. 1.13 Edelstahlhülse mit Klemmböcken vor Verpressen



Abb. 1.14 aufgeklebte Edelstahlhülse

Die Haftfestigkeit des Klebers, mit dem die Edelstahlhülse aufgeklebt wurde, musste dabei einen Kompromiss zwischen Haftung und Lösbarkeit eingehen, da die Hülse ja nach dem Eindrehen wieder entfernt werden muss, um die Drähte der DMS freizulegen.

Ein 2-K Metallkleber schied wegen der zu hohen Haftfestigkeit aus. Die Lösung wurde im Holzbau üblichen PU-Kleber gefunden. Er wies einerseits eine während des Eindrehens ausreichende Festigkeit auf, um die Hülse nicht tordieren zu lassen, andererseits konnte er im eingedrehten Zustand leicht entfernt werden. Durch die entstehende Reibungshitze wurde der Kleber etwas aufgeweicht, was die gute Lösbarkeit ermöglicht. Die optimale Auftragsmenge des Klebers wurde in einer Reihe von Vorversuchen ermittelt.

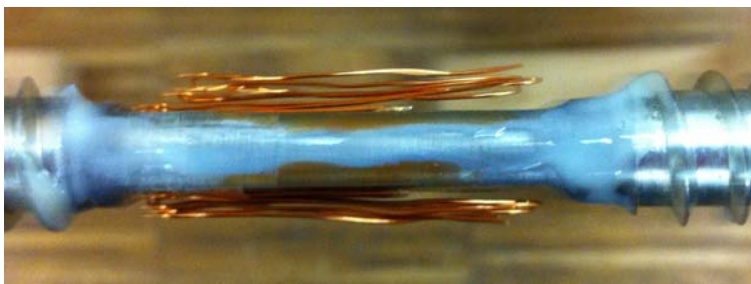


Abb. 1.15 aufgetragener PU-Kleber

Nach dem Eindrehen wurde die Hülse vorsichtig mit Schraubenzieher und Spitzzange entfernt. Die Drähte wurden aus dem Bohrloch herausgefädelt und mit dem Kabel, welches zum Datenlogger führt, verlötet. Um die Störung durch das Bohrloch für das Feuchteverhalten des Holzes zu minimieren, wurde das Loch mit „Pfropfen“ aus dem übrig gebliebenen Holz der Prüfkörper wieder verschlossen. Da die DMS weiter zugänglich sein sollten, wurden die Pfropfen etwas kleiner als der Durchmesser des Bohrloches hergestellt. Die Fuge wurde mittels eines vorkomprimierten Dichtbandes und transparenten Silikon verschlossen.

Der Vorgang des Bohrens und das Eindrehen der Schraubstangen wird in Abschnitt 1. 3. 1 näher erläutert.



Abb. 1.16 erfolgreich eingedrehte Schraubstange

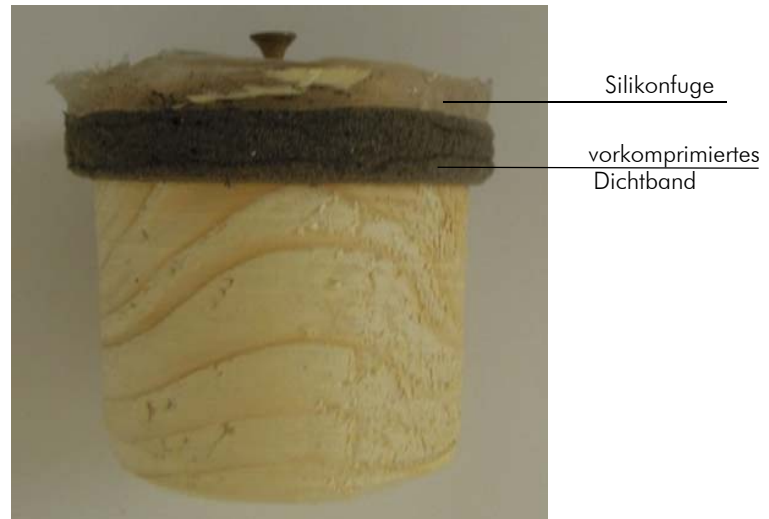


Abb. 1.17 Propfen zur Schließung des Loches



Abb. 1.18 verschlossener Bereich zur Messung der Schraubenkräfte im Prüfkörper

Anschließend wurden die DMS an einen Datenlogger angeschlossen. Verwendet wurde das Modell MW 100 des Herstellers Yokogawa. Die Kraftänderung wurde 1x pro Stunde aufgezeichnet.

Die Messung wurde an jedem Prüfkörper mit eingedrehter Schraubstange durchgeführt, also an 20 Stk. Zusätzlich wurden noch zwei nicht eingedrehte Schraubstangen mit applizierten DMS angeschlossen, um eine mögliche Kraftänderung zufolge Temperaturschwankungen bzw. ein Driften der DMS zu erfassen.

1.3.1 Eindreihen der Schraubstangen

Die Bohrung der Löcher wurde mit dem „Präzisionsbohrer für Querzugverstärker“ der Firma woodtec Frankhauser GmbH hergestellt (Abb. 1.19). Zur Verfügung gestellt wurde das Bohrsystem von der Firma SFS intec AG. Es handelt sich dabei um einen druckluftgespülten Tieflochbohrer, der mittels Lafette geführt wird. Die Lafette wird dazu einfach mit zwei Schrauben am Holz befestigt. Die Höhe und Länge der Bohrlochführung kann verstellt werden.

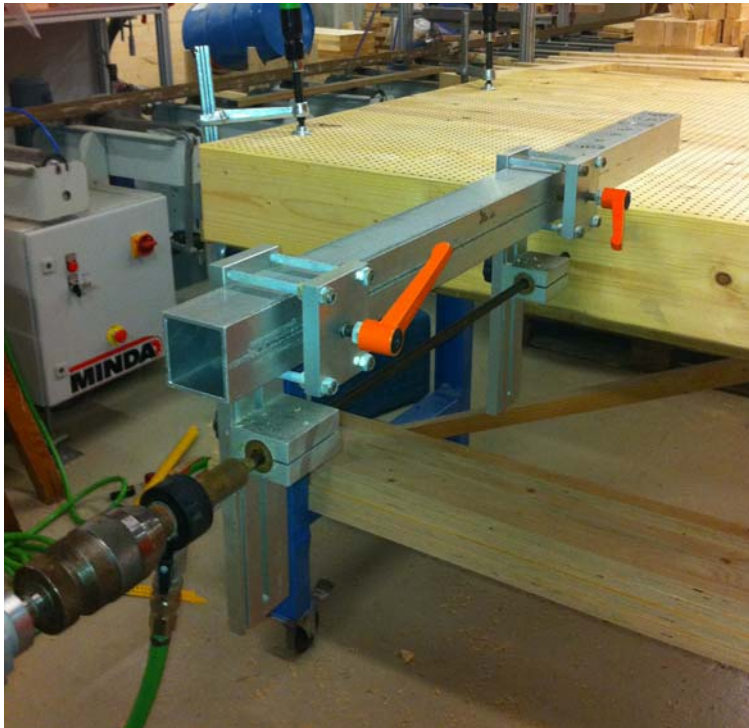


Abb. 1.19 Bohrlafette mit druckluftgespültem Tieflochbohrer



Abb. 1.20 Bohrmaschine mit 1500 mm langen druckluftgespültem Tieflochbohrer

Der Bohrer selbst besitzt Öffnungen mit der die Druckluft in das Bohrloch einströmen kann. Dazu wird ein Luftschlauch mit einem Druck von ca. 5 bar an den Bohrer angeschlossen. Weiters können durch die durchgehende Nut an der Seite des Bohrers entstehende Späne aus dem Bohrloch abgeführt werden. Die erreichte Positionsgenauigkeit der Schraubstangen lag bei einer Bohrlänge von 1280 mm bei ± 10 mm, also durchaus zufriedenstellend.



Abb. 1.21 Bohrer
a) Luftlöcher
b) Nut zum Abtransportieren der Späne

Nach Herstellen des Bohrloches für die Schraubstange wurde in der Mitte des Probekörpers mit einem Forstnerbohrer eine Bohrung von 63 mm hergestellt. Das Loch dient zum Herausführen der Drähte der DMS. Um eventuell entstehende Risse besser erkennen zu können, wurden die Wandungen der Bohrung mit schwarzer Farbe besprüht.

Das Eindrehen der Schraubstangen mit DMS nach Abschnitt 1. 3 erfolgte mithilfe einer Antriebsnuss. Die Nuss wird dafür auf die Schraubstangen aufgeschraubt. Auf der Rückseite weist sie eine Vierkantöffnung mit einer Seitenlänge von einem halben Zoll auf. Über den Vierkant wird die Antriebsnuss dann angetrieben.

Ein Tordieren der Stangen an der geschwächten Stelle konnte während des Eindrehens nicht beobachtet werden.



Abb. 1.22 Antriebsnuss auf Schraubstange



Abb. 1.23 Vierkant in Antriebsnuss

Die Antriebsnuss ist versenkbar, sodass die Schraubstange bündig mit dem Holz abschließt, jedoch hat die Schraubstange auf Länge der Antriebsnuss dann keinen Verbund mit dem Holz. Bei den Prüfkörpern wurde die Nuss nicht versenkt, sodass der Verbund der Schraubstange mit dem Holz auch am Randbereich erhalten blieb.

1. 4 Messung der Verformungen des BSH zufolge Schwinden

Um die Verformungen zufolge Schwinden messen zu können, kamen zwei Verfahren zum Einsatz:

- „analoge“ Messung mittels Messschieber
- „digitale“ Messung mittels Fotogrammetrie

1. 4. 1 Messung mittels Messschieber

Verwendet wurde ein digitaler Messschieber des Typs Mahr 18 EX mit einem Messbereich von 1030 mm. Da die meisten Prüfkörper jedoch eine Höhe von 1280 mm aufweisen, mussten die Messwerte bei der Auswertung auf diese Höhe umgerechnet werden. Um die Verformungen mithilfe des Messschiebers entsprechend präzise ermitteln zu können, wurde eine Modifizierung erforderlich. Dabei wurden an den Spitzen des Messschiebers kugelförmige Messrubine angebracht (Abb. 1.24). Diese Messrubine sitzen exakt in eigens dafür bearbeitete Sechskant-Holzschrauben. So wurde in den Kopf der Schraube eine Öffnung für die Messrubine eingefräst. Mithilfe dieser Messkonfiguration ist es somit möglich, eine Präzision der Messlängenbestimmung von $\pm 0,1$ mm zu erreichen.



Abb. 1.24 Messschieber mit kugelförmigen Messrubinen und passenden Schrauben



Abb. 1.25 kugelförmige Messrubine mit passender Sechskant-Holzschraube

Um sicherzustellen, dass sich die Lage der kugelförmigen Messrubine nicht verändert, wurde vor jeder Messung eine Kalibrierung durchgeführt. Die Kalibrierung wurde durch Messen eines Stahlstabes bei konstanter Temperatur durchgeführt. Der verwendete Stahl ist eine Invarlegierung, welche aus Eisen und Nickel besteht. Diese Legierung weist einen sehr geringen Temperatur-Dehnungskoeffizienten α auf, und eignet sich deshalb ausgezeichnet zu Kalibrierzwecken. Der Invarstab hatte die entsprechenden Bohrungen für das Einrasten der Messrubine.



Abb. 1.26 Invarstab zur Kalibrierung des Messschiebers

Die Lagemessungen wurden an acht Prüfkörpern der Gruppen 1 und 2 durchgeführt. Die Messungen bei den Gruppen 3 und 4 erschienen aufgrund der kleinen Längsabmessungen als nicht sinnvoll. Die Lage der Messpunkte in den Prüfkörpern sind in Abb. 1.27 und Abb. 1.28 dargestellt. Diese Art der Oberflächenmessung soll eine Kontrolle der Oberflächenmessung durch Fotogrammetrie ermöglichen.

- $l = 1280$ mm:

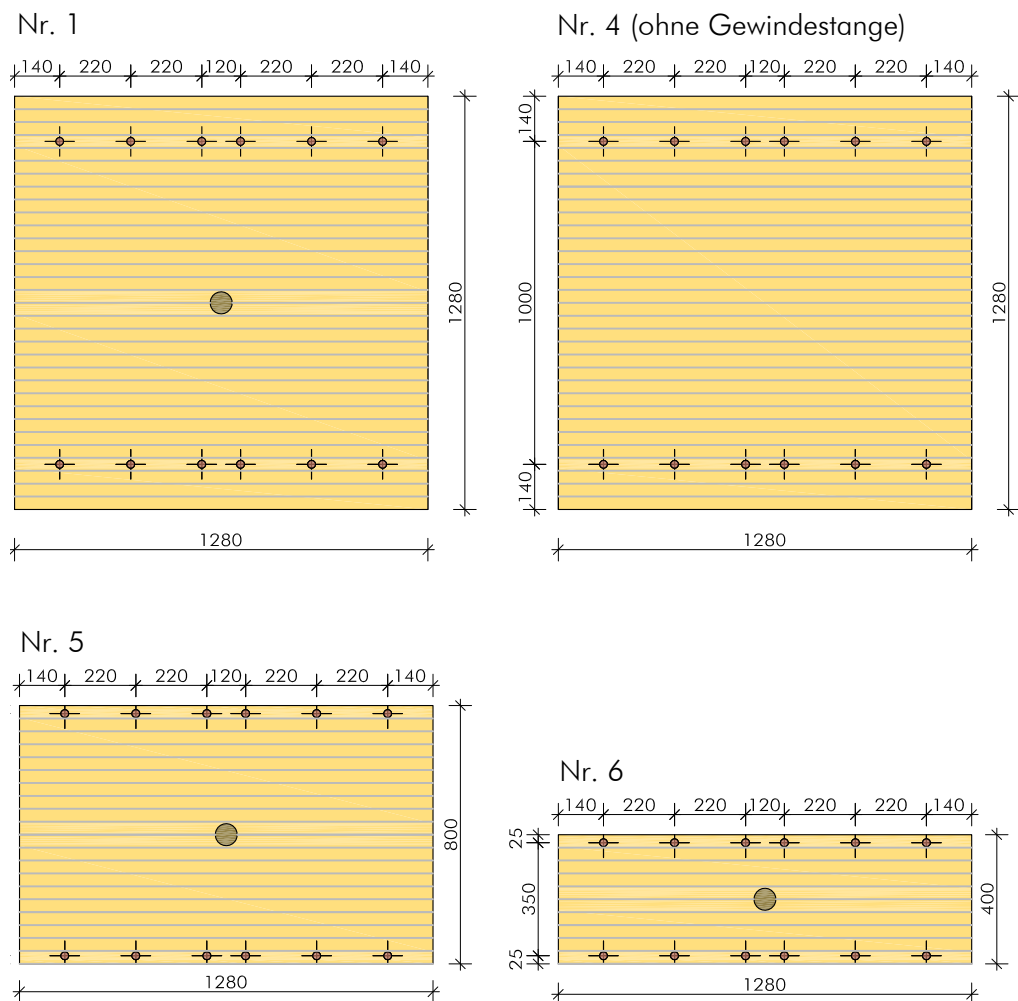


Abb. 1.27 Anordnung der Messpunkte an Prüfkörpern der Gruppe 1

- $l=640$ mm:

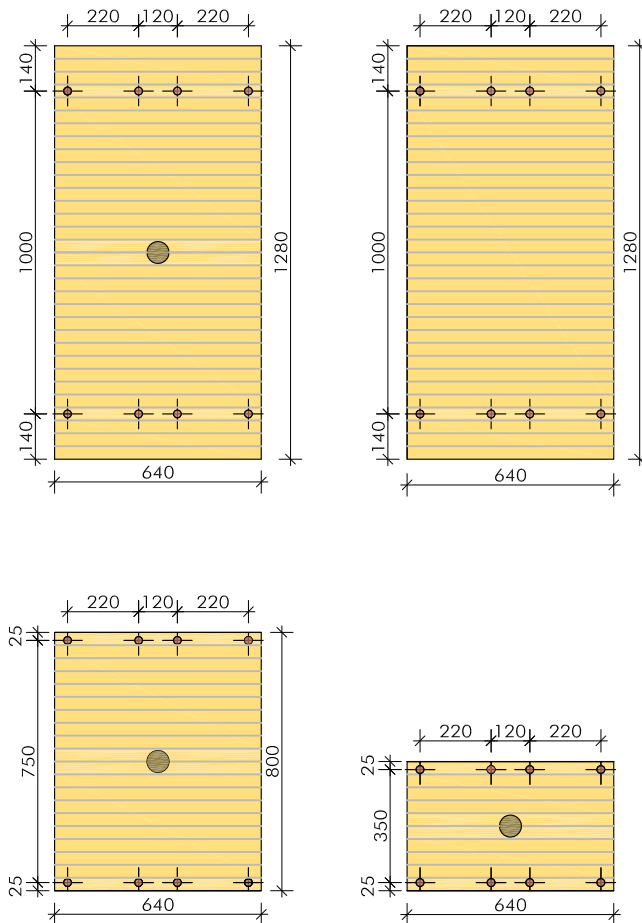


Abb. 1.28 Anordnung der Messpunkte an Prüfkörpern der Gruppe 2



Abb. 1.29 eingedrehter Messpunkt am Prüfkörper

1. 4. 2 Messung mittels Fotogrammetrie

Diese Messungen werden in Zusammenarbeit mit dem „Institute for Information and Communication Technologies“, Joanneum Research Graz durchgeführt. Mittels zwei hochauflösenden Kameras wurden die Prüfkörper in zeitlichen Abständen von sieben Tagen fotografisch erfasst.

Die Vermessung beruht dabei auf dem Prinzip, dass die Verschiebung von Oberflächenpunkten verfolgt wird.

Da Holz jedoch in Längsrichtung bis auf etwaige Äste oder sonstige Störungen im Holzgefüge wenig Kontrastpunkte aufweist, wurde ein regelmäßiges Punktmuster aufgebracht. Ziel war es, möglichst viele Punkte in regelmäßigem Abstand zu produzieren. Daher wurde ein Lochblech mit einem Lochdurchmesser von 5 mm und einem Lochabstand von 15 mm als Schablone für eine Lackierung angeschafft. Die Wahl der Farbe bzw. des Lackiersystems wurde durch einige Vorversuche bestimmt. Mit einer handelsüblichen Spraydose wurden die aufgesprühten Punkte am schärfsten. Als Farbton wurde schwarz gewählt.

Dieser Raster wurde auf einer Seite der Prüfkörper aufgesprüht. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde versucht, die Verformung der Holzoberfläche mithilfe des Kontrastes der Holzoberfläche zu verfolgen.

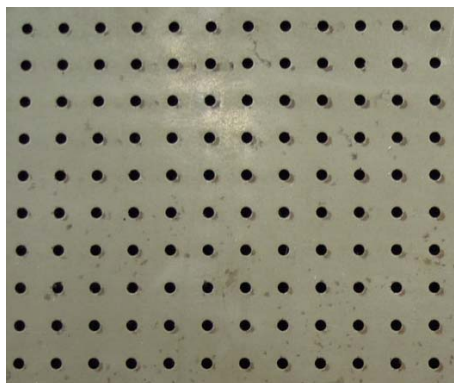


Abb. 1.30 Lochblech Rg 4,5-15 mm

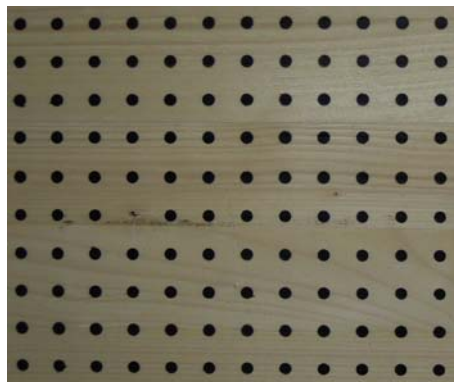


Abb. 1.31 aufgesprühter Raster am BSH-Prüfkörper

Jeder Punkt wird anschließend in einem Koordinatensystem erfasst und die Verformung der Punkte infolge des Schwindens von einem definierten Nullpunkt aus verfolgt. Durch die Verwendung von zwei Kameras in einer Stereo-Konfiguration (zwei Kameras sind in einem bestimmten Abstand zueinander angebracht und nehmen dasselbe Objekt aus zwei leicht unterschiedlichen Richtungen auf) ist auch die Bestimmung der 3D-Position der einzelnen Punkte möglich. Dadurch können auch ungleichmäßige Verformungen zufolge des Schwindens erfasst und deren Relativverschiebung für die Auswertung entsprechend korrigiert werden.

Die verwendeten Kameras (Allied Vision Prosilica GC 2450) weisen eine Auflösung von 2448 x 2050 Pixel auf. Dadurch kann pro Pixel eine Auflösung von 0,73 mm erreicht werden. Um den Abstand der Prüfkörper zu den Kameras möglichst gering zu halten, wurden Objektive mit einer kurzen Brennweite von 8 mm (Pentax CB14-5M 8mm, f 1:1,4) und entsprechend großem horizontalem Öffnungswinkel von 57° eingesetzt. Die auftretende Linsenverzerrung durch die perspektivischen Verzeichnungen werden durch eine Kalibrierung des Systems erfasst. Die Aufnahmen werden dann mit den ermittelten Korrekturen weiterverarbeitet. Bei der Erkennung des aufgesprühten Rasters wird mit einer Subpixelgenauigkeit von 0,33 Pixel gerechnet. Erfasst wird immer das Zentrum des jeweiligen Punktes.

Dadurch beträgt die zu erwartende Genauigkeit etwa 0,5 mm. Die Abweichung errechnet sich aus $2 \times \text{Subpixelgenauigkeit} \times 0,73 \text{ mm}$.

Zunächst musste jedoch noch ein geeigneter Rahmen zur Fotografie gefunden werden. Die Prüfkörper beanspruchten den gesamten Raum der Klimakammer, daher mussten die Prüfkörper regelmäßig aus der Klimakammer entnommen werden, um die Messung durchzuführen. Da die Platzverhältnisse vor der Klimakammer ungünstig waren, wurde ein mobiler Rahmen zur Fotografie gewählt. Der erforderliche Abstand der Kameras zu den Prüfkörpern beträgt 1,70 m. Die Prüfkörper selbst sollten sich immer in gleicher Position zu den Kameras befinden. Um die Prüfkörper zu fotografieren, wurde ein System zum Einhängen der Prüfkörper entwickelt. Dabei wurden an den beiden Hirnholzflächen Sechskant-Holzschrauben mit Durchmesser 12 mm eingedreht, wobei der Kopf nicht versenkt wurde. Die beiden Schrauben stellten die Aufhängepunkte der Prüfkörper dar. Der Rahmen wurde aus Aluminium-Profilen hergestellt. Sie weisen eine hohe Steifigkeit auf.

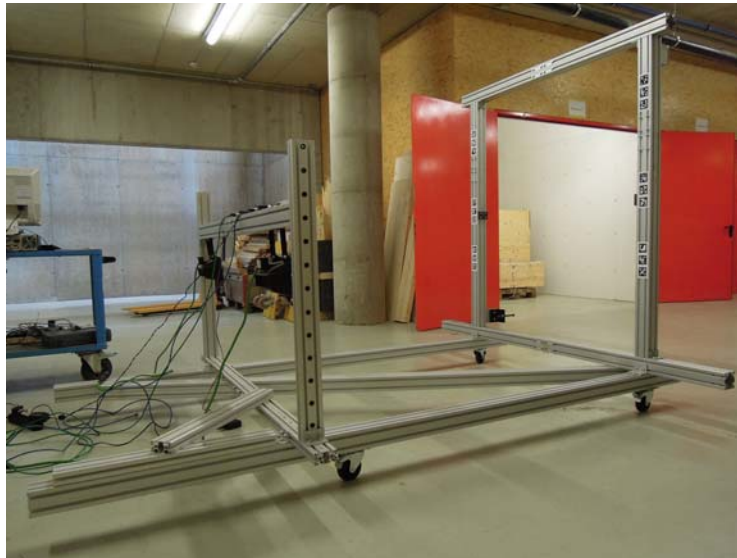


Abb. 1.32 Rahmen zur Fotografie

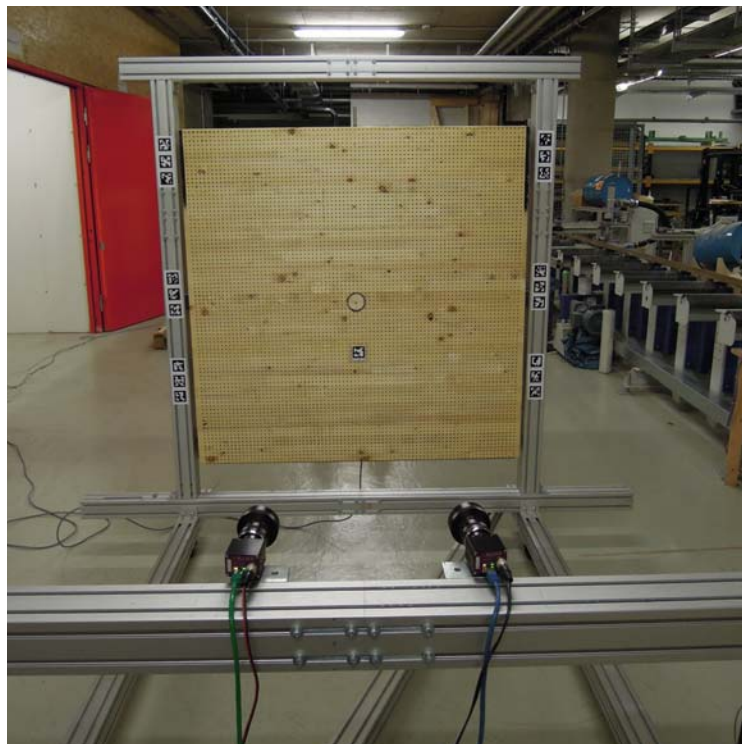


Abb. 1.33 eingehängter Prüfkörper

1. 5 Messung der Holzfeuchte

Die Messung der Holzfeuchte stellte eine weitere Herausforderung im Rahmen der Projektbearbeitung dar. So musste die Holzfeuchte über den gesamten Querschnitt über eine längere Zeit aufgenommen werden. In Abschnitt 1. 5 des Kapitels 2 wurde kurz auf die gängigen Messverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte eingegangen. Diese konnten jedoch nur bedingt bzw. in abgewandelter Form angewandt werden.

Folgende Messverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte kamen zum Einsatz:

- Darrmethode (direkt)
- kapazitives Messverfahren (indirekt)
- Widerstands-Messverfahren (indirekt)

Durch die Verwendung von mehreren Messverfahren können diese miteinander verglichen und etwaige Abweichungen schneller gefunden werden. Diese Arbeit war also indirekt auch ein Test der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte.

1. 5. 1 Darrmethode

Die Darrmethode gilt als die exakteste Methode zur Bestimmung der Holzfeuchte und liefert die verlässlichsten Ergebnisse. Jedoch bringt sie den großen Nachteil mit sich, dass sie eine „zerstörende“ Methode zur Feuchtebestimmung ist. Bei Prüfungen, wo der Holzbauteil ohnehin zerstört wird, wie etwa bei einer Biegeprüfung oder Ausziehversuchen von Schrauben spielt dies keine sehr große Rolle. Da bei den Langzeitversuchen die Prüfkörper jedoch über längere Zeit erhalten bleiben müssen, musste eine Sonderlösung gefunden werden.

Eine Entnahme von Darrproben mittels Stichsäge oder anderen Schnittwerkzeugen kam durch die Abmessungen der Probekörper nicht infrage. Als Alternative wurden drei Verfahren auf Ihre Eignung untersucht:

- Entnahme einer Darrprobe mittels Zapfenbohrer
- Entnahme einer Darrprobe mittels Zuwachsbohrer
- Entnahme einer Darrprobe in Form von Spänen mittels Forstnerbohrer

Die unterschiedlichen Bohrsysteme sind in Abb. 1.34 dargestellt.

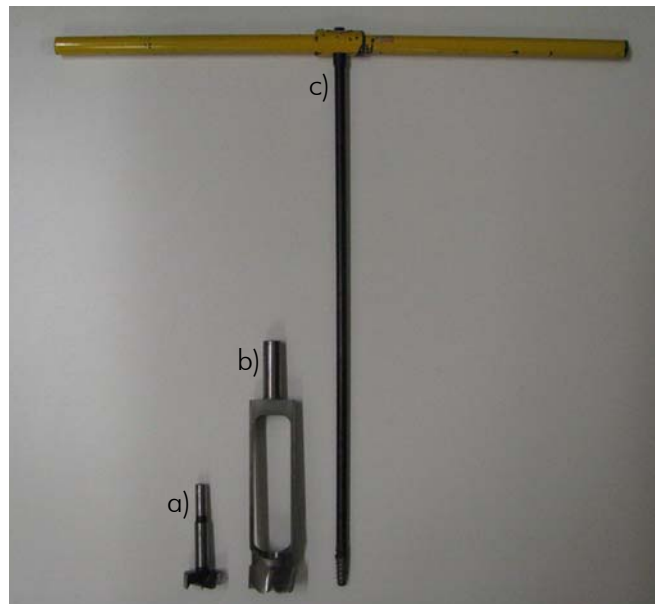


Abb. 1.34 unterschiedliche Bohrsysteme
a) Forstnerbohrer
b) Zapfenbohrer
c) Zuwachsbohrer



Abb. 1.35 Bohrkronen des Zuwachsbohrers

Der Zuwachsbohrer wird im Allgemeinen in der Forstwirtschaft verwendet. Er dient zur Entnahme einer Probe am lebenden Baum. Dadurch kann die Zuwachsrate bzw. das Alter des Baumes bestimmt werden. Die Probe hat einen Durchmesser von 5 mm. Die Verwendung des Zuwachsbohrers konnte jedoch durch Vorversuche bereits ausgeschlossen werden. Das Gewicht der entnommenen Probe war zu gering, sodass sich bei einer geringen Abweichung bei der Wiegung der Holzfeuchtegehalt bereits dramatisch veränderte.

Der Forstnerbohrer mit einem Durchmesser von 30 mm weist denselben Durchmesser auf, wie der Innendurchmesser des Zapfenbohrers. Somit war ein direkter Vergleich der beiden Bohrsysteme möglich.

Bekanntlich entsteht bei jeder Bohrung durch Reibung Wärme. Ob diese Wärmeentwicklung einen Einfluss auf die entnommene Darrprobe hat, wurde in Vorversuchen ermittelt.

Dafür wurden aus einem bei Normklima gelagerten Probekörper jeweils 10 Darrproben entnommen. Unmittelbar neben den Entnahmestellen von Forstnerbohrer und Zapfenbohrer wurden „traditionelle“ Darrproben mit der Formatkreissäge entnommen.

Die Späne, die durch den Forstnerbohrer gewonnen wurden, wurden sorgfältig in Behältern gesammelt und gewogen. Anschließend kamen alle Proben in den Darrschrank und wurden bei einer Temperatur von $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet.

Die Ergebnisse der Vorversuche können Tab. 1.3 entnommen werden.

Art der Probe	Mittelwert der Holzfeuchte aus zehn Proben [%]
Darrprobe	12,0
Späne	12,2
Kernbohrung	12,1

Tab. 1.3 Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Entnahme von Darrproben

Man erkennt, dass die Wärmeentwicklung offensichtlich nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Holzfeuchtemessung der Darrproben zu haben scheint.

Allerdings kam es bei einer Darrprobe der Späne zu einer Abweichung der Holzfeuchte von 3 %. Es dürfte zu einem Verlust der Späne nach dem Trocknen gekommen sein. Dieser „Ausreißer“ wurde bei der Bildung des Mittelwertes nicht berücksichtigt. Dies war auch mit ein Grund, warum dieses Verfahren nicht weiter verwendet wurde. Ein weiterer Grund war die Aufteilung der Proben über den Querschnitt, was bei dem Bohrkern des Zapfenbohrers wesentlich leichter und fehlerfreier möglich war.

Somit hat sich die Probenentnahme für Darrproben mittels Zapfenbohrer als am praktikabelsten erwiesen.

Die Tauglichkeit des Verfahrens wurde anschließend noch an Probekörpern mit einer Holzfeuchte $u = 15 \text{ } \%$ überprüft. Auch hier kam es zu keiner nennenswerten Abweichung.



Abb. 1.36 Darrprobe entnommen mittels Zapfenbohrer

Bei der Entnahme der Darrprobe kommt es zu einer Störung im Holz. Bekanntlich nimmt das Holz über die Hirnholzfläche längs zur Faser schneller Feuchtigkeit auf, als normal zur Faser. Durch die Bohrung werden aber Flächen längs und quer zur Faser freigelegt. Dies hätte zur Folge, dass im Bereich der Darrprobenentnahme, die Feuchtigkeit schneller austreten würde als beim ungestörten Querschnitt. Daher wurden diese Flächen mit handelsüblichen transparenten Silikon, welches auch bei der Hinholzversiegelung zum Einsatz kam, versiegelt.

Die entnommene Darrprobe am Prüfkörper hat eine Länge von $l = 160$ mm. Um den Verlauf der Holzfeuchtigkeit u über den Querschnitt abbilden zu können, wurde die Darrprobe in je 5 gleich große Abschnitte mit einer Länge von $l = 30$ mm zersägt. Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgt dann für jeden Abschnitt. Dadurch konnte die mittlere Feuchte in den Tiefen 20 mm, 50 mm und 80 mm ermittelt werden.

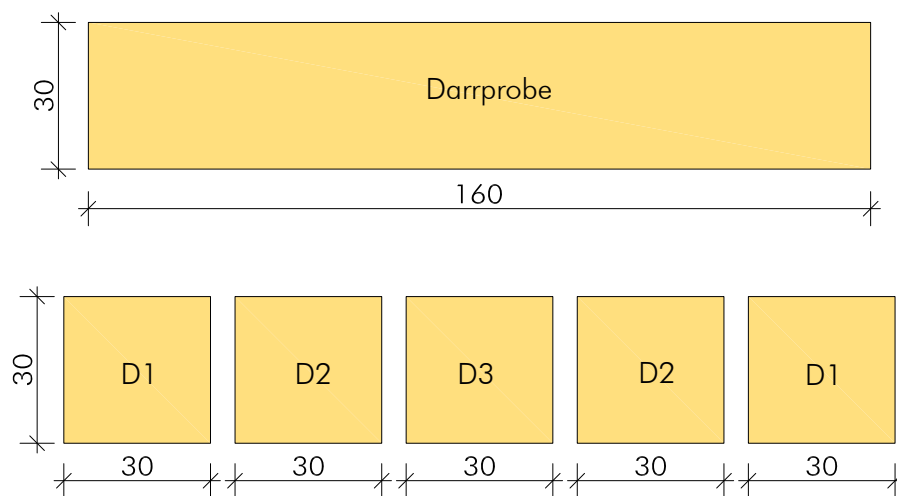


Abb. 1.37 Aufteilung der Darrprobe über den Querschnitt [mm]

1. 5. 2 kapazitives Messverfahren

Beim kapazitiven Messverfahren wurde die Holzfeuchte an der Oberfläche gemessen. Verwendet wurde der Materialfeuchtegeber FHA 696 MF der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik. Laut Hersteller beträgt die Eindringtiefe des Materialfeuchtegebers ca. 25 mm, wobei auch die Feuchtigkeit in tiefer liegenden Schichten erfasst werden kann. Da beim kapazitiven Messverfahren im Allgemeinen größere Abweichungen als beim Widerstandsmessverfahren auftreten können, wurden vorbeugend einige Maßnahmen getroffen.

So wurden an den Flanken des Materialfeuchtegeber Acrylglasplättchen aufgeklebt. Sie sollten sicherstellen, dass die Messung immer mit demselben Anpressdruck durchgeführt wird. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, musste der Materialfeuchtegeber kalibriert werden. Dafür wurden Probekörper aus Fichtenholz mit den Abmessungen 140 mm x 100 mm x 100 mm hergestellt. Diese wurden in einem Klimaschrank auf Ausgleichsfeuchten von 21 %, 18 %, 15 %, 12 % und 9 % gebracht. Da die kapazitive Messung auch von der Rohdichte abhängig ist, wurden die Probekörper mit möglichst unterschiedlicher Rohdichte ausgewählt, um so ein breites Spektrum abdecken zu können. Weiters wurden die Stellen an denen gemessen wurde markiert, sodass die Messungen immer an denselben Stellen erfolgten. Pro Messung wurde immer längs und quer zur Faser gemessen, somit konnte auch der Einfluss der Faserorientierung erfasst werden.



Abb. 1.38 Materialfeuchtegeber basierend auf kapazitiven Messverfahren

1. 5. 3 Widerstands-Messverfahren

Mithilfe dieses Messverfahrens sollte der Feuchteverlauf über den Holzquerschnitt ermittelt werden.

Zunächst wurde in Vorversuchen untersucht, ob Langzeitmessungen mit den bereits verwendeten GANN-Hydrometer möglich waren. Dabei wurden zunächst zwei Ansätze ausprobiert. Zum einen immer wieder dieselben Einschlaglöcher zu verwenden, zum anderen die eingeschlagenen Elektroden im Holz zu belassen. Beides brachte jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Für die kontinuierliche Messung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt musste daher ein anderes Verfahren gefunden werden.

Die Messung mittels Hydrometer wurde daher zu Vergleichszwecken lediglich 1x wöchentlich auf konventionelle Art durchgeführt. Das heißt, die Elektroden wurden eingeschlagen, es wurde gemessen und in der darauf folgenden Woche wurden erneut die Elektroden an einer benachbarten Stelle eingeschlagen und der Messvorgang erneut durchgeführt.

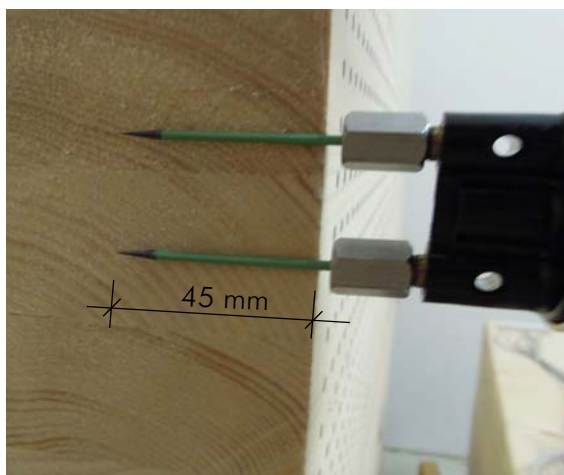


Abb. 1.39 Eindringtiefe der Elektroden

Die Einschlagtiefe betrug ca. 45 mm. Somit konnte die Holzfeuchte in einer Tiefe von 50 mm bis 60 mm erfasst werden.

Da die Temperatur in der Klimakammer auf konstant 20 °C gehalten wurde, konnten etwaige Einflüsse zufolge Temperaturschwankungen eliminiert werden.

Zur Erfassung der Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt fiel die Wahl aus Kostengründen auf ein von Brischke [10] entwickeltes Messsystem.

Die Messung basiert auf den bereits beschriebenen Widerstands-Messverfahren. Dabei wurden PVC-ummantelte Edelstahlkabel in das Holz geklebt. Die Edelstahlkabel wiesen einen Außendurchmesser von 2 mm und einen Edelstahlquerschnitt von 1,25 mm auf. Die Wahl fiel auf Edelstahl, um einer möglichen Korrosion und somit einer damit verbundenen Abweichung der Ergebnisse vorzubeugen. Die Löcher für die Seile wurden mit einem Durchmesser von 4 mm vorgebohrt. Die Tiefe richtete sich nach der zu messenden Schicht. Der Abstand der Bohrung wurde mit 30 mm parallel und 6 mm quer zur Faser übernommen. Als Grund für den Versatz von 6 mm quer zur Faser nennt Brischke [10] eine mögliche Rissbildung.

Als Kleber wurde 2-K Epoxidharz verwendet, der jedoch modifiziert wurde. Um den Kleber leitfähig zu machen, wurde Graphitpulver für die „Leitpaste“ beigemischt. Um eine feuchteisolierende Ummantelung zu erhalten wurde Weizenmehl beigemischt. Die Mischungsverhältnisse sind in Tab. 1.4 und Tab. 1.5 angeführt.

- leitende Paste, Mischungsverhältnis für 100 g:

Epoxidharz L, Conrad, Art. Nr.: 236349-62	19,2 g
Härter L, Conrad, Art. Nr.: 236357-62	5,8 g
Ethanol	40,0 g
Graphitpulver, Körnung < 50 µm	35,0 g

Tab. 1.4 Zusammensetzung der leitenden Paste [10]

- isolierende Paste, Mischungsverhältnis für 100 g:

Epoxidharz L, Conrad, Art. Nr.: 236349-62	58,8 g
Härter L, Conrad, Art. Nr.: 236357-62	17,7 g
Weizenmehl	23,5 g

Tab. 1.5 Zusammensetzung der isolierenden Paste [10]

Nach Bohrung der Löcher wurden 0,2 ml der leitenden Paste mit einer Injektionspritze injiziert. Die Edelstahlkabel wurden mit einer Länge von 1,5 m abgelängt und an den Enden auf einer Länge von 5 mm abisoliert. Die Kabel wurden dann sofort in die leitende Paste gedrückt. Die isolierende Paste wurde nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden nachinjiziert.

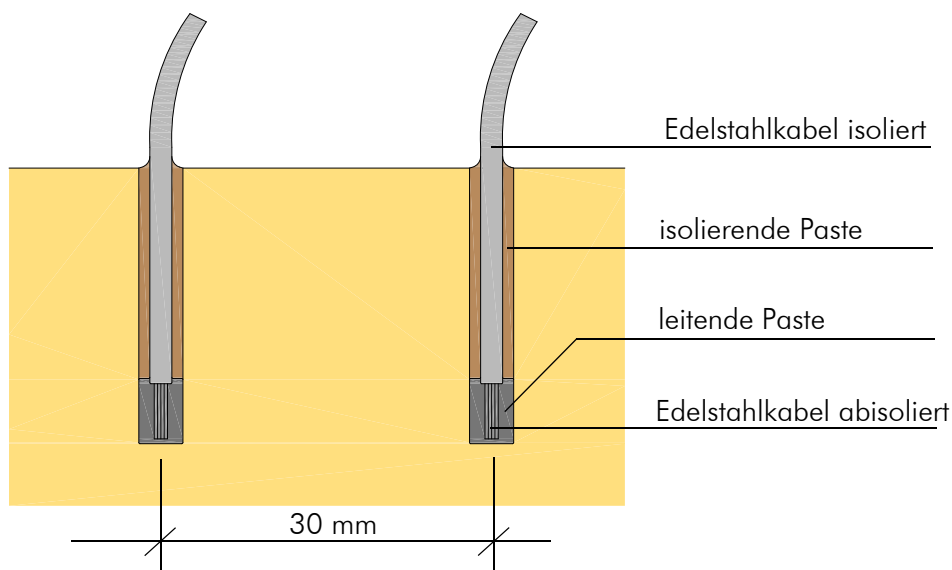


Abb. 1.40 hergestellte Elektroden (nach Brischke [10])

Da keine geeigneten Datenlogger zur Verfügung standen, musste ein anderer Weg gefunden werden. Die Lösung bestand in der Anwendung eines Multimeters, welches in der Lage ist elektr. Widerstände zu messen. Um die Widerstände vergleichbar messen zu können, wurden die Enden der Edelstahlkabel wieder abisoliert und an Lüsterklemmen angeschlossen. Die Messung erfolgte dann immer mit dem Kontakt der Elektroden des Multimeters auf den Lüsterklemmen.

Bei den Prüfkörpern wurden die Edelstahlkabel in einer Tiefe von 20 mm, 50 mm und 80 mm eingeklebt. Pro Prüfkörper wurden zwei der in Abb. 1.41 dargestellten Messstellen installiert.

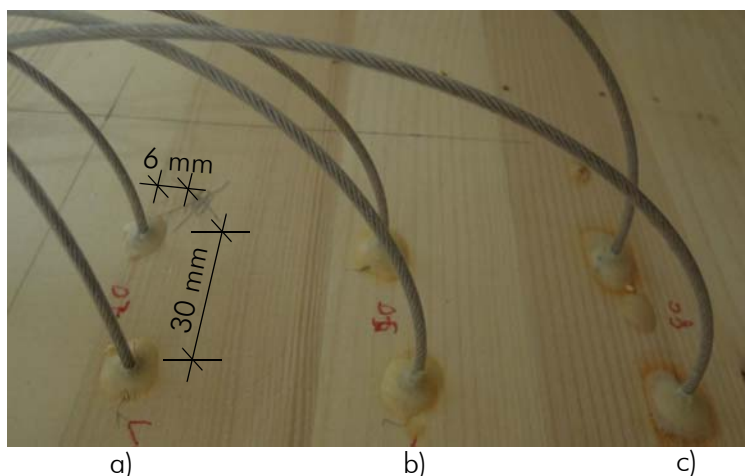


Abb. 1.41 Anordnung der Elektroden: a) 80 mm, b) 50 mm, c) 20 mm

Die insgesamt sechs Messstellen wurden dann zu einer Lüsterklemmenreihe zusammengeführt. Die Edelstahlkabel wurden alle mit derselben Länge von 1,50 m abgelängt. Dadurch ist der Eigenwiderstand aller Kabel gleich groß. Dieser blieb im Vergleich zu den gemessenen Widerständen im Holz jedoch vernachlässigbar klein.

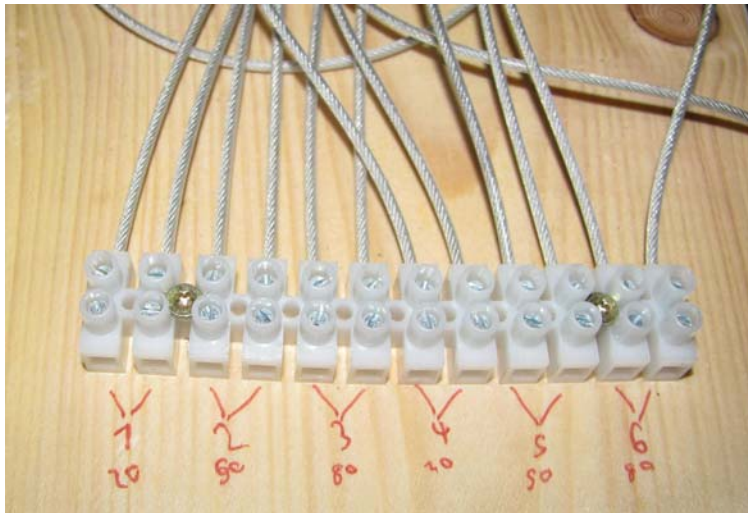


Abb. 1.42 Lüsterklemmen

Um das Messsystem zu kalibrieren, mussten die Widerstände bei bekannten Holzfeuchten ermittelt werden. Dafür wurden Kalibrierungskörper hergestellt. Der Querschnitt betrug 25 mm x 50 mm mit einer Länge von 500 mm (Abb. 1.43). Die Kalibrierungskörper wurden bei einer Umgebungstemperatur von 20°C und unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gelagert. Nach Erreichen der jeweiligen Ausgleichsfeuchte wurde eine Darrprobe entnommen und somit die Holzfeuchte u bestimmt.



Abb. 1.43 Kalibrierungskörper

2 Versuchsdurchführung

Nachdem alle notwendigen Messsysteme fertiggestellt und kalibriert waren, musste nun noch festgelegt werden, an welchen Prüfkörpern die Messungen erfolgen, und wann diese Messungen zu erfolgen haben.

Nicht an allen Prüfkörpern wurden sämtliche vorgestellten Messungen durchgeführt. Der erforderliche Aufwand zur Installation und Durchführung der Messungen wäre zu groß gewesen.

Folgende Messungen wurden an allen Prüfkörpern durchgeführt

- Messung der Spannungen in den Schraubstangen (sofern vorhanden),
- Oberflächenmessung mittels Fotogrammetrie.

Folgende Messungen wurden nur an ausgewählten Prüfkörpern in Tab. 2.1 durchgeführt

- Feuchtemessungen,
- Oberflächenmessung mittels Messschieber.

Prüfkörper	b	h	Schraubstange
1	1280	1280	ja
4	1280	1280	nein
5	1280	800	ja
6	1280	400	ja
9	640	1280	ja
10	640	1280	nein
11	640	800	ja
12	640	400	ja

Tab. 2.1 verwendete Prüfkörper zur Feuchtemessung und Oberflächenmessung mittels Messschieber

Die Feuchtemessungen wurden nur an Prüfkörpern der Gruppe 1 (1280 mm) und 2 (640 mm) durchgeführt. Eine Ausnahme waren die entnommenen Darrproben, welche auch jeweils an einem Prüfkörper der Gruppe 3 und 4 bestimmt wurden. Die Darrproben wurden aus den Referenz Prüfkörpern ohne Schraubstange entnommen.

Die Messungen erfolgten nach einem definierten Messplan. Die Zeitpunkte der jeweiligen Messungen wurden abgeschätzt und konnten je nach Erfordernis im zeitlichen Verlauf abgeändert werden.

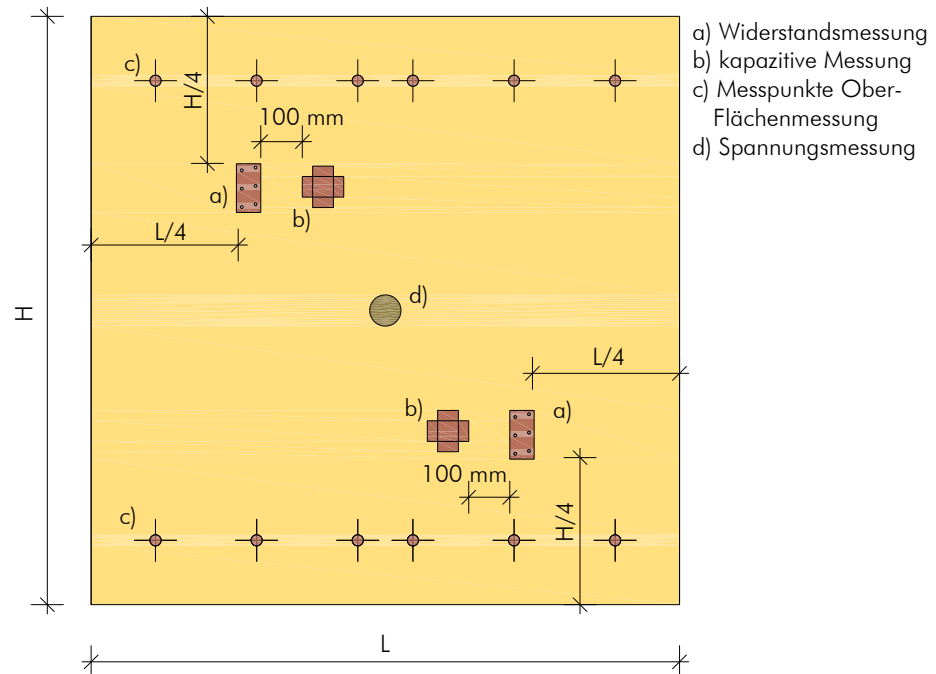
Messplan						
	Feuchtemessung				Oberflächenmessung	
	Widerstand	kapazitiv	Hydrometer	Darrprobe	Fotogrammetrie	Messschieber
Mo.	X	X	X	X	X	X
Di.						
Mi.						
Do.	X	X	X			
Fr.						
Sa.						
So.						
Mo.	X	X	X		X	X
Di.						
Mi.						
Do.	X	X	X			
Fr.						
Sa.						
So.						
Mo.	X	X	X	X	X	X

Tab. 2.2 Messplan für ein 14-Tage Intervall

Da sich die Holzfeuchte an der Oberfläche in den ersten Tagen sehr rasch änderte, wurden die kapazitiven- und Widerstands-Feuchtemessungen in den ersten Wochen zunächst täglich durchgeführt.

Die Anordnung der Messtellen auf den Prüfkörpern erfolgte nach Abb. 2.1.

- mit Schraubstange:



- ohne Schraubstange:

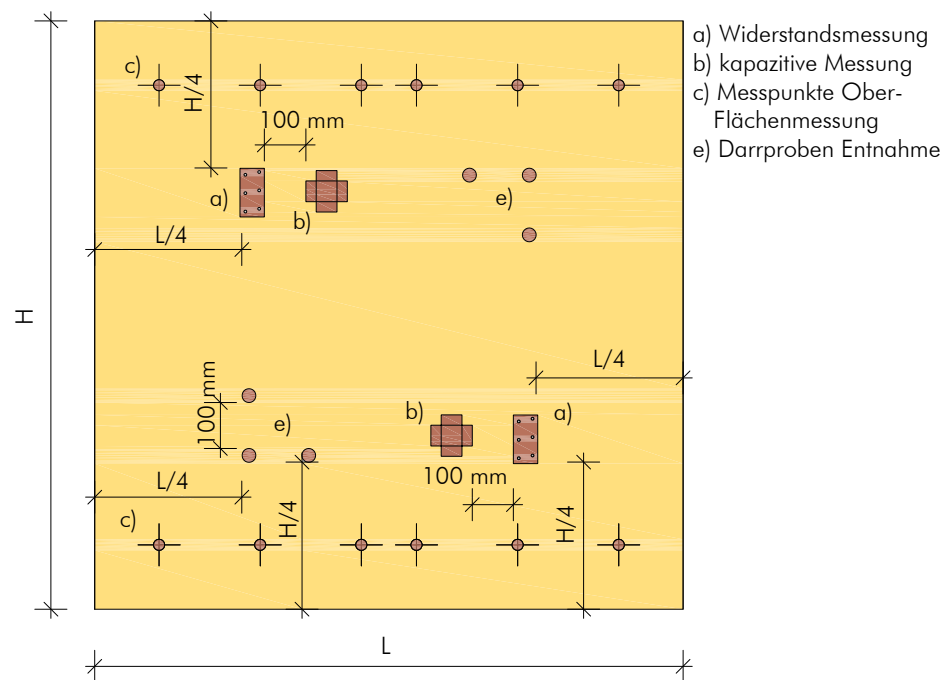


Abb. 2.1 Anordnung der Messungen an den Prüfkörpern

Um einen möglichen Einfluss der Hirnholz- und Schmalflächen der Prüfkörper ausschließen zu können, wurden die Feuchtemessungen basierend auf dem elektrischen Widerstand im Abstand $L/4$ bzw. mit $H/4$ von den Randbereichen angeordnet. Die kapazitive Feuchtemessung erfolgte in einem Abstand von 100 mm zur Widerstandsmessung. Die wöchentliche Feuchtemessung mit dem GANN-Hydrometer wurde in unmittelbarer Nähe der Widerstandsmessung durchgeführt. Darrproben, welche nur an Prüfkörpern ohne Schraubstangen (Nr. 4, 10, 16 und 22) bestimmt wurden, wurden in den gegenüberliegenden Ecken entnommen.

Mit der Aufzeichnung der Messdaten wurde am 20. Februar 2012 begonnen.

Die Temperatur von 20 °C wurde konstant gehalten, die relative Luftfeuchtigkeit wurde von 90 % auf 40 % gesenkt. Um diese Luftfeuchtigkeit schnellstmöglich zu erreichen, wurde zusätzlich ein Luftentfeuchter in der Klimakammer installiert.

Auswertung der Versuche

1 Versuchsauswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen geschildert.

Zunächst stellte sich die Frage für welchen Zeitraum es sinnvoll ist Messungen durchzuführen, um zu praxisnahen Aussagen zu kommen.

In Abb. 1.1 ist die mittlere Temperatur und rel. Luftfeuchte pro Monat für den Raum Graz dargestellt. Die Daten wurden von der ZAMG [35] übernommen. Wobei sich die Werte auf die Mittelwerte der letzten zehn Jahre beziehen. Daraus wird ersichtlich, dass ein enger Zusammenhang zwischen rel. Luftfeuchte und Temperatur besteht. Fällt die Temperatur, so steigt die rel. Luftfeuchte an, steigt die Temperatur so kann die erwärmte Luft mehr Feuchtigkeit speichern und die rel. Luftfeuchte fällt ab.

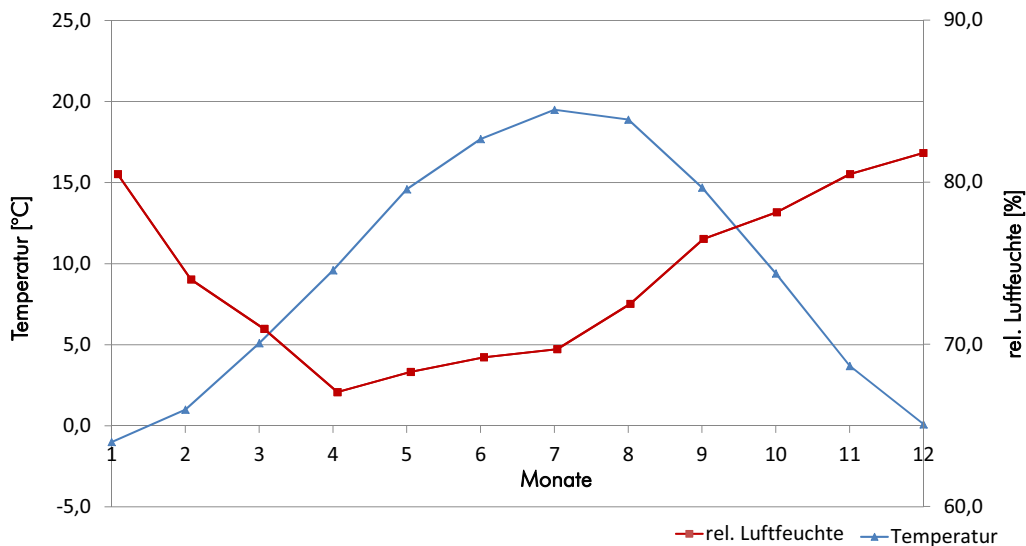


Abb. 1.1 Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte für den Raum Graz (Klimadaten von 2001-2011)

Bringt man diese Klimadaten nun in Zusammenhang mit der Holzfeuchte u , so ergibt sich näherungsweise der in Abb. 1.2. dargestellte Verlauf für eine Dauer von zwei Jahren. Zur Darstellung wurde näherungsweise das Diagramm von Loughborough [12] aus Kapitel 2 verwendet. Die rel. Luftfeuchte liegt im Bereich zwischen $\sim 65\%$ und $\sim 85\%$. Der Verlauf gilt für den Außenbereich. Zu beachten ist, dass im Inneren von Gebäuden die rel. Luftfeuchte auch unter 35% fallen kann.

Die zu erwartende Holzgleichsfeuchte u liegt somit zwischen 13% und $16,5\%$. In den Monaten April bis Juli ist der Verlauf der Holzfeuchte annähernd konstant.

Der dargestellte Verlauf gilt jedoch nur für eine kleine Holzprobe. Wie aus Kapitel 2 bekannt ist, erfolgt die Änderung der Holzfeuchte entsprechend dem 2. Fick'schen Gesetz zeitverzögert.

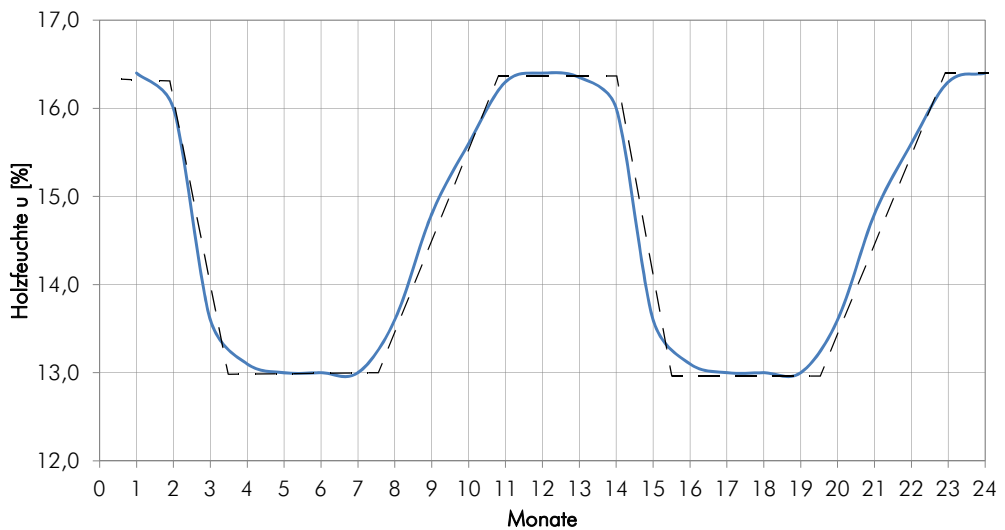


Abb. 1.2 zu erwartende Holzgleichsfeuchten u_{gI} in Graz (Näherung)

Dieser trapezförmige Verlauf der Holzfeuchte deckt sich auch mit den Messergebnissen von Fragiaco [30]. In dieser Veröffentlichung wurde unter anderem die Holzfeuchte über einen Zeitraum von drei Jahren in den Städten Lissabon, Warschau und Rovaniemi (Lapland) erfasst.

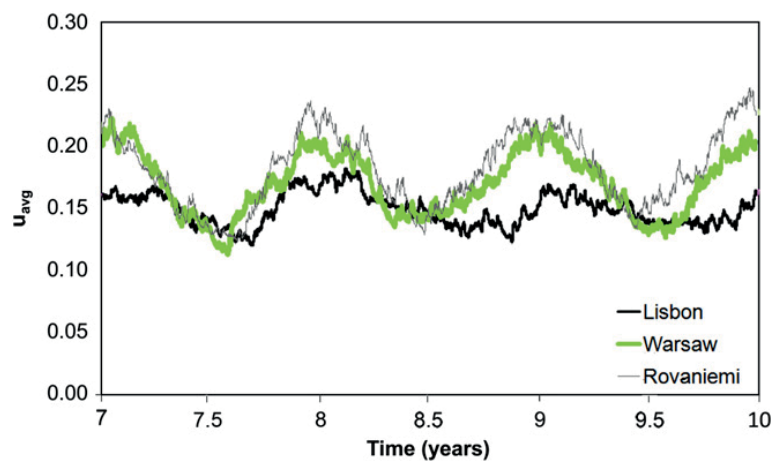


Abb. 1.3 mittlere Holzfeuchten über einen Zeitraum von drei Jahren zufolge des Umgebungsklimas in den Städten Lissabon, Warschau und Rovaniemi (Lapland) [30]

Um aussagekräftige Ergebnisse zum Verhalten der Prüfkörper zu generieren, wurde aufgrund der dargestellten Holzfeuchten die Dauer der Versuche für eine erste Auswertung auf **drei Monaten** festgelegt. Die Versuche werden aber auch nach dem Zeitraum von drei Monaten weitergeführt, um weitere Erfahrungen zu sammeln.

Mit Änderung der relativen Luftfeuchte von rund 90 % auf 40 % wurde ein Schwinden des Holzes eingeleitet. Die zu erwartende Holzgleichsfeuchte u_{gl} bei 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchte liegt bei rund 10 %. Sämtliche Messungen wurden nach dem Messplan aus Kapitel 3 durchgeführt.

Zunächst soll in Abschnitt 1. 2 dieses Kapitels auf die Feuchteänderungen im Holz eingegangen werden. Dabei werden auch die angewandten Messverfahren miteinander verglichen.

Aus den Feuchteänderungen resultiert ein Schwinden der Prüfkörper. Die Messergebnisse der Schwindverformungen werden in Abschnitt 1. 3 vorgestellt.

Das Schwinden führte letztendlich zu Spannungen bzw. Kräften im Holz und in den Schraubstangen. Diese werden in Abschnitt 1. 4 erläutert.

Der Zusammenhang der Feuchteänderung und den entstehenden Kräften in den Schraubstangen wird in Abschnitt 1. 5 hergestellt.

1.1 Klima

Das Klima in der Klimakammer wurde am 20.02. 2012 (Tag 0) umgestellt. Das gewünschte Umgebungsklima stellte sich jedoch aufgrund der Trägheit des Systemes erst nach rund zehn Tagen ein. Der Verlauf des Klimas über den Messzeitraum ist Abb. 1.4 zu entnehmen.

Die relative Luftfeuchte nach zehn Tagen betrug im Mittel 41,3 % und der Mittelwert der Temperatur lag bei 20,3 °C. Eine geringere Luftfeuchte konnte sich trotz eines zusätzlich in Betrieb genommenen Luftentfeuchters in der Klimakammer nicht einstellen. Die geringen Abweichungen der relativen Luftfeuchte resultieren aus Schwankungen in der Umgebungstemperatur. Die verwendete Klimakammer basiert auf dem Prinzip der Konvektionstrocknung, d. h. die Luft wird zunächst erwärmt, wodurch sie mehr Feuchte aufnehmen kann. Durch eine anschließende Absenkung der Temperatur kondensiert die feuchte Luft und das entstehende Kondenswasser kann aus der Klimakammer abgeführt werden. Größere zeitlich begrenzte Abweichungen der relativen Luftfeuchte entstanden durch Öffnen der Klimakammer, z. B. bei der Oberflächenmessung.

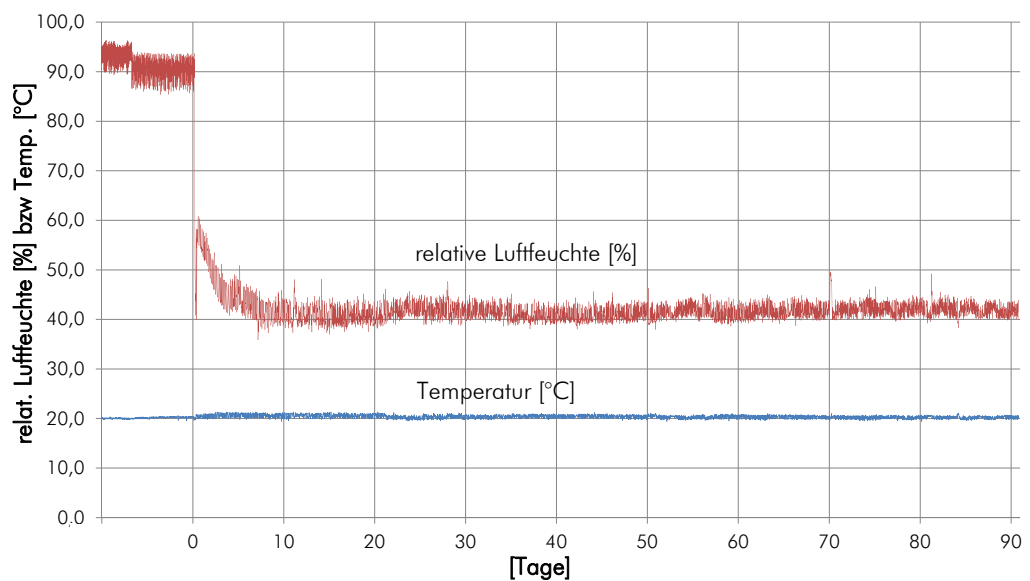


Abb. 1.4 zeitlicher Verlauf des Klimas in der Klimakammer über den Versuchszeitraum

1.2 Ergebnisse der Feuchtemessungen

Bei der Feuchtemessung wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, mehrere Verfahren verwendet. Die Ergebnisse sollen zunächst einzeln dargestellt werden. Anschließend werden sie in Abschnitt 1. 2. 5 miteinander verglichen und auf Ihre Eignung bzw. Plausibilität überprüft.

1. 2. 1 Darrproben

Darrproben wurden laut Messplan in einem zeitlichen Abstand von 14 Tagen entnommen. Abb. 1.5 zeigt den Verlauf des Feuchtegradienten über den Querschnitt. Die mittlere Feuchte der Darrproben wurden wie bei der Widerstandsmessung in einer Tiefe von 20 mm, 50 mm und 80 mm ermittelt. Die Holzfeuchten der Darrproben wurden aus den Resultaten der Prüfkörper 4 und 10 gemittelt.

Bei der ersten Darrprobe vor Umstellung des Klimas am 20.02. 2012 (Tag 0) zeigte sich ein leichter Abfall der Holzfeuchte zum Kern hin. Der Unterschied beträgt lediglich 0,7 %. Dieser Umstand deutet jedoch darauf hin, dass selbst nach 18 Monaten Lagerung die Holzgleichsfeuchte u_{gl} im Kern nicht erreicht wurde. Nach 14 Messtagen stellte sich bereits ein deutlicher Abfall der Holzfeuchte u ein. Der Verlauf des Feuchtegradienten über den Querschnitt blieb bei den weiteren Messungen sehr ähnlich. Die Werte der Holzfeuchten verschoben sich durch die Trocknung im Verlauf der Messung gleichmäßig in Richtung der zu erwartenden Holzgleichsfeuchte $u_{gl}=10\%$.

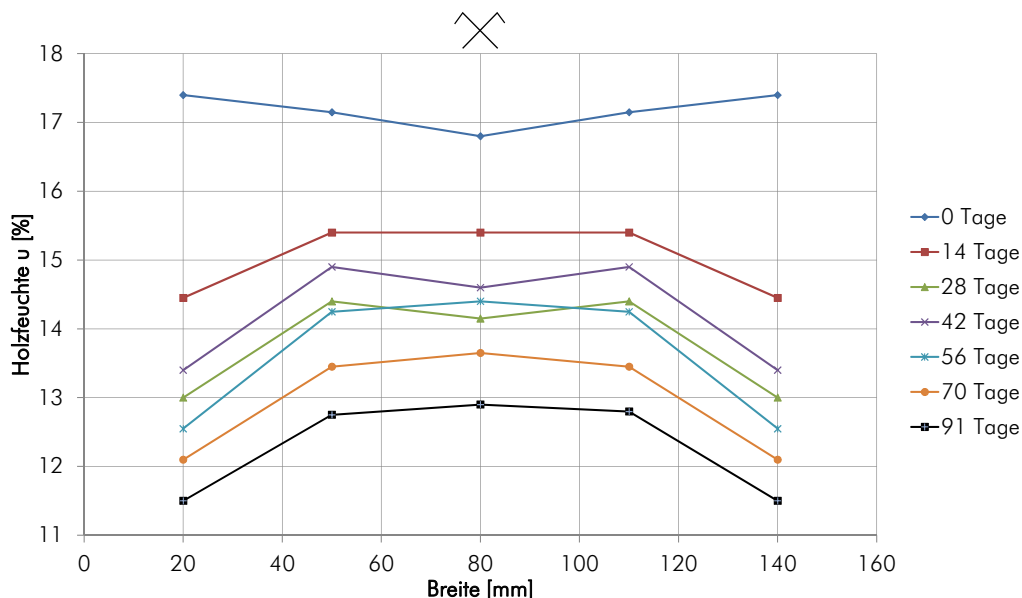


Abb. 1.5 Verlauf der Holzfeuchte u über den Querschnitt ermittelt aus den Darrproben

Auffällig ist, dass die Holzfeuchte der Darrproben in 50 mm und 80 mm Tiefe nur geringfügig voneinander abweichen.

1. 2. 2 Widerstands-Messverfahren

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der Feuchtemessung nach dem Prinzip des elektrischen Widerstandes eingegangen.

Die Kalibrierung erfolgte mit den in Kapitel 3 beschriebenen Leisten. Die Messwerte der Widerstände lagen für einen Bereich der Holzfeuchte u von 7 % bis 19 % vor. Aus den Ergebnissen der Kalibrierung wurde anschließend mithilfe einer Curve-Fitting-Software eine Regressionskurve ermittelt. Die bestangepasste Regressionskurve folgt folgender mathematischer Funktion:

$$u = \left(\frac{\ln(W) - a}{b} \right)^{1/3} \quad (1.1)$$

Wobei:	u	...Holzfeuchte u [%]
	W	...elektrischer Widerstand [$M\Omega$]
	a	...8,425 empirisch ermittelter Wert
	b	...-0,0010059 empirisch ermittelter Wert

Der Verlauf der Regressionskurve ist in Abb. 1.6 dargestellt.

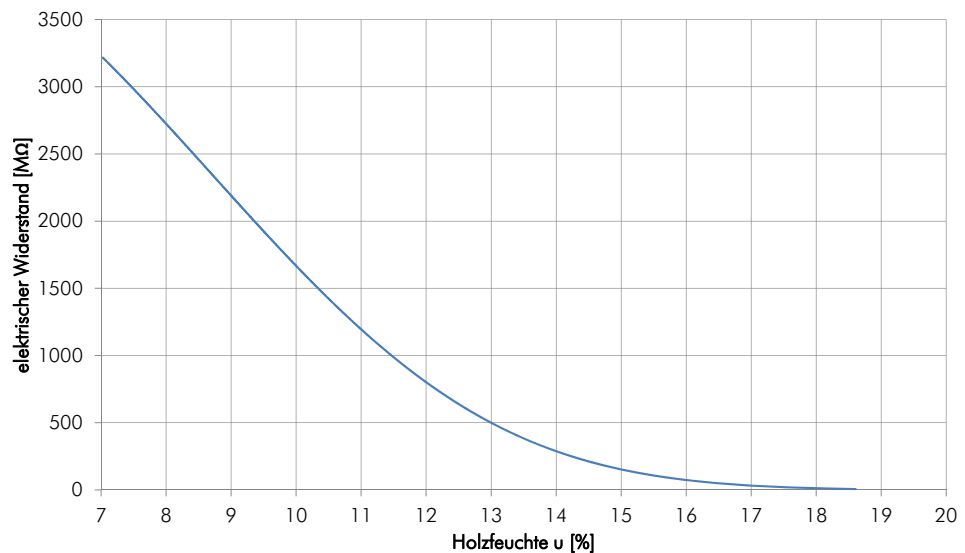


Abb. 1.6 Zusammenhang der Holzfeuchte und des elektrischen Widerstandes

Mithilfe dieser Funktion konnte in weiter Folge der elektrische Widerstand in die entsprechende Holzfeuchte u umgerechnet werden.

Die Messstelle 5_1 lag direkt in einem Ast und lieferte aus diesem Grund stark schwankende Ergebnisse. Sie wurde daher nicht in der weiteren Auswertung berücksichtigt. Abb. 1.7 zeigt den Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt. In Abb. 1.8. ist der Feuchteverlauf über die Zeit in den Tiefen 20 mm, 50 mm und 80 mm dargestellt. Auch hier konnte bei der Messung in 20 mm Tiefe, bereits nach kurzer Zeit ein deutlicher Abfall der Holzfeuchte beobachtet werden.

Um eine Anpassung an die Ergebnisse aus den Darrproben zu erreichen, wurde die Holzfeuchte aus dem Widerstands-Messverfahren um 1,5 % abgemindert.

Dadurch sinkt die Feuchte am Tag 0 zwar von 18,5 % auf 17,0 %, jedoch folgt die Regressionskurve dem Verlauf der Holzfeuchte der Darrproben aus Abschnitt 1. 2. 1 besser.

Nach Abschluss der Messung soll aus den Prüfkörpern der Bereich rund um die Widerstandsmessung entnommen werden und gesondert nachkalibriert werden, dann kann festgestellt werden, ob eventuell die Wuchs- bzw. Rohdichtemerkmale des umgebenden Holzes einen Einfluss auf die Messungen hatten.

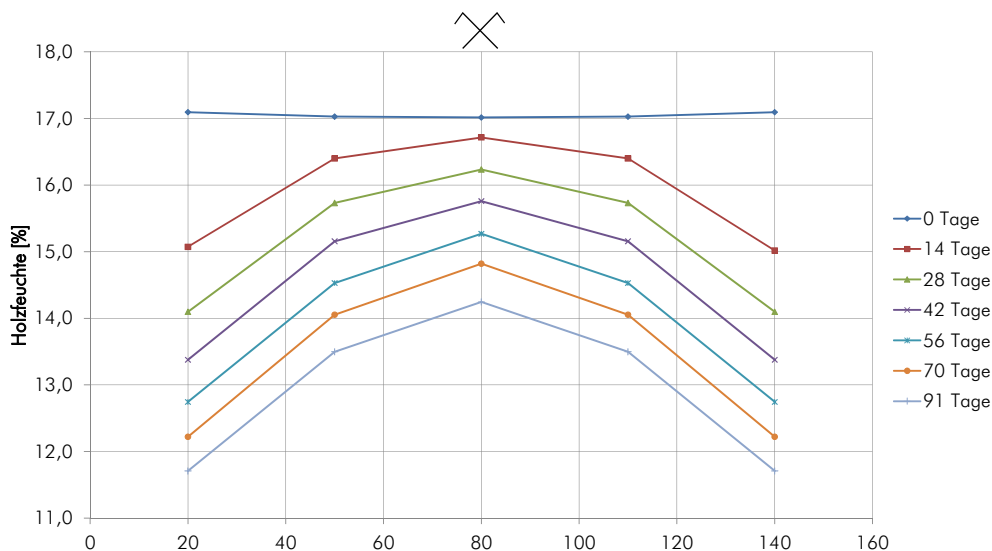


Abb. 1.7 Verlauf der Holzfeuchte zufolge elektr. Widerstandsmessung über den Querschnitt

Aus den Ergebnissen der elektr. Widerstandsmessung ist ablesbar, dass der Feuchtegradient über den Querschnitt ausgeprägter ist, als jener der Darrproben.

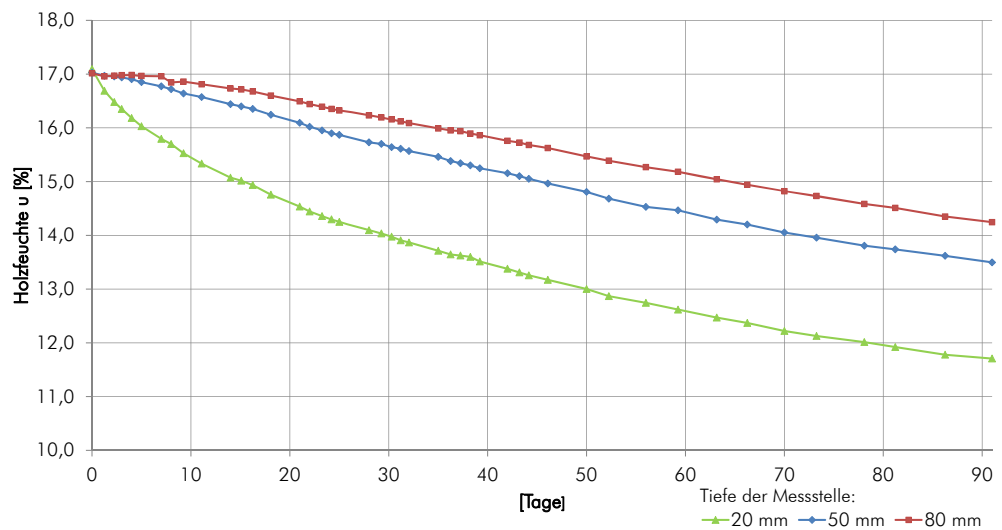


Abb. 1.8 zeitlicher Verlauf der Holzfeuchte u in den Tiefen 20 mm, 50 mm und 80 mm zufolge elektr. Widerstandsmessung

Aus Abb. 1.8 wird der zeitliche Verlauf der Holzfeuchte u in der jeweiligen Tiefe ersichtlich. In einer Tiefe von 20 mm änderte sich die Holzfeuchte erwartungsgemäß am Schnellsten, während sie in einer Tiefe von 80 mm in den ersten Tagen nahezu konstant blieb. Mit zunehmender Zeit flachte der Verlauf der Holzfeuchte in 20 mm Tiefe ab und verlief mit einem annähernd gleichem Gradienten wie die Messpunkte 50 mm und 80 mm.

1. 2. 3 kapazitives Messverfahren

Die Ergebnisse der Holzfeuchtemessung basierend auf dem kapazitiven Messverfahren sollen nachfolgend vorgestellt werden.

Die Eindringtiefe dieses Messverfahrens liegt lt. Hersteller bei rund 25 mm.

Zunächst wurde eine Kalibrierung bei unterschiedlichen Rohdichten und Holzfeuchten durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden insgesamt elf Kalibrierungskörper ($l \times b \times h = 140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) mit unterschiedlicher Rohdichte ($340\text{-}540 \text{ kg/m}^3$) hergestellt, welche anschließend bei unterschiedlichen Klimabedingungen bis zum Erreichen der jeweiligen Holzgleichsfeuchten gelagert wurden. An jedem Kalibrierungskörper wurde parallel und quer zur Faser die elektrische Spannung [V] gemessen, welche unmittelbar mit der Holzfeuchte anstieg. Anhand der Messdaten wurden mithilfe einer Curve-Fitting-Software die entsprechenden Regressionskurven ermittelt. Ein geringer Einfluss der unterschiedlichen Rohdichte auf die Messungen war vorhanden, da die mittlere Rohdichte der Kalibrierungskörper in etwa jener der Prüfkörper ($\rho = 435 \text{ kg/m}^3$) entsprach, konnte auf eine Rohdichte-Korrektur jedoch verzichtet werden. Der Zusammenhang der elektrischen Spannung und der Holzfeuchte für die Messung parallel und quer zur Faserrichtung ist in Abb. 1.9 dargestellt. Der Verlauf der Regressionskurven lässt sich anhand der folgenden Gleichung und den entsprechenden Parametern aus Tab. 1.1 beschreiben.

$$u = A \cdot V^2 + B \cdot V + C \quad (1.2)$$

Wobei: u ...Holzfeuchte u [%]
 V ...elektrische Spannung [V]
 A, B, C ...empirisch ermittelte Werte lt. Tab. 1.1

Richtung zur Faser	A	B	C
parallel	-704,6	394,34	-26,789
normal	-584,16	353,79	-22,058
Mittelwert	-609,86	363,19	-23,583

Tab. 1.1 Parameter zu Glg. 1.2

Die elektrische Spannung parallel zur Faserrichtung bei gleicher Holzfeuchte ist tendenziell höher als jene quer zur Faserrichtung. An den Prüfkörpern wurde die Messung ebenfalls parallel und quer zur Faserrichtung durchgeführt, und mit der jeweiligen Regressionskurve ausgewertet. Die so erhaltenen Holzfeuchten wurden gemittelt, der zeitliche Verlauf ist in Abb. 1.10 dargestellt.

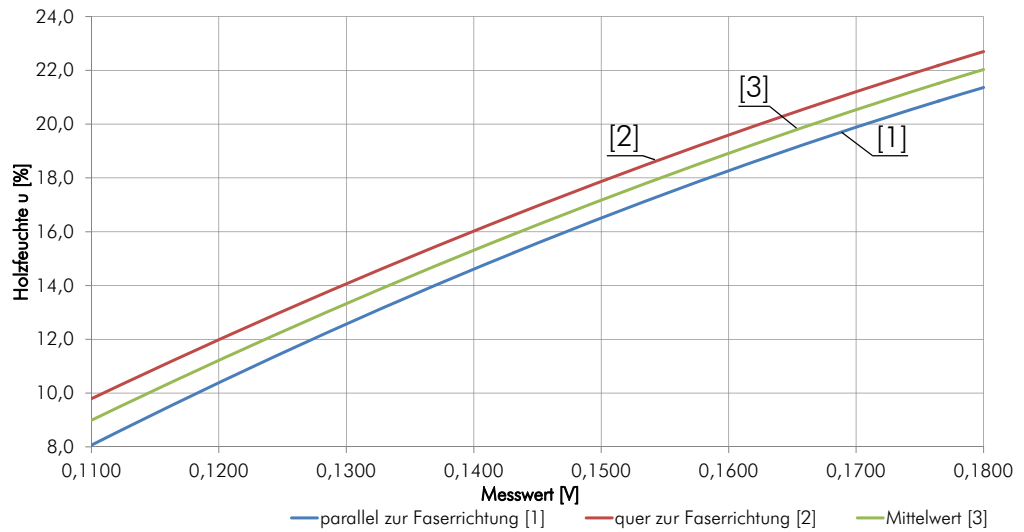


Abb. 1.9 Zusammenhang der elektr. Spannung [V] und der Holzfeuchte u [%] parallel und quer zur Faserrichtung sowie der Mittelwert beider Richtungen bei der kapazitiven Feuchtemessung

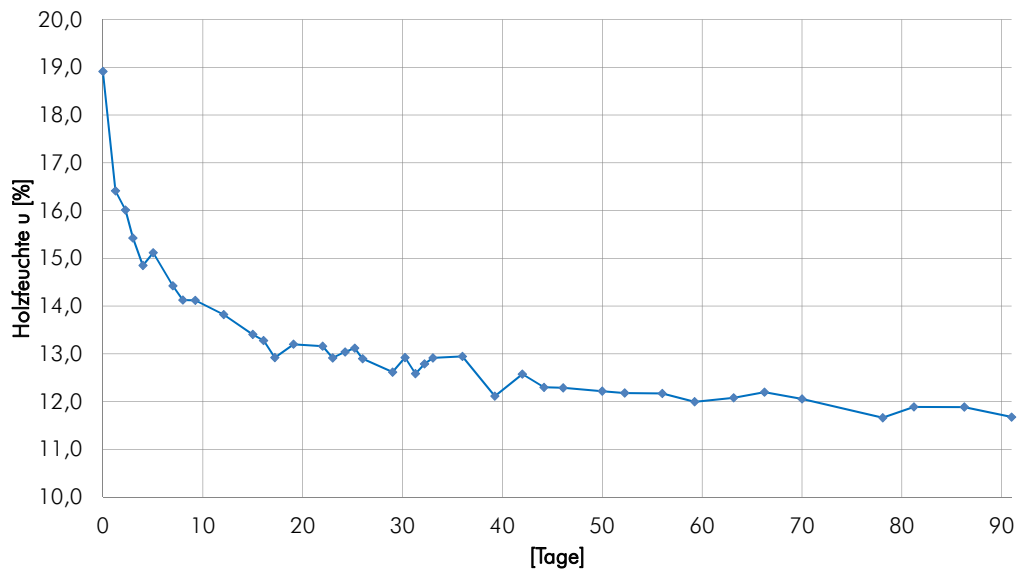


Abb. 1.10 zeitlicher Verlauf der kapazitiven Feuchtemessung an den Prüfkörpern zufolge der Kalibrierung

Auffallend ist hier der sehr schnelle Abfall der Holzfeuchte in den ersten zehn Tagen. Bereits nach dem ersten Tag war ein Abfall von 2,5 % (!) zu beobachten. Mit abnehmender Holzfeuchte flacht der Verlauf merklich ab. Schwankungen im Verlauf wie am Tag 40 können durch kurzzeitige Klimaschwankungen in der Klimakammer infolge des Abführens der Feuchte aus der Umgebungsluft erklärt werden.

1. 2. 4 Hydrometer

Die Messung mit der Gann Hydromette wurde wöchentlich durchgeführt. Die Erfassung der Holzfeuchte erfolgt bis in eine Tiefe von rund 40-50 mm. Eine Kalibrierung des Hydrometers wurde an sechs Kalibrierungskörper ($l \times b \times h = 140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) mit unterschiedlicher Rohdichte ($340\text{-}540 \text{ kg/m}^3$) durchgeführt. Diese wurden bei unterschiedlichen Klimabedingungen gelagert, bis sich die jeweilige Holzgleichsfeuchte einstellte. Dabei wurde festgestellt, dass die Messungen mit steigender Holzfeuchte über der Holzfeuchte liegen, die durch die Bestimmung der Masse der Kalibrierungskörper bei unterschiedlicher Holzfeuchte und anschließender Darrtrocknung ermittelt wurde (Abb. 1.11). Ein Einfluss der Rohdichte auf die Messungen konnte nicht festgestellt werden. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Forsen [9]. Daher wurden die Messergebnisse in Abb. 1.12 entsprechend angepasst.

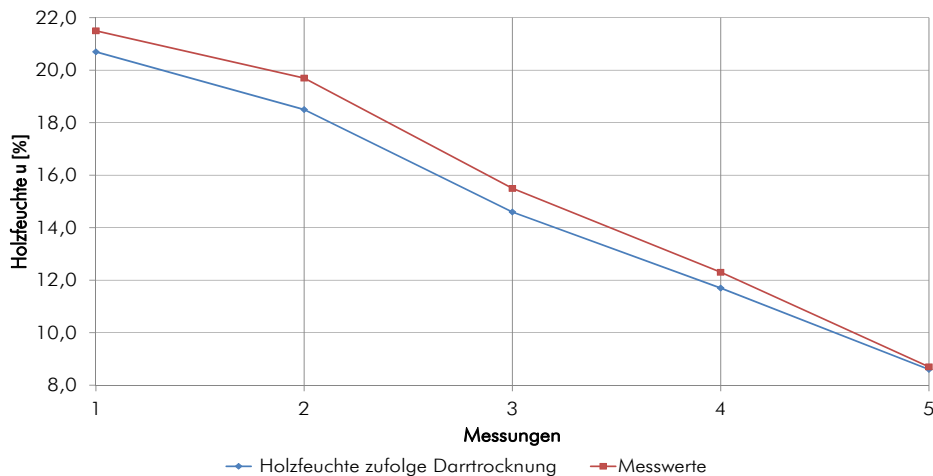


Abb. 1.11 Abweichung der Holzfeuchte Messungen mittels Hydrometer

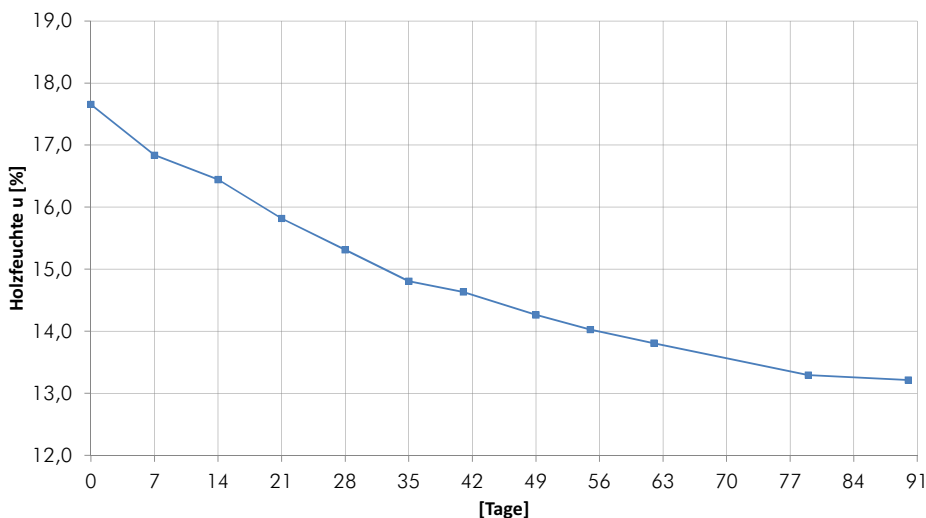


Abb. 1.12 zeitlicher Verlauf der Holzfeuchte aufgrund Hydrometer Messung in 40-50 mm Tiefe

1. 2. 5 Vergleich der angewandten Methoden der Holzfeuchtemessung

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen in der jeweiligen Tiefe sollen im Rahmen dieses Abschnittes vergleichend dargestellt werden.

Die Ergebnisse der Darrproben werden mithilfe von Boxplots illustriert. Sie bieten eine sehr gute Übersicht über die Lage und Streuung der Messergebnisse. Die hier verwendeten Boxplots enthalten den Median, die obere und untere Quartile, den Minimal- und Maximalwert, sowie etwaige „Ausreißer“.

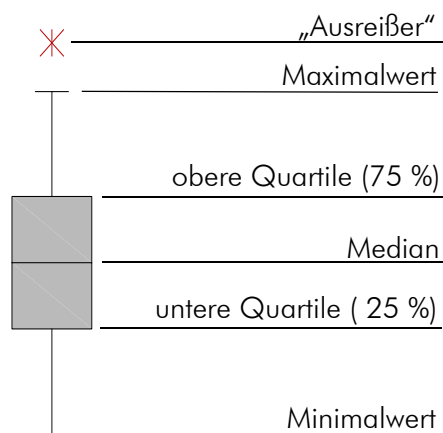


Abb. 1.13 Erklärung der Bedeutung der Boxplots

Für die weiteren Messverfahren wurden die gemittelten Messergebnisse dargestellt.

In Abb. 1.14 sind die Ergebnisse für die Messung der Holzfeuchte in 20 mm Messtiefe dargestellt.

- Vergleich der Ergebnisse in 20 mm Messtiefe

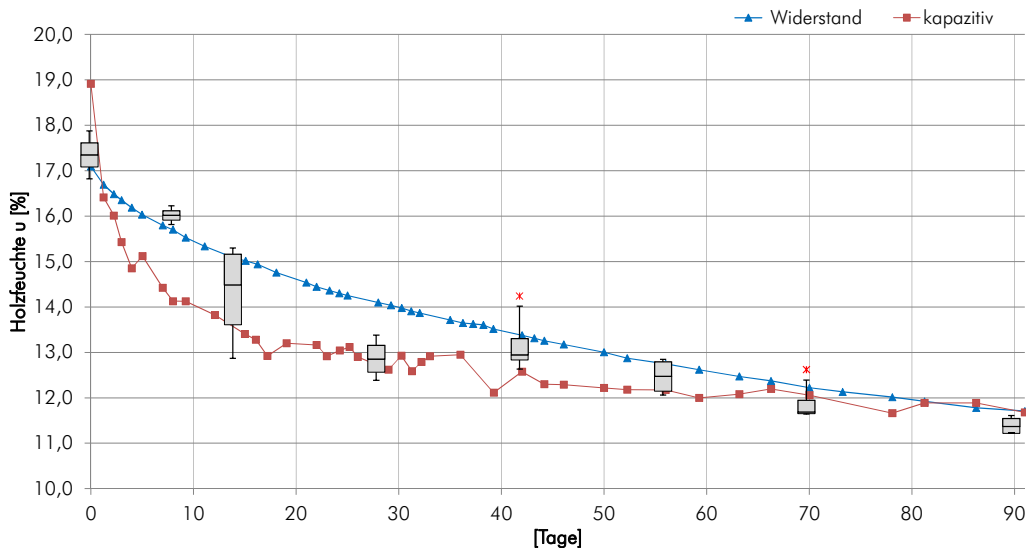


Abb. 1.14 Vergleich der Ergebnisse zufolge unterschiedlicher Holzfeuchtemessverfahren in 20 mm Messtiefe

An den dargestellten Verläufen ist auffällig, dass die Darrproben der Tage 14 und 28 signifikant tiefer liegen, als es der Verlauf der Widerstandsmessung vermuten lässt. Da sich dieser Verlauf auch in den beiden anderen Messtiefen widerspiegelt, dürfte es hier zu Abweichungen bei der Messung gekommen sein. Die Ursache konnte nicht eindeutig geklärt werden. Fakt ist jedoch, dass die Holzfeuchte auch mit der Beschaffenheit des Holzes schwankt, also Rohdichte, Lage der Jahrringe, Äste und weitere Störungen im Aufbau des Holzes einen Einfluss auf die Messergebnisse ausüben.

Wie bereits erwähnt, wurde der Verlauf der Holzfeuchte aus der Widerstandsmessung um 1,5 % nach unten korrigiert. Der Verlauf der Widerstandsmessung korreliert in den ersten 10 Tagen sehr gut mit den Darrproben. Ab Tag 40 nähert er sich wieder an die Maximalwerte der Darrproben an.

Der Gradient der kapazitiven Messung ist in den ersten Tagen sehr steil. Auch die Anfangsfeuchte von 19,0 % liegt über den anderen Messergebnissen, passt aber mit den 18,5 % Holzfeuchte aus der nicht korrigierten Widerstandsmessung gut zusammen. Der gesamte Verlauf liegt ab Tag 10 im unteren Bereich der Boxplots.

Aus den Ergebnissen kann der Schluss gezogen werden, dass die kapazitive Messung tendenziell geringere, und die Widerstandsmessung tendenziell höhere Werte als die Darrproben annehmen und die „wahren“ Holzfeuchten innerhalb der Ergebnisse der beiden genannten Methoden liegen werden.

- Vergleich der Ergebnisse in 50 mm Messtiefe

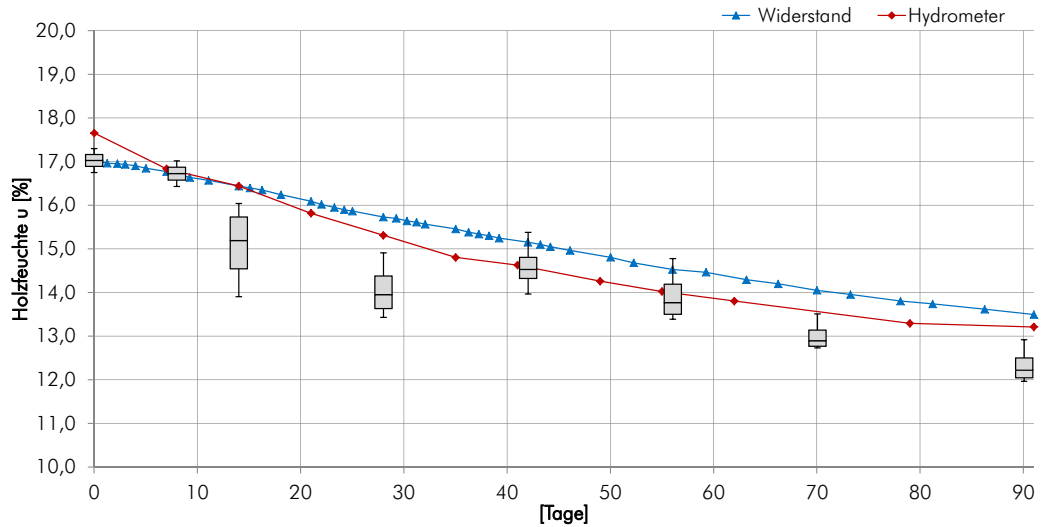


Abb. 1.15 Vergleich der Ergebnisse zufolge unterschiedlicher Holzfeuchtemessverfahren in 50 mm Messtiefe

Hier ist der Verlauf der Holzfeuchte bis auf die bereits oben erwähnten Tage 14 und 28 sehr ähnlich. Die zu Vergleichszwecken durchgeführte Messung mit dem Hydrometer, welche ebenfalls auf der Widerstandsmessung basiert, weicht im Mittel rund 0,5 % von der Widerstandsmessung der eingeklebten Elektroden aus Edelstahlkabel ab.

- Vergleich der Ergebnisse in 80 mm Messtiefe

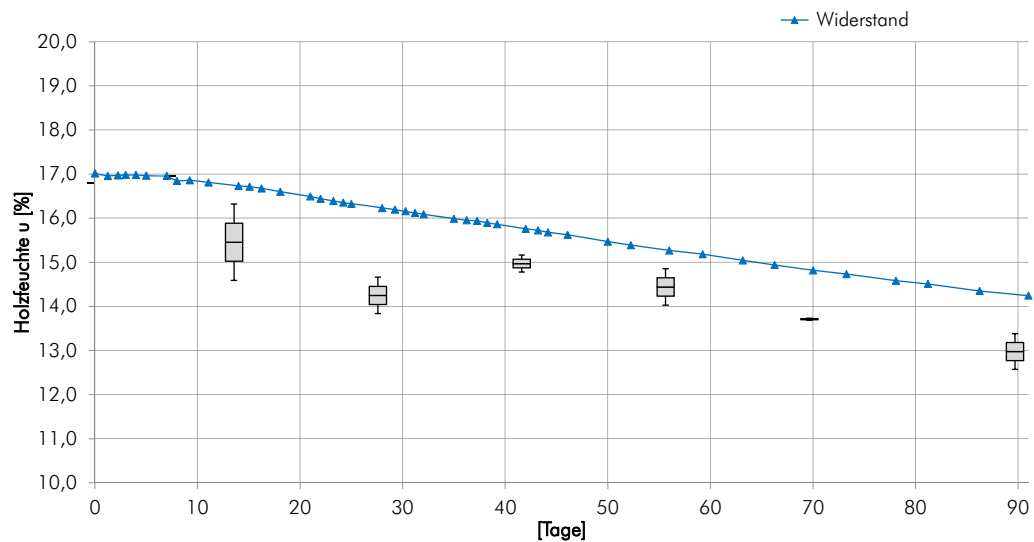


Abb. 1.16 Vergleich der Ergebnisse zufolge unterschiedlicher Holzfeuchtemessverfahren in 80 mm Messtiefe

Für die Messtiefe von 80 mm standen nur noch die Messungen mittels Darrproben und die Widerstandsmessung für einen Vergleich zur Verfügung. Da an den ersten Tagen nur eine Darrprobe in der Tiefe von 80 mm vorhanden war, wurde im Boxplot lediglich dieser Messwert als horizontale Linie aufgetragen. Der Verlauf der Gradienten aus Widerstandsmessung und den Ergebnissen der Darrproben stimmen in den ersten 10 Tagen sehr gut überein. Nach 10 Tagen liegt der Verlauf der Widerstandsmessung um rund 1 % höher als jener der Darrproben.

1. 2. 6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Feuchtemessungen

Der Verlauf der Feuchte-Gradienten war bei allen Messverfahren qualitativ sehr ähnlich. Abhängig von der jeweiligen Tiefe der Messung stellten sich unterschiedliche Verläufe ein. Den steilsten Abfall hatte erwartungsgemäß die Messstelle in 20 mm Tiefe. Die Schwankungen von 1 % bis 2 % zwischen den jeweiligen Messverfahren liegen in einem durchaus zufriedenstellenden realitätsnahen Bereich bezogen auf den Testergebnissen der verschiedenen Holzfeuchtemessgeräte bzw. Verfahren im Forschungsbericht von Forsen [9].

Das Verfahren der Widerstandsmessung von Brischke [10] lieferte gute Ergebnisse. Es ist ein kostengünstiges Verfahren zur Langzeitmessung der Holzfeuchte.

Um eine Plausibilitätskontrolle der Feuchtemessungen zu ermöglichen, wurde die Masse der Prüfkörper vor Beginn der Messungen und nach 91 Tagen bestimmt. Die daraus ermittelte Abnahme der Holzfeuchte Δu betrug 4,3 %. Die Abnahme der Holzfeuchte zufolge der Darrproben betrug $\Delta u = 4,7$ %, jene zufolge der Widerstandsmessung 3,90 %. Die geringe Feuchtedifferenz der Widerstandsmessung spiegelt auch den Verlauf der Feuchtegradienten wieder, da diese tendenziell über jener der Darrproben liegen.

Bei einem Vergleich der Feuchtemessungen mit der Abwiegung der Prüfkörper muss jedoch bedacht werden, dass bei der Holzfeuchtemessung die Holzfeuchte nur lokal bestimmt wird, während bei der Wiegung der Prüfkörper die gesamte Holzfeuchteänderung im Prüfkörper erfasst wird. Die einzelnen Messungen korrelieren in einem durchaus zufriedenstellenden Bereich.

Die Messergebnisse bestätigen, dass Feuchtemessungen immer gewissen Schwankungen unterworfen sind und die „wahre“ Holzfeuchte mit den zur Verfügung stehenden physikalischen Methoden nur bedingt exakt bestimmt werden kann.

1.3 Ergebnisse der Oberflächenmessung

1.3.1 Oberflächenmessung mittels Fotogrammetrie

Die Ergebnisse der Oberflächenmessung durch Fotogrammetrie von Joanneum Research lagen zur Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht vor und werden in einem nachfolgenden Forschungsbericht dargestellt.

1.3.2 Oberflächenmessung mittels Messschieber

Da diese Messungen nur als Kontrollmessungen angedacht waren, und nur wenige Punkte messtechnisch verfolgt wurden, ist die Auflösung natürlich nicht so hoch wie bei der foto-grammetrischen Vermessung. Dennoch liegt die Genauigkeit dieser Messmethode bei rund $\pm 0,1$ mm. So konnte aus den Messergebnissen eine Näherung für die Einflussbreite einer Schraubstange auf den BSH Prüfkörper ermittelt werden. Gemessen wurde an Prüfkörpern der Gruppe 1 und 2. Es stellte sich heraus, dass die Messungen an diesen Gruppen ausreichend waren. Als Grund dafür können Querschnitte an den Prüfkörpern der Gruppe 3 und 4, die schon nach kurzer Zeit auftraten, angeführt werden. Infolge der aufgetretenen Rissbildung kann der Verlauf der Schwindung nicht bei allen Prüfkörpern nachvollzogen werden.

Da die Messpunkte nicht über die gesamte Höhe der Prüfkörper angebracht werden konnten, wurden sämtliche Messergebnisse linear über die Trägerhöhe hochgerechnet. So ergab sich z. B. bei den Prüfkörpern mit einer Höhe von 1280 mm eine Erhöhung der Messwerte von rund 28 %.

In Abb. 1.18 ist die Schwindverformung an den gemessenen Prüfkörpern der Gruppe 1 dargestellt. Man erkennt, dass die größte Schwindung im Prüfkörper 4, also jenem Prüfkörper, der keine Schraubstange aufweist, auftritt. Die Schwindverformung der sechs Messpunkte in Prüfkörper 4 ist über die gesamte Länge annähernd konstant. Aufgrund der Inhomogenität des Holzes ergeben sich geringe Schwankungen. Berechnet man aufgrund dieser Schwindverformungen der sechs Messpunkte, das differentielle Schwindmaß q für Prüfkörper 4 nach Glg. (1.3) ergibt sich:

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100 = \frac{8,63}{1280 \cdot 4,3} \cdot 100 = 0,16 \text{ [\%/ \%]} \quad (1.3)$$

In Kapitel 2 wurde das differentielle Schwindmaß in radialer Richtung mit $q=0,19$ [%/ %] angegeben. Da die Lamellen der Prüfkörper vor allem radial orientiert sind, und die Schwindmaße starken Streuungen unterworfen sind erscheint das Ergebnis plausibel.

Der Prüfkörper 1 weist dieselben Abmessungen wie Prüfkörper 4 auf, er ist jedoch mit einer Schraubstange versehen. Die Schwindungen in Prüfkörper 1 ($l=1280$ mm) sind um rund 3 mm geringer als jene des Prüfkörpers 4. Dies gilt auch für die am weitesten von der Schraubstange entfernten Messpunkte.

Daraus lässt sich schließen, dass die Einflussbreite einer Schraubstange größer sein muss als die gewählte Länge von 1280 mm, also 640 mm pro Seite. Wäre die Einflussbreite kleiner als 1280 mm, müssten die äußeren Messpunkte der Prüfkörper 1 und 4, dieselben Verschiebungen aufweisen. Das ist jedoch nicht der Fall. Zwar ist eine leichte Tendenz zur größeren Schwindung mit wachsendem Abstand von der Schraubstange zu beobachten, jedoch hält sich diese Abweichung von rund 1 mm in Grenzen.

An Prüfkörper 6, mit der Höhe von 400 mm stellte sich erwartungsgemäß die geringste Schwindung ein. Jedoch ist der Verlauf hier verfälscht, da sich über die gesamte Prüfkörperlänge ein Querszugriss einstellte.

Die Schwindung an Prüfkörper 5 mit der Höhe von 800 mm liegt etwas über jener von Prüfkörper 6, welcher jedoch keine Schwindrisse aufweist.

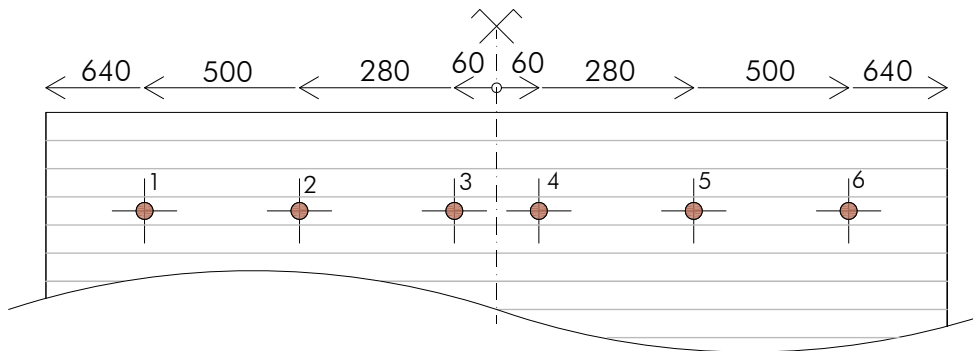


Abb. 1.17 Messstellen Prüfkörper der Gruppe 1 ($l=1280$ mm)

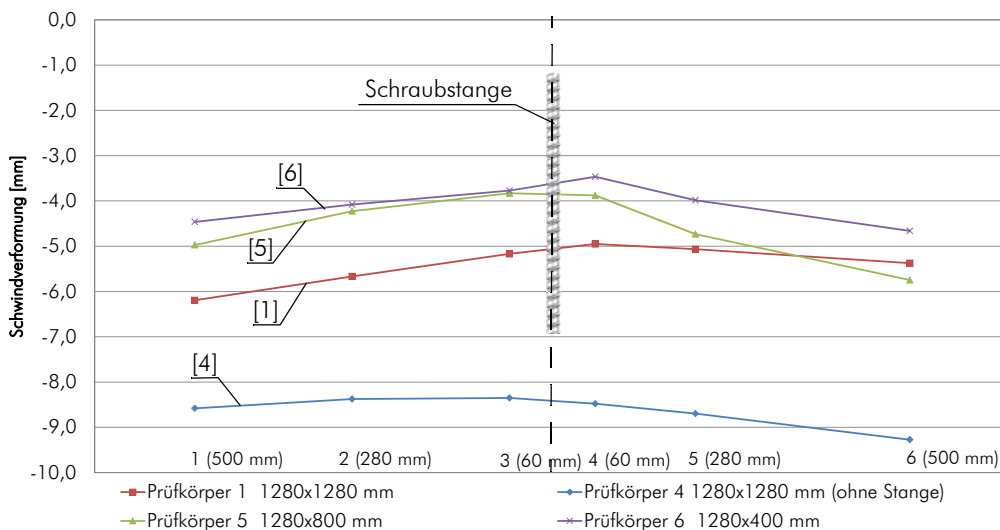


Abb. 1.18 Verformungen nach 91 Tagen zufolge Schwinden der Prüfkörper Gruppe 1 ($l=1280$ mm)

In Abb. 1.19 werden die Messpunkte der Prüfkörper 1 und 4 miteinander verglichen. Dabei wurden jeweils die Ergebnisse der Messungen an den Messstellen 1 und 6 (500 mm), 2 und 5 (280 mm) sowie 3 und 4 (60 mm) gemittelt und über die Zeit aufgetragen. Bereits nach sieben Tagen ist ein geringer Einfluss der Wirkung der Schraubstange erkennbar. Nach 14 Tagen ist bereits ein deutlicher Unterschied wahrnehmbar.

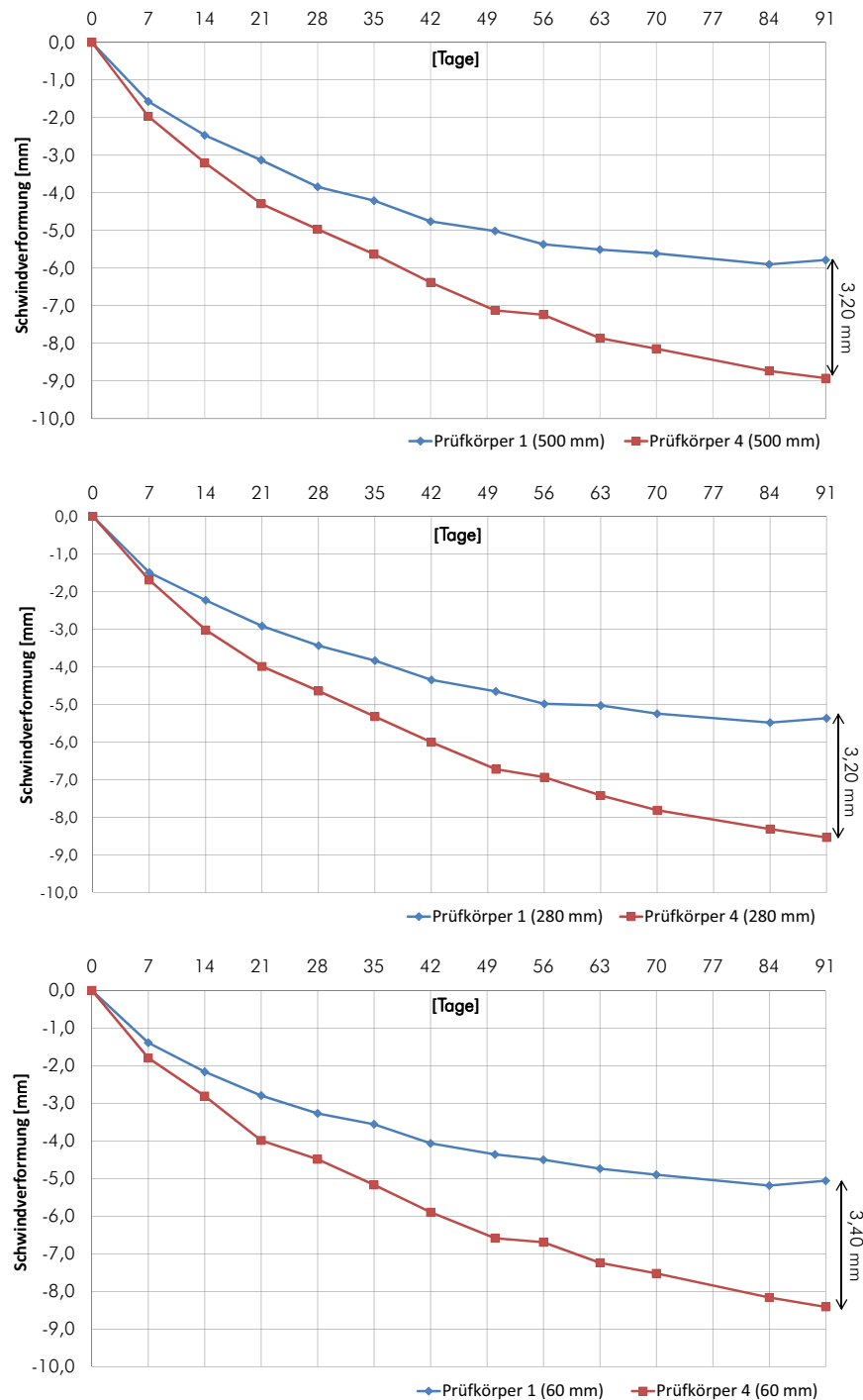


Abb. 1.19 zeitlicher Verlauf der Entwicklung von Schwindverformungen in den Prüfkörpern 1 und 4

Der zeitliche Verlauf der Schwindverformung folgt qualitativ jenem der Holzfeuchte aus Abschnitt 1. 2.

Bei den Prüfkörpern der Gruppe 2 ($l=640$ mm) wurden die Messungen an vier Messstellen nach Abb. 1.20 durchgeführt. Der Prüfkörper 10 ohne Schraubstange weist eine Schwindung von 9 mm auf, ist also ident zu Prüfkörper 4 der Gruppe 1. Das differentielle Schwindmaß beträgt hier $q=0,17$ [%/%]. Die Ursache für die unregelmäßigen Verläufe der Prüfkörper 9 und 11 ist eine Rissbildung, welche sich bereits nach sieben Tagen bildeten. Auf die Problematik der Rissbildung wird in Abschnitt 1. 4 näher eingegangen.

Der Prüfkörper 12 weist qualitativ denselben Verlauf wie die Prüfkörper der Gruppe 1 auf. Durch die geringere Höhe entstehen geringere Querspannungen, dadurch bedingt konnte hier keine Rissbildung in den Prüfkörpern beobachtet werden.

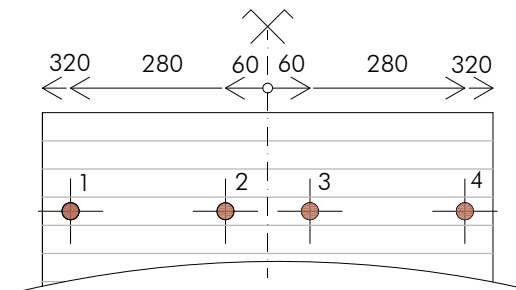


Abb. 1.20 Messstellen Prüfkörper Gruppe 2 ($l=640$ mm)

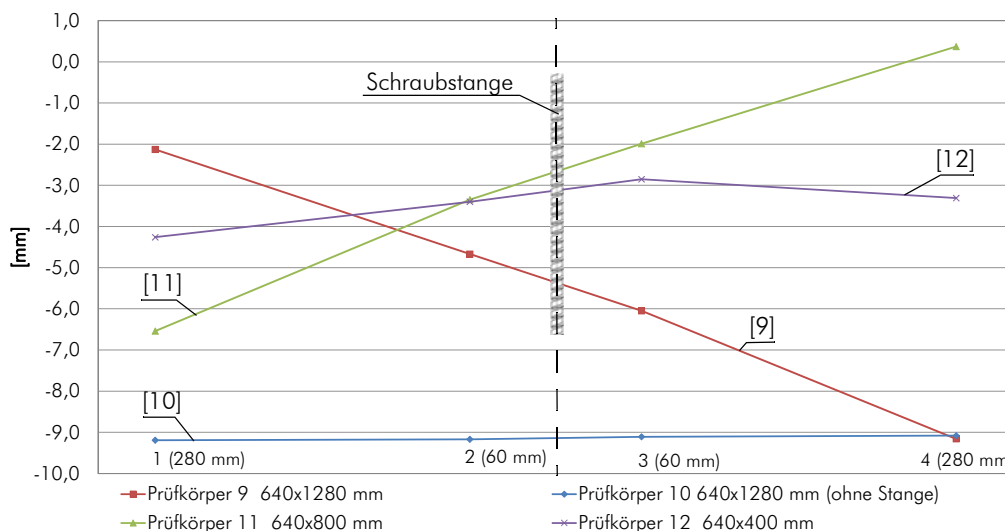


Abb. 1.21 Verformungen nach 91 Tagen zufolge Schwinden der Prüfkörper Gruppe 2 ($l=640$ mm)

Abschließend ist festzustellen, dass eine Schraubstange die Schwindung des Holzes merklich behindert und somit eine beträchtliche Reduktion der Schwindverformungen auftritt. Ein Problem, das damit verbunden ist, sind jedoch die entstehenden Querspannungen im Querschnitt und die damit verbundene Rissbildung.

1. 4 Spannungen in den Prüfkörpern

Aufgrund des Schwindvorganges stellte sich in den Schraubstangen eine Druckspannung ein. Im BSH entstand aufgrund der behinderten Schwindung durch die Schraubstange eine Querkzugspannung $\sigma_{t,90}$. Die charakteristische Querkzugspannung $f_{t,90,k}$ für BSH liegt bei $0,5 \text{ N/mm}^2$. Jedoch ist bekannt, dass die Querkzugspannungen einerseits sehr großen Schwankungen unterworfen sind und andererseits stark vom querkzugbeanspruchten Volumen bzw. der Fläche abhängen.

Erreicht bzw. überschreitet die entstehende Querkzugspannung die maximale aufnehmbare Querkzugspannung im BSH, kommt es zu einer Rissbildung.

Anhand eines einfachen Modells in Abb. 1.22 lassen sich die auftretenden Spannungen und die damit verbundenen Risse im BSH erklären.

Links ist der ungerissene Holzquerschnitt dargestellt. Integriert man die Druckspannungen in der Schraubstange und die Querkzugspannungen im Holz, so müssen die Kräfte im Gleichgewicht sein. Überschreiten nun die Querkzugspannungen im Holz die maximal aufnehmbaren Querkzugspannungen, so kommt es zu einer Rissbildung. Durch diese nimmt die Spannung im Holzquerschnitt ab, und mit ihr auch die Spannung in der Schraubstange. Wird nach der Rissbildung eine äußere querkzugbeanspruchende Kraft in den Querschnitt eingeleitet, so muss die Schraubstange die gesamte Querkzuglast alleine aufnehmen.

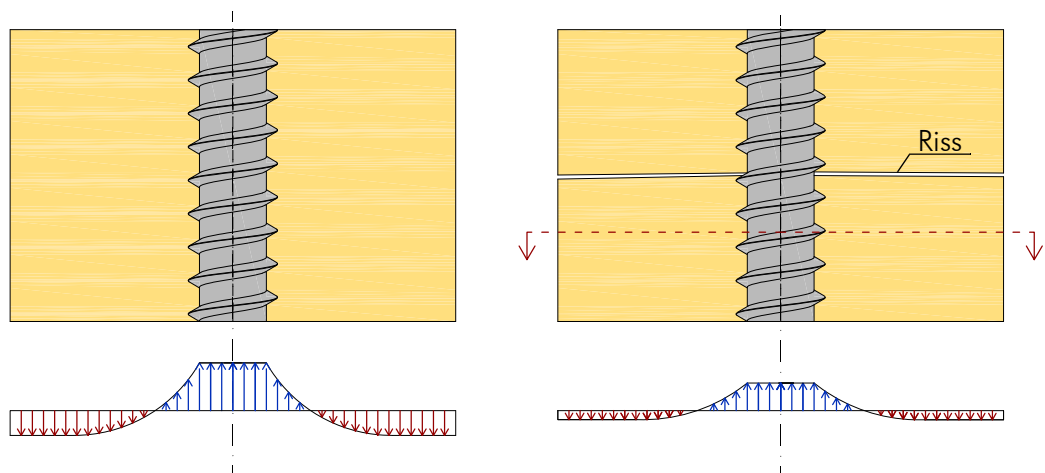


Abb. 1.22 Spannungen in Schraubstange und BSH aufgrund einer Schwindverformung

In den Schraubstangen werden zum besseren Verständnis im Folgenden nicht Spannungen, sondern die entstehenden Kräfte miteinander verglichen. Beim BSH werden die umgerechneten Querkzugspannungen verfolgt.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Änderungen der Spannungen entsprechend der auftretenden Feuchteänderung über den Querschnitt zeitverzögert vor sich gehen. Dies war jedoch nicht der Fall. So stieg die Kraft in den Schraubstangen der Gruppe 1 ($l=1280$ mm), je nach Höhe der Prüfkörper innerhalb 1 Stunde bereits um 0,4-1,0 kN! Nach einer Woche waren bereits **20 kN (!)** erreicht. Die Begründung liegt im steilen Gradienten der Holzfeuchte im äußeren Bereich des Querschnittes in den ersten Tagen.

Der Einfluss der unterschiedlichen Höhen und Längen wurde bereits nach den ersten Stunden ersichtlich. So konnte der Zuwachs der Kraft sofort mit den Abmessungen der Prüfkörper in Zusammenhang gebracht werden. Je größer die Abmessungen, insbesondere die Höhe waren, desto größer fiel der Kraftgradient aus.

Eine Rissbildung konnte bislang in allen Prüfkörpern beobachtet werden. Jedoch war ein Riss nicht immer mit einem Kraftabfall in der Schraubstange verbunden. Erst bei tieferen Rissen flachte die Kraft in der Stange ab, oder fiel gänzlich ab.

Die Risse entstanden meist in der Mitte der Prüfkörper, wo die Schraubstange abgedreht war und somit keinen Verbund mit dem Holzquerschnitt eingehen konnte. Jedoch konnte die Rissbildung auch abseits der abgedrehten Schraubstangen beobachtet werden. Wurden BSH Lamellen mit Kern verwendet, so ging die Rissbildung auch von diesen Lamellen aus. An einigen Prüfkörpern konnte beobachtet werden, dass die Breite des Risses mit dem Abstand zur Schraubstange größer wurde.

In den beiden Schraubstangen die zur Kontrolle eines möglichen Driftens, der DMS ebenfalls in der Klimakammer gelagert waren, konnten erwartungsgemäß keine nennenswerten entstehenden Kräfte beobachtet werden.

Druckkräfte und Querkzugspannungen der einzelnen Prüfkörper sind in Tab. 1.2 aufgelistet.

Die Querkzugspannungen wurden in einer ersten Näherung auf die gesamte Querschnittsfläche in Längsrichtung der Prüfkörper bezogen. Dies entspricht jedoch nicht ganz der Realität. Man erkennt aus den Daten auch, dass die Querkzugspannungen in den gerissenen Prüfkörpern der Gruppe 4 ($l=160$ mm) tendenziell größer waren als jene Querkzugspannungen von Prüfkörpern mit größerer Länge.

Gruppe	Prüfkörper	Abmessungen L x H [mm]	Kraft [Druck kN]	rückgerechnete Querkzugspannung [N/mm ²]	Riss mit Kraftabfall
1	1	1280 x 1280	76,85	0,39	
	2	1280 x 1280	50,43	0,26	
	3	1280 x 1280	88,55	0,45	
	5	1280 x 800	34,45	0,18	
	6	1280 x 400	9,95	0,05	X
2	7	640 x 1280	50,91	0,55	X
	8	640 x 1280	55,22	0,60	
	9	640 x 1280	19,66	0,21	X
	11	640 x 800	17,71	0,19	
	12	640 x 400	16,43	0,18	
3	13	320 x 1280	18,00	0,44	X
	14	320 x 1280	DMS DEFEKT		
	15	320 x 1280	18,23	0,44	X
	17	320 x 800	26,76	0,65	X
	18	320 x 400	15,64	0,38	
4	19	160 x 1280	9,56	0,62	X
	20	160 x 1280	10,49	0,68	X
	21	160 x 1280	DMS DEFEKT		
	23	160 x 800	12,00	0,77	X
	24	160 x 400	15,00	0,97	X

Tab. 1.2 feuchteinduzierte Kräfte in den Schraubstangen und daraus näherungsweise rückgerechnete Querkzugspannungen in den Prüfkörpern nach 91 Tagen

In Abb. 1.23 sind die entstandenen Druckkräfte in den Schraubstangen nach 91 Tagen grafisch dargestellt. Die DMS der Schraubstangen der Prüfkörper 14 und 21 lieferten keine brauchbaren Messergebnisse und werden daher als Defekt deklariert.

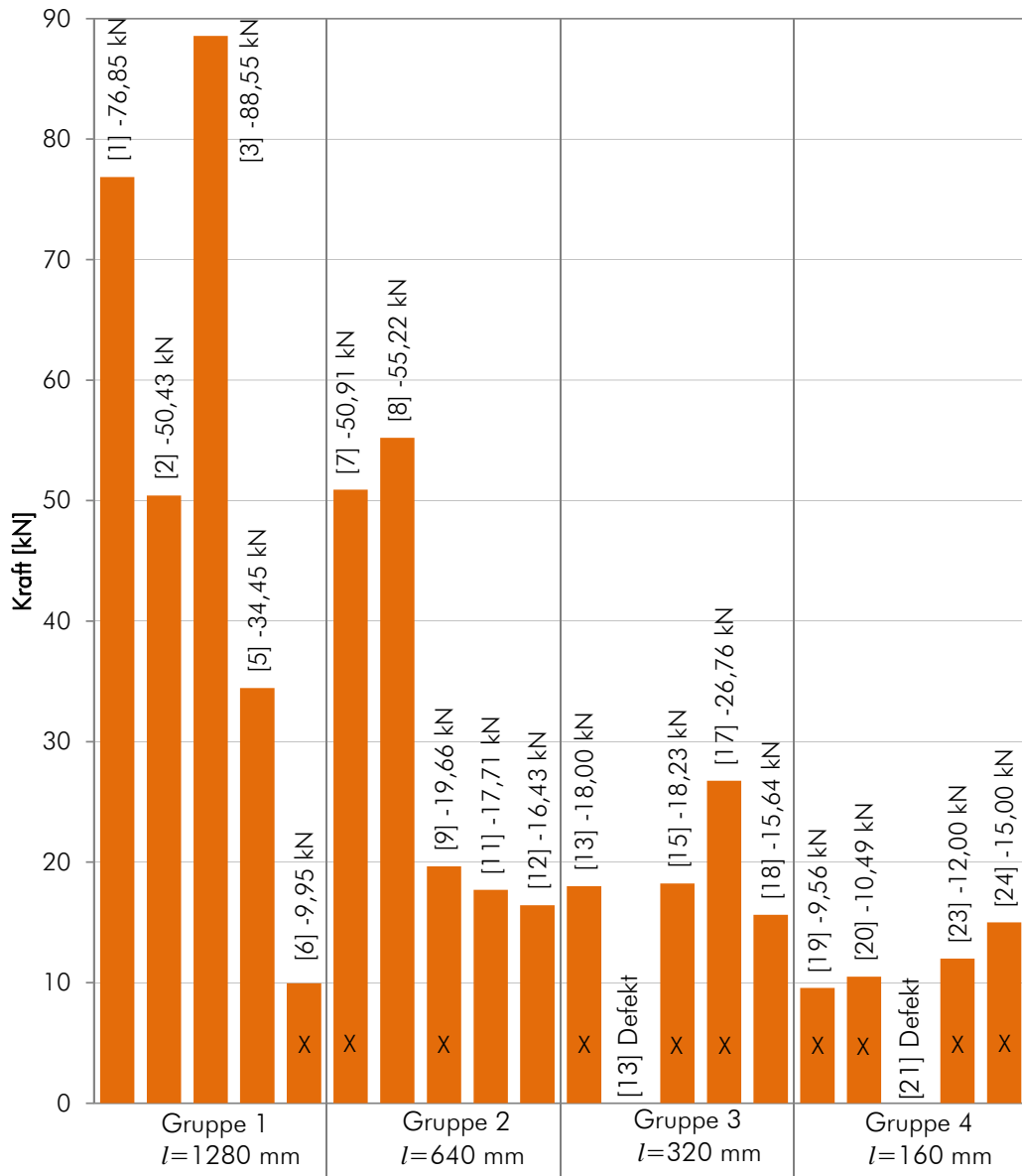


Abb. 1.23 Vergleich der feuchteinduzierten Kräfte in den Schraubstangen
X...Rissbildung mit Kraftabfall

Aus der Abb. 1.23 ist der Zusammenhang zwischen den Abmessungen der Prüfkörper und der gemessenen Druckkraft in der Schraubstange gut erkennbar. Im Folgenden wird jede Gruppe gesondert diskutiert und die Ergebnisse kritisch betrachtet.

1. 4. 1 Prüfkörper der Gruppe 1 ($l=1280$ mm)

In Abb. 1.24 sind die entstehenden Druckkräfte der Prüfkörper aus Gruppe 1 ($l=1280$ mm) über einen Zeitraum von 90 Tagen dargestellt (die Klammerwerte in der Abb. kennzeichnen die Prüfkörper). Man erkennt in den ersten Tagen einen steilen Anstieg der auftretenden Druckkraft. Dieser korrelierte in dieser Gruppe sehr gut mit den dazugehörigen Trägerhöhen. So trat bei der Höhe von 1280 mm, der steilste Anstieg auf, während bei der Höhe von 400 mm der geringste Kraftgradient zu beobachten war.

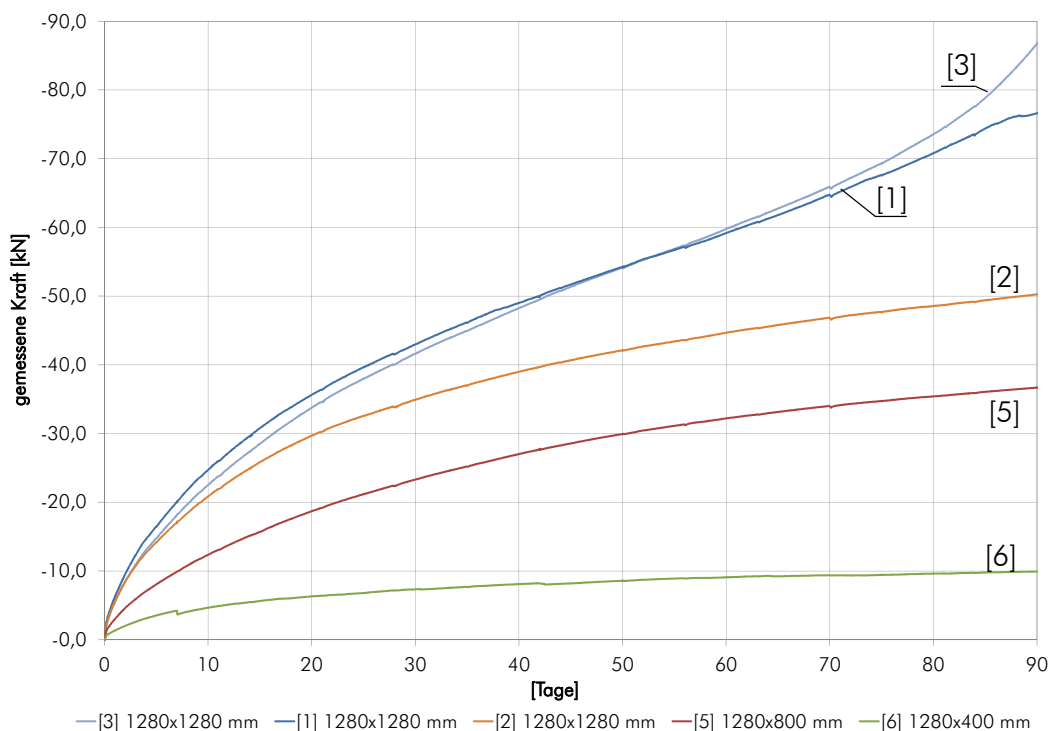


Abb. 1.24 zeitlicher Verlauf der feuchteinduzierten Kräfte in den Schraubstangen der Gruppe 1 ($l=1280$ mm)

Bei den untersuchten Prüfkörpern stellten sich bereits nach sieben Tagen die ersten Quersugrisse an der Oberfläche ein. Jedoch waren diese so klein, dass sich bis auf den Prüfkörper 6 keine Änderung im Kraftverlauf ergab.

Die Prüfkörper 1, 2, und 3 weisen dieselben Abmessungen auf. Der Verlauf der Kraftänderungen in den Prüfkörpern 1 und 3 ist bis zu Tag 70 sehr ähnlich. Danach ist ein Aufklaffen des Verlaufes zu erkennen. Bei Prüfkörper 1 ist der Abfall entweder durch ein Fließen der Schraubstange oder durch die Rissbildung zu erklären. Warum Prüfkörper 3 nach 70 Tagen noch einen steileren Kraftanstieg erfährt, konnte noch nicht evaluiert werden.

Nicht nachvollziehbar ist der Verlauf der Kraftänderung von Prüfkörper 2. Die Kraftänderung ist hier deutlich geringer. Ein Grund dafür könnte eine geringere Rohdichte in der Nähe der Schraubstange sein. Eine abschließende Beurteilung wird in jedem Fall nach Beendigung der Messung über ein Auftrennen des Querschnittes in der Nähe der Schraubstange möglich sein.

In Prüfkörper 1 trat nach sieben Tagen bereits ein Riss auf, welcher mit zunehmenden Abstand zur Schraubstange größer wurde, jedoch konnte kein Kraftabfall beobachtet werden. Der Riss ist in Abb. 1.25 dargestellt.



Abb. 1.25 Riss Prüfkörper 1 nach 70 Tagen

Im Rahmen der Kalibrierung kamen die Schraubstangen bei rund 58 kN (auf Zug) ins Fließen. Bei den verwendeten Schraubstangen in Prüfkörper 1 und 3 stieg jedoch die Kraft auf 76,85 bzw. 88,55 kN an. Zwar handelt es sich hier um eine Druckbeanspruchung, Stahl weist jedoch bei Zug und Druck dasselbe Verhalten auf.

Nach Abschluss der Messungen werden daher die Schraubstangen aus den Prüfkörpern entnommen und deren Kalibrierung nochmals überprüft.

Auffällig war, dass im Prüfkörper 6 geringere Kräfte als im wesentlich kleineren Prüfkörper 24 entstanden. Die Erklärung liegt hier in einem Riss, welcher sich schon bei der Umstellung des Klimas bildete. Dies erklärt den flachen Verlauf des Kraftanstieges und den Kraftabfall nach sieben Tagen. Der Riss, der über die gesamte Länge des Prüfkörpers zu beobachten war, entstand nicht in der Lamelle mit der Bohrung von 63 mm, sondern in einer darunter liegenden Lamelle, welche einen Kern beinhaltet.



Abb. 1.26 Erstrissbildung Prüfkörper Nr. 6 nach 7 Tagen



Abb. 1.27 Rissbildung Prüfkörper Nr. 6 nach 70 Tagen

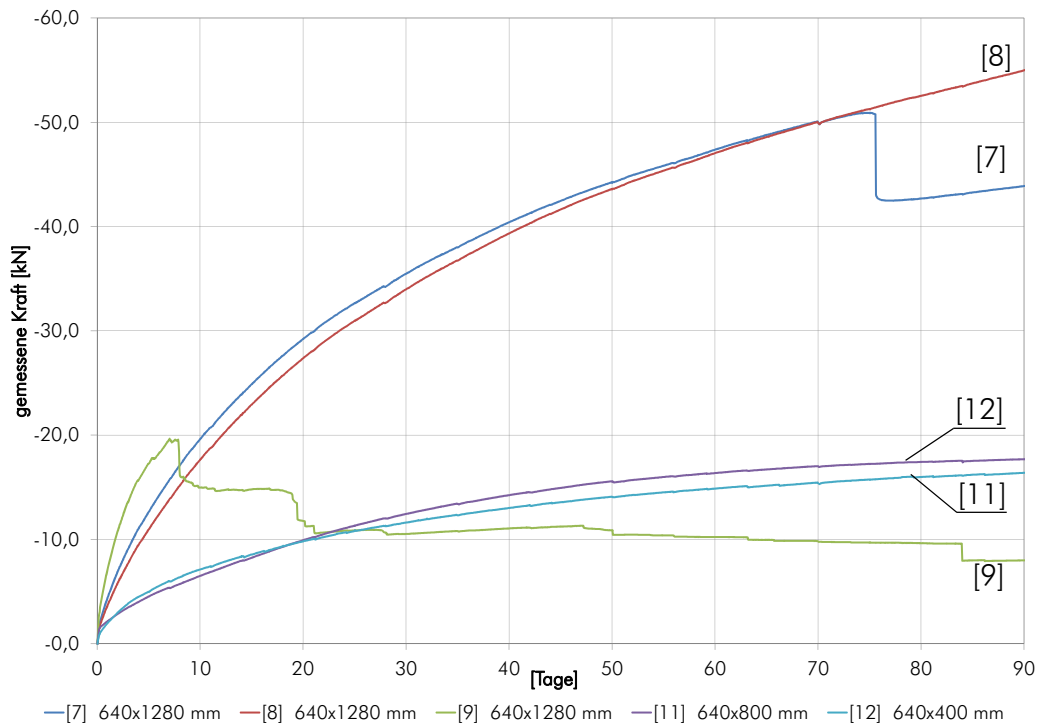
1. 4. 2 Prüfkörper der Gruppe 2 ($l=640$ mm)


Abb. 1.28 zeitlicher Verlauf der feuchteinduzierten Kräfte in den Schraubstangen der Gruppe 2 ($l=640$ mm)

In dieser Gruppe versagte Prüfkörper 9 bereits nach sieben Tagen infolge Rissbildung. Geht man anhand des Rissbildes von der gesamten Länge des Prüfkörpers aus, so ergibt sich die aufgetretene Querkzugspannung $\sigma_{1,90}$ mit $0,21$ N/mm². Der Riss selbst entstand im Bereich der DMS des Prüfkörpers. Hier hatte die Schraubstange, wie bereits erwähnt, keinen Verbund mit dem Holz. Daher konnte die Kraft in Prüfkörper 9 nie mehr das Lastniveau der von den Abmessungen her identischen Prüfkörper 7 und 8 erreichen, welche qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Auch hier ist der Einfluss der Höhe auf die Druckkräfte in den Schraubstangen sehr gut erkennbar. Prüfkörper 7 versagte erst nach 75 Tagen durch Rissbildung. Die Querkzugspannung umgerechnet auf die Querschnittsfläche in Längsrichtung betrug $0,55$ N/mm².

Durch eine Rissbildung in Prüfkörper 11 ($h=800$ mm), welche bereits nach einigen Stunden zu beobachten war, ist der Verlauf des Druckkraftgradienten flacher als es bei einem ungerissenen Prüfkörper der Fall gewesen wäre.

Dadurch lässt sich der qualitativ gleiche Verlauf mit Prüfkörper 12 ($h=400$ mm) erklären.

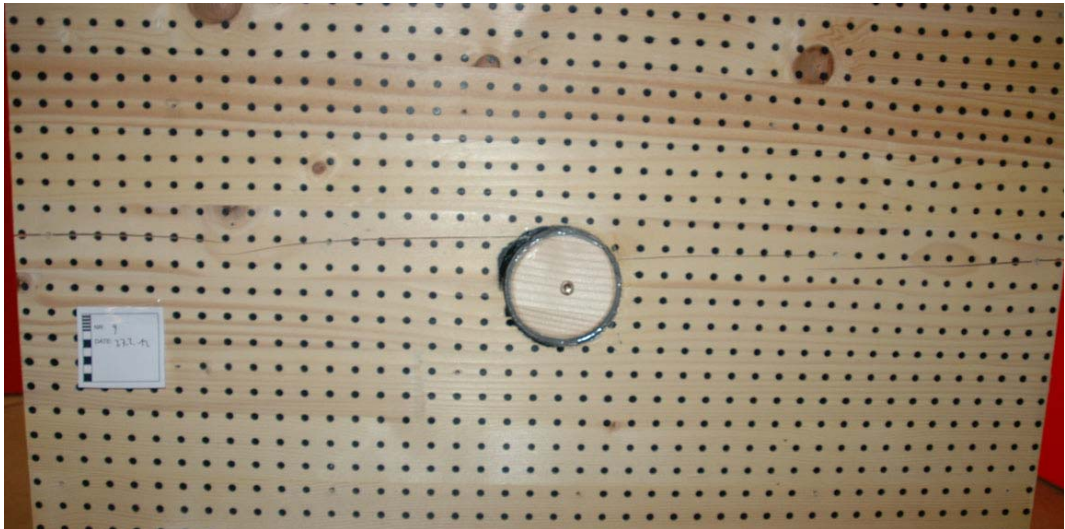


Abb. 1.29 Erstrissbildung Prüfkörper Nr. 9 nach 7 Tagen

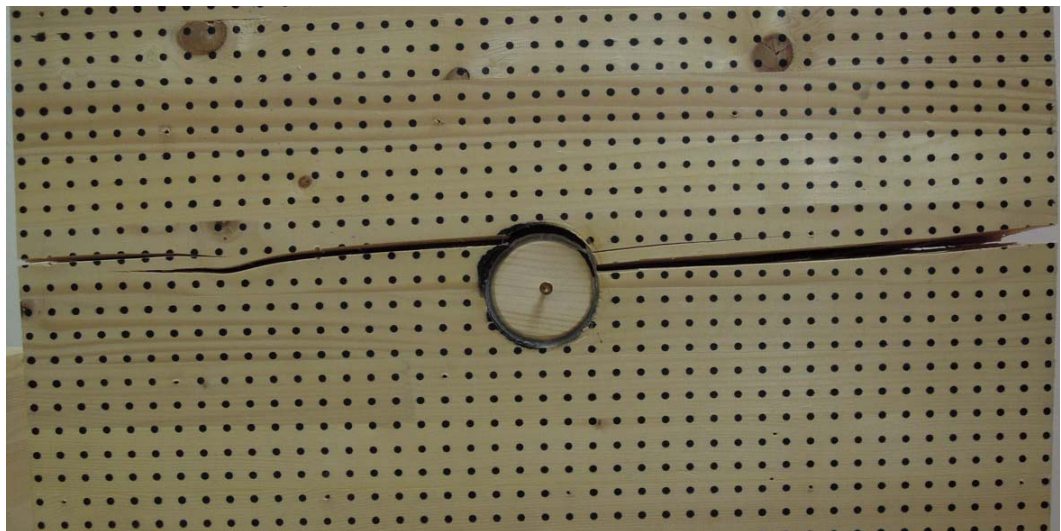


Abb. 1.30 Rissbildung Prüfkörper Nr. 9 nach 90 Tagen

1. 4. 3 Prüfkörper der Gruppe 3 ($l=320$ mm)

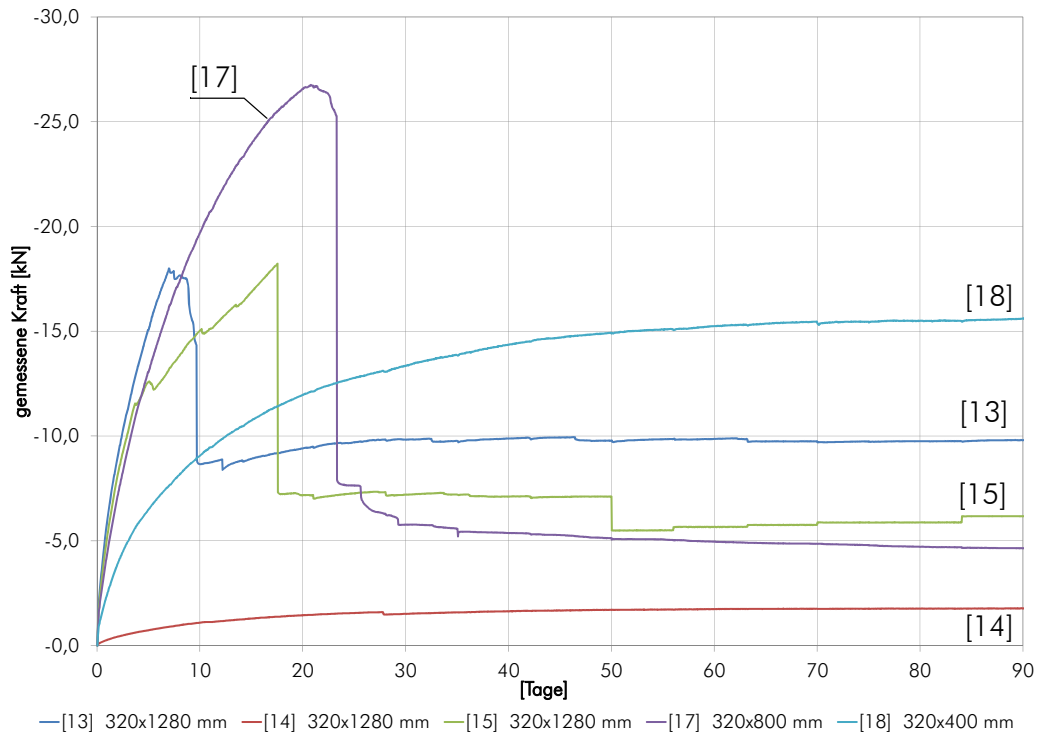


Abb. 1.31 zeitlicher Verlauf der feuchteinduzierten Kräfte in den Schraubstangen der Gruppe 3 ($l=320$ mm)

Die DMS der Schraubstange in Prüfkörper 14 lieferten keine sinnvollen Messwerte, daher sind diese als Defekt zu deklarieren und werden im Zuge der weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Die Prüfkörper 13 und 15 mit der Höhe $h=1280$ mm versagten hier als Erstes durch Rissbildung. Erste Risse in den beiden Prüfkörpern konnten bereits nach 4 Tagen beobachtet werden (Abb. 1.32).



Abb. 1.32 Rissbildung Prüfkörper 13 nach 4 Tagen

Durch die Querschnittshöhe von 1280 mm verbunden mit der geringen Länge von 320 mm entstanden in den Prüfkörpern 13, 14 und 15 bereits nach kurzer Zeit hohe Querkzugspannungen. Die Querkzugspannungen der Prüfkörper 13 und 15 umgerechnet auf die gesamte Prüfkörper Querschnittsfläche lagen jeweils bei $0,44 \text{ N/mm}^2$. Die Erstrissbildung erfolgte im Bereich der DMS (Mitte der Prüfkörper bzw. halbe QS-Höhe). Es konnte jedoch an den genannten Prüfkörpern eine Sekundärrissbildung in anderen Lamellen beobachtet werden, welche bereits nach 1-2 Tage nach der Erstrissbildung auftraten. Nach 20 Tagen versagte auch Prüfkörper 17 mit einer Höhe von 800 mm. Das spätere Versagen des Prüfkörpers lässt sich durch den kleineren Spannungsgradienten aufgrund der geringeren Querschnittshöhe erklären. Die Querkzugspannung lag bei $0,65 \text{ N/mm}^2$.

Prüfkörper 18 versagte nach 70 Tagen durch Rissbildung, hielt aber das Lastniveau. Bei ihm lag die Querkzugspannung bei $0,38 \text{ N/mm}^2$.

Prüfkörper 16 ohne Schraubstange wies nach 90 Tagen keine nennenswerte Rissbildung auf.

In Abb. 1.33 sind die Prüfkörper der Gruppe 3 nach 90 Tagen dargestellt.



Nr.18 Nr.17 Nr.15 Nr.14 Nr.13 Nr.16

Abb. 1.33 Prüfkörper der Gruppe 3 nach 90 Tagen.

1. 4. 4 Prüfkörper der Gruppe 4 ($l=160$ mm)

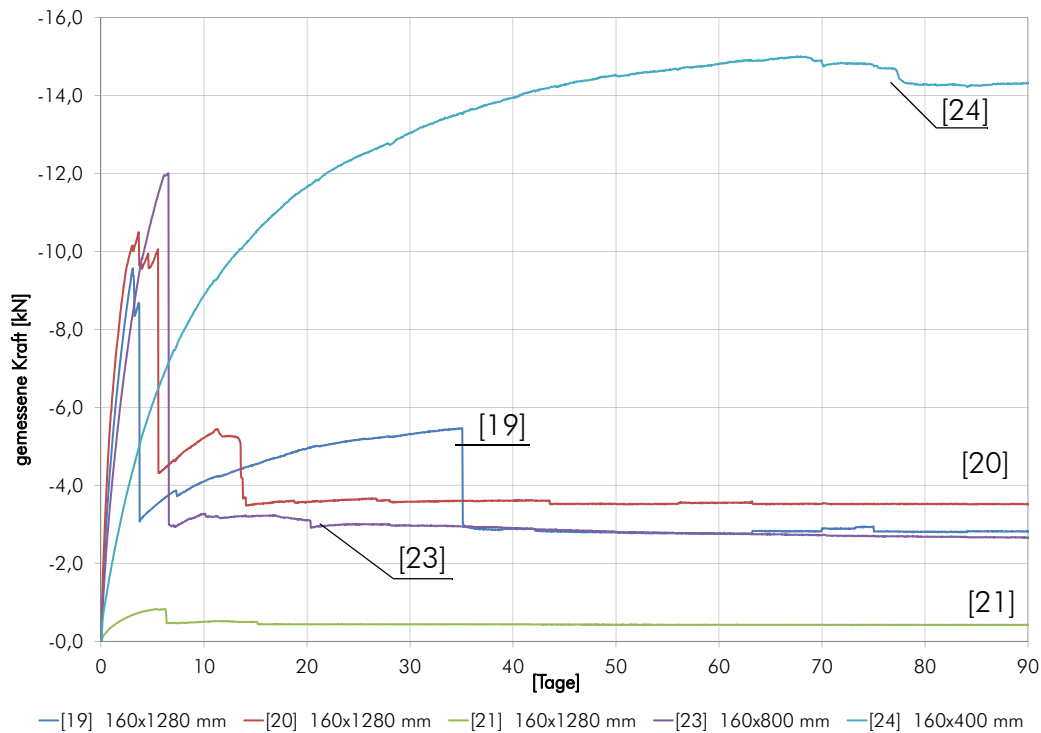


Abb. 1.34 zeitlicher Verlauf der feuchteinduzierten Kräfte in den Schraubstangen der Gruppe 4 ($l=160$ mm)

Alle Prüfkörper dieser Gruppe versagten durch Rissbildung. Der Prüfkörper 21 wird in der Auswertung nicht berücksichtigt, da auch hier eine Störung der DMS vorliegt. Zumindest zeigten sie die Entstehung eines Risses an, welcher mit den anderen Prüfkörpern korreliert. Die Querkzugspannungen lagen zwischen $0,60 \text{ N/mm}^2$ und $0,97 \text{ N/mm}^2$. Die Risse entstanden bereits nach vier bis sieben Tagen. In dieser Gruppe kam es zu den geringsten Druckkräften in den Schraubstangen, weil die Prüfkörper die hohen Querkzugspannungen nicht aufnehmen konnten.

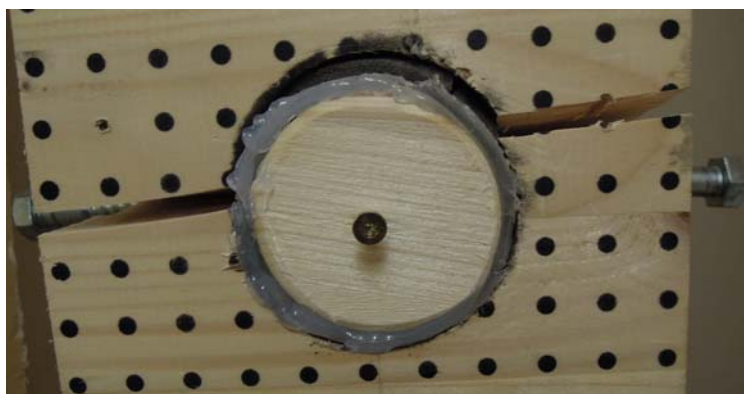


Abb. 1.35 Rissbildung nach 5 Tagen

In Abb. 1.36 sind die Prüfkörper der Gruppe 4 nach 90 Tagen dargestellt. Wie zuvor bei jenen Prüfkörpern der Gruppe 3 mit einer Höhe $h=1280$ mm, kam es hier zu einer Erstrissbildung im Bereich der DMS bei allen Prüfkörpern sowie zu einer Sekundärrissbildung in den Prüfkörpern 19, 20, 21 und 23.

In Prüfkörper 22 ohne Schraubstange entstanden keine nennenswerten Querkzugrisse.



Abb. 1.36 Prüfkörper der Gruppe 4 nach 90 Tagen

1.5 Zusammenhang zwischen der Holzfeuchteänderung im Querschnitt und den Kräften in den Schraubstangen

In diesem Abschnitt soll ein Zusammenhang zwischen der Feuchteänderung im Querschnitt und der Kraftänderung in den Schraubstangen hergestellt werden. In einer ersten Näherung wird ein vereinfachtes Modell definiert, um die auftretenden Spannungen abschätzen zu können. Dabei wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- die Änderung der Holzfeuchte u wird über den Querschnitt gesehen gemittelt,
- der Einfluss von Höhe und Breite des Probekörpers wird linear im Modell berücksichtigt,
- der Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Kraft ist linear.

Mithilfe einer Regressionsanalyse, welche auf den Messdaten der Darrproben basiert, wurde folgende Gleichung zur Beschreibung des Holzfeuchteverlaufes im Querschnitt ermittelt:

$$u = (a + b \cdot d^{0,5})^2 \quad (1.4)$$

Wobei: u ... Holzfeuchte [%]
 a ... 4,166 empirisch ermittelter Wert
 b ... -0,067 empirisch ermittelter Wert
 d ... Tage nach Umstellung des Klimas [d]

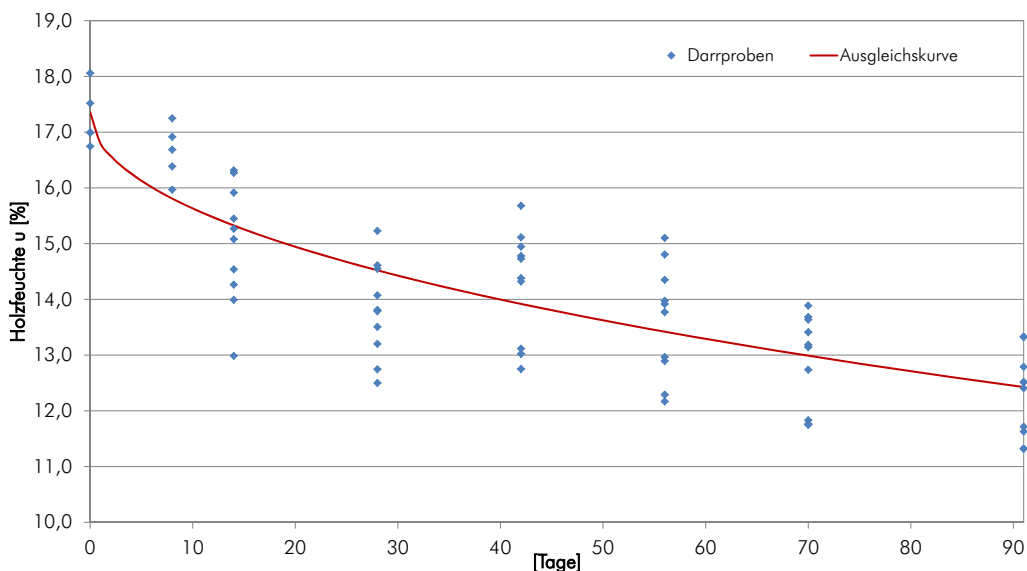


Abb. 1.37 Regressionskurve für die Messwerte der Darrproben

Diese Funktion wurde anschließend mit den Kraftänderungen der Schraubstangen in den Prüfkörpern in Zusammenhang gebracht.

In den Abb. 1.38 bis Abb. 1.41 ist die Kraftänderung abhängig von der Holzfeuchte dargestellt.

Die Änderung der Holzfeuchte betrug in diesem Model im Mittel 4,7 % in 90 Tagen.

Man erkennt, dass vor allem die Prüfkörper der Gruppe 1 und 2 einen annähernd linearen Verlauf aufweisen. Bei den Prüfkörpern der Gruppe 3 und 4 ist der Verlauf ebenfalls linear, jedoch versagten diese bereits bei einer Änderung der Holzfeuchte von rund 1 % durch Rissbildung. Da die Rissbildung der Prüfkörper 18 und 24 mit den geringsten Querschnittshöhen sich über einen längeren Zeitraum erstreckte, weicht der Verlauf von einem linearen Zusammenhang ab.

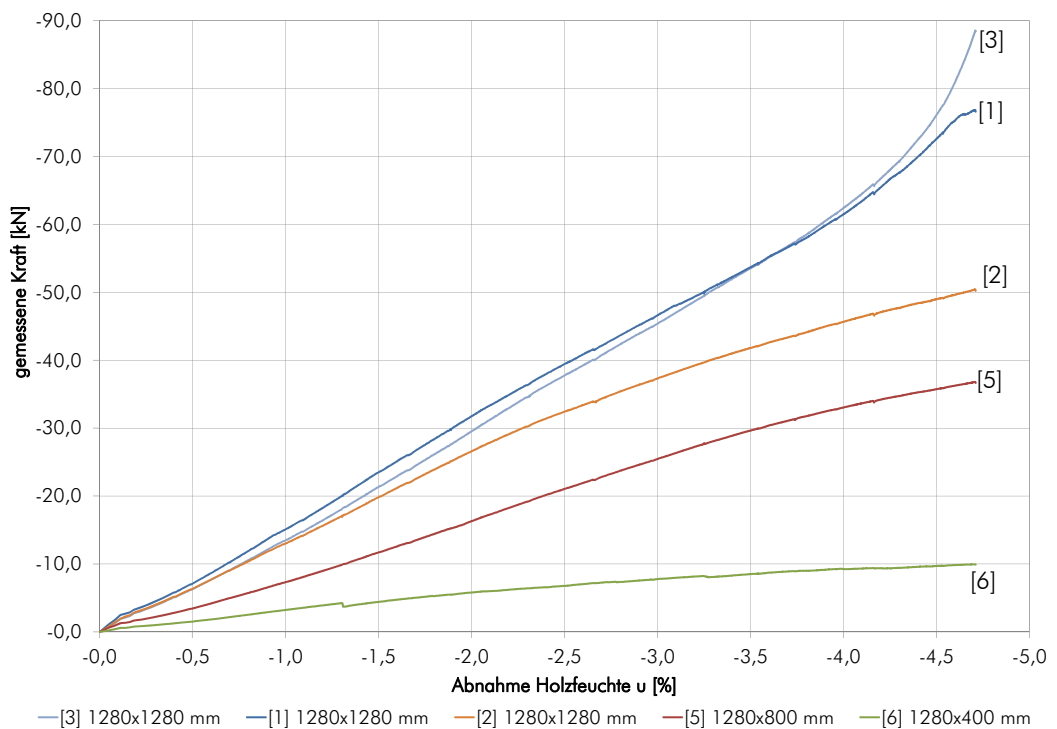


Abb. 1.38 Kraftverlauf in den Schraubstangen der Gruppe 1 aufgrund einer Änderung der Holzfeuchte

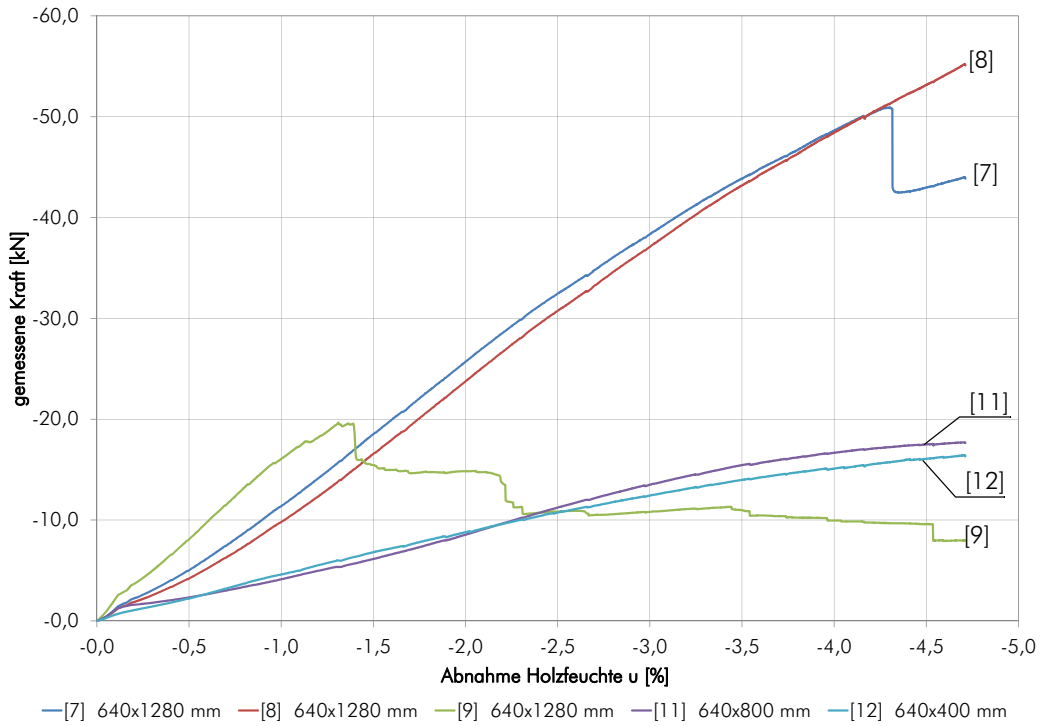


Abb. 1.39 Kraftverlauf in den Schraubstangen der Gruppe 2 aufgrund einer Änderung der Holzfeuchte

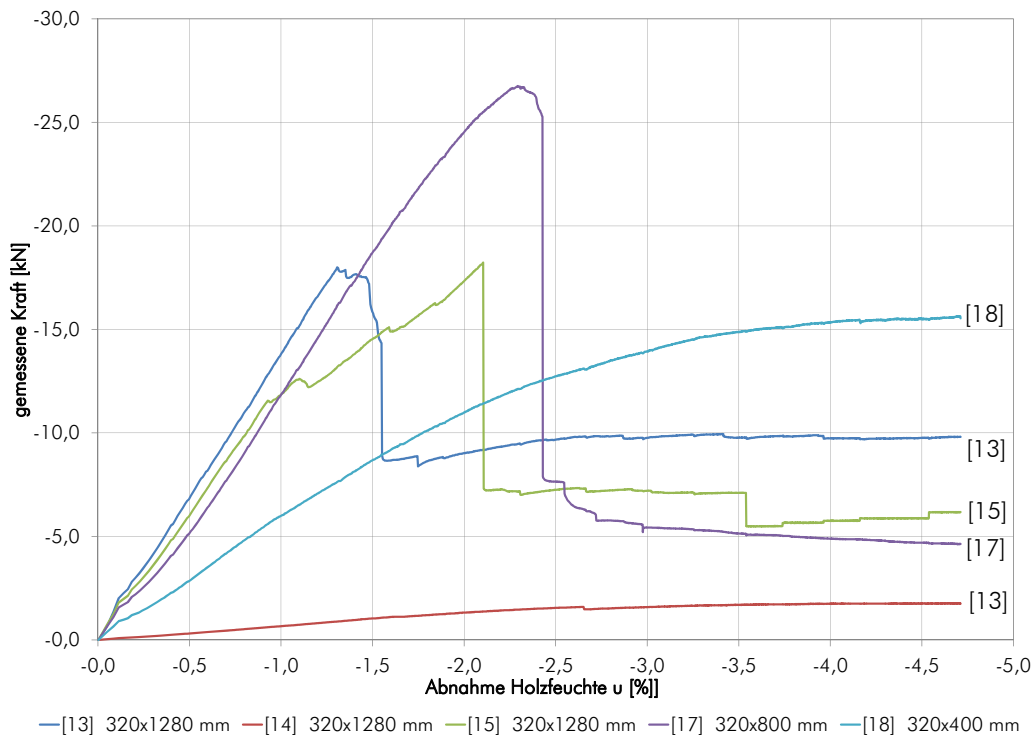


Abb. 1.40 Kraftverlauf in den Schraubstangen der Gruppe 3 aufgrund einer Änderung der Holzfeuchte

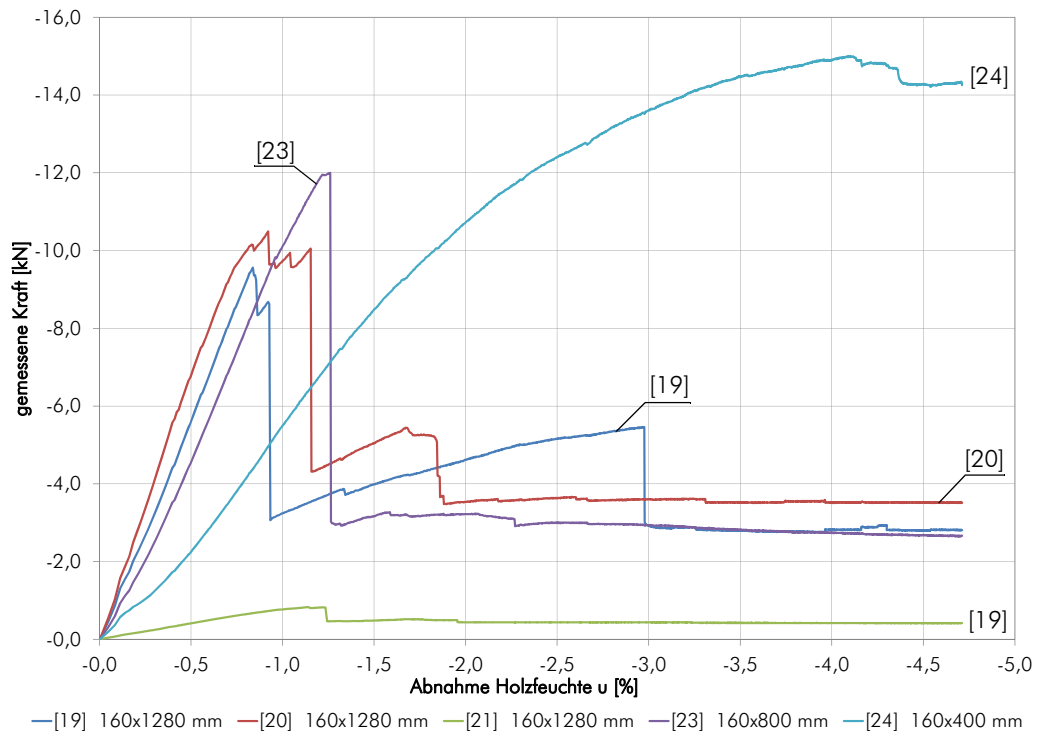


Abb. 1.41 Kraftverlauf in den Schraubstangen der Gruppe 4 aufgrund einer Änderung der Holzfeuchte

Aufgrund der dargestellten Verläufe ergibt sich folgende vereinfachte Gleichung für die Kraft in der Schraubstange zufolge einer Änderung der Holzfeuchte um Δu :

$$F_{ax,\Delta u} = \frac{(k_1 + k_2 \cdot l_p^3) \cdot h_p \cdot \Delta u}{h_{ref}} \quad (1.5)$$

Wobei:	$F_{ax,\Delta u}$...Kraft in Schraubstange zufolge Holzfeuchteänderung [kN]
	k_1	...12,612 empirisch ermittelter Wert
	k_2	... $1,426 \cdot 10^{-9}$ empirisch ermittelter Wert
	l_p	...Länge des Prüfkörpers [mm]
	h_p	...Höhe des Prüfkörpers [mm]
	Δu	...Änderung der Holzfeuchte [%]
	h_{ref}	...1280 mm

Die Gleichung liefert eine Näherung für den linearen Bereich der Kraftänderung bzw. bis zum Eintreten der ersten Rissbildung. Da es bei den Prüfkörpern der Gruppen 3 und 4 bereits bei einer Holzfeuchteänderung Δu von 1 % zur Rissbildung kam, konnten die Daten nur bis zu dieser Holzfeuchteänderung ausgewertet werden.

Bei den Prüfkörpern der Gruppen 1 und 2 wurden die Daten für den annähernd linearen Bereich, (entspricht einer Holzfeuchteänderung $\Delta u = 4\%$) ausgewertet. Der Gültigkeitsbereich für Glg. 1.4 welcher von der jeweiligen Gruppe abhängig ist kann Tab. 1.3 entnommen werden.

Gruppe	Δu [%]
1	4,0 %
2	4,0 %
3	1,0 %
4	1,0 %

Tab. 1.3 Gültigkeitsbereich der Holzfeuchteänderungen für Glg. (1.4)

In Abb. 1.42 wird der tatsächliche Verlauf der Kräfte mit dem berechneten Verlauf exemplarisch für die Prüfkörper der Gruppe 2 verglichen. Die Abweichung von Prüfkörper 11 resultiert aus einer frühen Rissbildung.

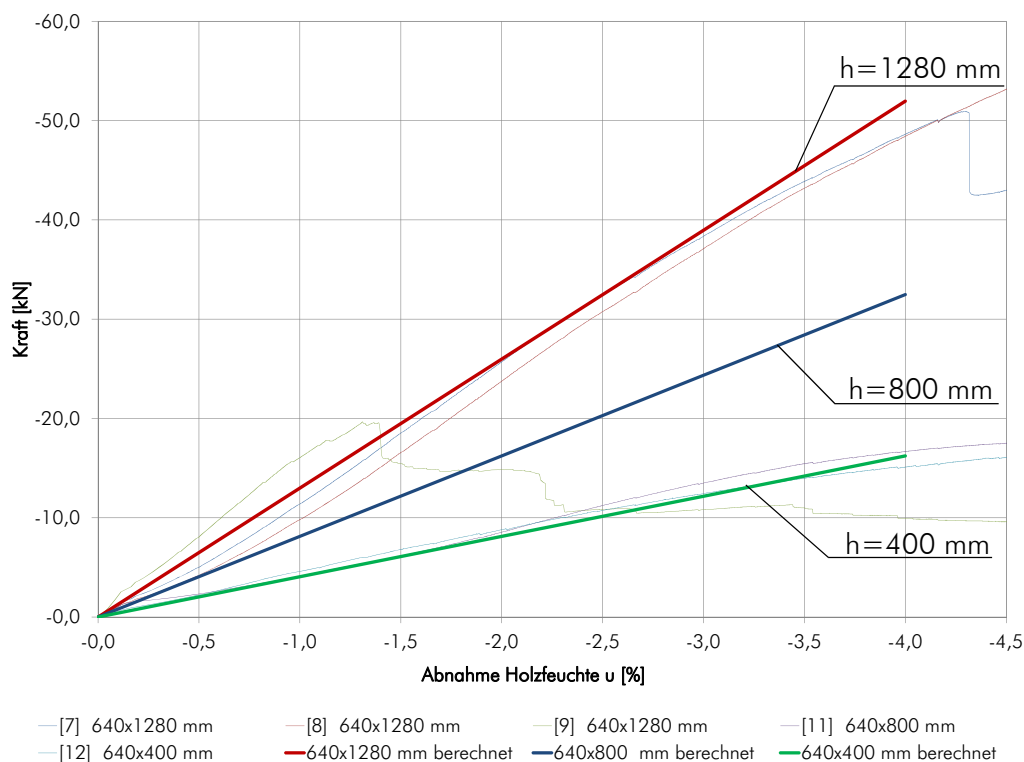


Abb. 1.42 berechneter Kraftverlauf des vereinfachten Modells für Prüfkörper der Gruppe 2

Das vorgestellte vereinfachte Modell ermöglicht somit eine erste Abschätzung der Spannungen bzw. Kräfte in den Prüfkörpern für die untersuchte Konfiguration.

Es berücksichtigt jedoch nicht den tatsächlichen Feuchteverlauf über den Querschnitt. Dadurch werden die Eigenspannungen im Holz aufgrund des Feuchtegradienten im Querschnitt vernachlässigt.

Um eine klare Aussage über den Zusammenhang der Kraft in der Schraubstange abhängig von der Höhe des Prüfkörpers treffen zu können, welcher hier näherungsweise linear angenommen wurde da zu wenig Daten vorlagen, bedarf es weiterer Untersuchungen, die eine statistische Auswertung ermöglichen.

Mit zunehmender Holzfeuchtedifferenz Δu weicht der Verlauf der Kraft von einem linearen Zusammenhang ab. Für eine spätere Anwendung in der Praxis sollte dieser Bereich der Holzfeuchteschwankungen jedoch ausreichend sein.

Die genannten Parameter müssen für eine weitere, detailliertere Modellbildung noch untersucht bzw. berücksichtigt werden.

Schlussbetrachtung

1 Resümee

Holz ist als hygroskopisches Material immer bestrebt, mit seinem Umgebungsklima ein Gleichgewicht herzustellen. Daraus resultieren je nach Umgebungsklima unterschiedliche Holzfeuchten. Bedingt durch diese unterschiedlichen Holzfeuchten kommt es zu Volumenänderungen in Form von Quellen und Schwinden. Da die Änderung der Holzfeuchte jedoch nicht über den Querschnitt konstant ist, entstehen selbst im ungestörten Holzquerschnitt ohne äußere Lasteinwirkung hohe Spannungen. Diese können durchaus zu Querszugrissen bzw. zu Schwindrissen führen. Der Grund dafür liegt in der vergleichsweise niedrigen aufnehmbaren Querszugfestigkeit f_{t90} von Holz.

Überschreiten bei einer Bemessung die auftretenden Querszugspannungen zufolge einer reinen äußeren Einwirkung die zulässigen Spannungen, so müssen Verstärkungsmaßnahmen angeordnet werden. Die Bemessung berücksichtigt jedoch keine Eigenspannungen zufolge einer Änderung der Holzfeuchte u.

Die hier betrachtete Lösung in Form von Schraubstangen mit Gewinde nach DIN 7998 [3] stellt grundsätzlich eine einfache und elegante Möglichkeit zur Querszugverstärkung dar, da bei diesem System auf eine Klebung verzichtet werden kann. Es kommt es auch bei einer nachträglichen Sanierung zum Einsatz.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung zeigten, dass es durch den Schwindvorgang bei den Prüfkörpern zu hohen Kräften bzw. Spannungen in der Schraubstange, und dementsprechend zu hohen Querszugbeanspruchungen im umgebenden Holz kam.

Höchst unerwartet war die unverzügliche Reaktion des Holzes nach Umstellen des Klimas von 90 % Luftfeuchte auf 40 % Luftfeuchte bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. Der Kraftgradient war in den ersten Tagen sehr groß, sodass sich bereits nach einer Woche Kräfte von rund 20 kN in den Schraubstangen einstellten. Bei einer Holzfeuchteänderung von 4 % konnten Kräfte in den Schraubstangen von bis zu 63 kN beobachtet werden. Vergleicht man diese Kraft mit dem Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit $R_{ax,d}$ von 72,40 kN so erkennt man die Tragweite der feuchteinduzierten Beanspruchung bei Schraubstangen.

Mit einer Überprüfung der Schraubstangen nach Abschluss der Messungen soll sichergestellt werden, dass die aufgebrachten Dehnmessstreifen nach der Messung dasselbe Verhalten wie vor Beginn der Prüfungen aufweisen und die Messergebnisse somit bestätigt werden können.

Bei den Prüfkörpern der Gruppe 3 und 4 wurde sehr schnell die zulässige Querszugspannung überschritten, was zu Querszugrissen im Querschnitt führte. Grundsätzlich stellten sich diese bei allen Prüfkörpern ein. Nicht in allen Fällen kam es dadurch jedoch zu einem Kraftabfall in der Schraubstange.

Die Frage nach der wirksamen Einflussbreite einer Schraubstange konnte noch nicht geklärt werden, da zum jetzigen Zeitpunkt die Ergebnisse aus der fotogrammetrischen Messung noch nicht vorlagen. Vergleicht man jedoch die Verformungen aus der Messung mittels Messschieber, so dürfte die Einflussbreite einer Schraubstange größer als die gewählte maximale Prüfkörperlänge von 1280 mm sein. Das Schwinden des Prüfkörpers 4 war um rund 3 mm geringer, als jenes Schwinden von Prüfkörper 1 mit Schraubstange.

Die Ergebnisse der Feuchtemessung zeigten einmal mehr, dass die Bestimmung der Holzfeuchte u starken Schwankungen unterworfen ist. Durch den inhomogenen Aufbau des Holzes weisen die Darrproben eine starke Variation auf. Messungen mittels kapazitiver und Widerstandsmessung lieferten vergleichsweise eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Abschließend kann man feststellen, dass durch Feuchteschwankungen im Holz hohe Zwängungsspannungen in den Schraubstangen und im umgebenden Holz auftreten können, welche im Rahmen der Nachweisführung zu berücksichtigen sind.

2 Ausblick auf geplante Forschungen

In dieser Arbeit wurden die Vorgänge beim behinderten Schwinden untersucht. Weitere Arbeiten sollten den Vorgang des Quellens behandeln. Beim Quellvorgang entstehen Zugspannungen in den Schraubstangen, welche sich unter Umständen mit den Zugspannungen zufolge einer äußeren Lasteinwirkung überlagern würden. Für die Schraubstangen würde sich dadurch eine ungünstigere Lastfallkombination als beim Schwinden einstellen.

Aufbauend auf den durchgeführten Prüfungen soll in weiterer Folge eine detaillierte numerische Simulation durchgeführt werden.



Literatur

1 Normen

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1: 2009-07-01
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
Teil 1-1: Allgemeines
Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [2] DIN 1052: 2008-12
Entwurf Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken -
Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [3] DIN 7998: Gewinde und Schraubendünen für Holzschrauben
Februar 1975
- [4] ÖNORM EN 1194:1999
Holzbauwerke-Brettschichtholz-Festigkeitsklassen und Bestimmung charak-
teristischer Werte
Ausgabe: 1999-09-01

2 Bücher/Dissertationen/Abschlussarbeiten

- [5] Kollmann F.
„Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“
Springer-Verlag, erster Band, zweite Auflage / 1951
- [6] Niemz P.
„Holz; Anatomie-Chemie-Physik; Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“
DRW-Verlag, erster Band, zweite Auflage / 1993
- [7] Göttlein C.
„Entwicklung und Markteinführung eines Verstärkungsmittels für den konstruktiven Holzbau“
Diplomarbeit, Fachschule Rosenheim (unveröffentlicht) / 2006
- [8] Time B.
„Hygroscopic Moisture Transport in Wood“
Doctor thesis, Norwegian University of Science and Technology / 1998
- [9] Forsen H., Tarvainen V.
„Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters“
VTT, TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINNLAND / 2000
- [10] Brischke C.
„Untersuchung abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile“
Dissertation, Department Biologie der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg / 2007
- [11] Sonderegger W.
„EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS ON THE HEAT AND WATER TRANSPORT IN WOOD AND WOOD-BASED MATERIALS“
Dissertation, ETH Zurich / 2011
- [12] Hartl H., Ramberger G.
„Stahlbau und konstruktiver Holzbau“
1. Auflage / 1985

3 Berichte/Skripten

- [13] Schickhofer G.;
„Holzbau- Der Roh-und Werkstoff Holz
Skript S-4-01A / 2006
- [14] Angst V., Kjell A. Malo
„Moisture induced stresses perpendicular to the grain in glulam: Review and evaluation of the relative importance of models and parameters“
Department of Structural Engineering, NTNU Norwegian
University of Science and Technology, Trondheim, Norway
Holzforschung Vol. 64 / 2010
- [15] Möhler K., Steck G.
„Untersuchungen über die Rißbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung“
bauen mit holz 4/80
- [16] Häglund M.
„Moisture Induced Stress Perpendicular to Grain in Timber structures“
Doctoral Thesis Report TVBK-1036
Lund Institute of Technology Sweden / 2009
- [17] Häglund M.
„Varying moisture content and eigen-stresses in timber elements“
Wood Mater. Sci.
Lund Institute of Technology Sweden / 2009
- [18] Shi, S.Q:
„Diffusion model based on Fick's second law for the moisture absorption process in wood fiber-based composites: is it suitable or not?“
Wood Sci. Technol. 41 / 2007
- [19] Comstock, G.L.
„Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption, and steady state data.“
Forest Prod. J. / 1963
- [20] Aicher S., Dill-Langer G.
„Climate induced stresses perpendicular to the grain in glulam.“
Otto-Graf-J / 1997
- [21] Cai L., Avramidis S.
„A study on the separation of diffusion and surface emission coefficients in wood.“
Dry. Technol. 15 / 1997

-
- [22] Jönsson J., Thelandersson S.
„The effect of moisture gradients on tensile strength perpendicular to grain in glulam“
Holz als Roh- und Werkstoff 61 / 2003
- [23] Keylwerth R.
„Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz“
Mitteilung aus dem Institut für Holzphysik und mechanische Holztechnologie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft
Holz als Roh- und Werkstoff 20 / 1962
- [24] Popper R., Niemz P.
„Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten“
Bauphysik 31, Heft 2 / 2009
- [25] Derome D.
„3D swelling/shrinkage of spruce wood at cellular scale“
EMPA Wood Laboratory, Präsentation COST Action FP0802, Hamburg / 2010
- [26] Stig L. Bardage
„Basic mechanism of secondary cell wall formation in softwood tracheids“
Department of Forest Products: Wood Science SWEDEN
- [27] Tsoumis G.
„SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WOOD, Structure, Properties, Utilization“
VNR-Verlag / 1991
- [28] Blaß H.J., Krüger O.
„Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen“
Karlsruher Berichte zum Ingenieurbau, Band 15 / 2010
- [29] Ehlbeck J., Belchior-Gaspard P., Gerold M.
„Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern“
Forschungsbericht, Universität Karlsruhe / 1992
- [30] Fragiaco M.
„Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to different climates“
Engineering structures 33 / 3071-3078 / 2009
- [31] Gerold M.
„Verbund von Holz und Gewindestangen aus Stahl“
Bautechnik 69, Heft 4 / 1992
-

- [32] Fueyo J. G., Cabezas J. A., Rubio M.P., Dominguez M.
„Reduction of perpendicular-to-grain stresses in the apex zone of curved beams using glued-in rods“
Material and Structures 43:463-474 / 2010
- [33] Hollinsky K.
„In Brettschichtholz eingeklebte Stabelemente: Verhalten bei wechselnden klimatischen Bedingungen“
Holzforschung und Holzverwertung Nr. 1 / 1992

4 Zulassungen/ Produktinformationen

- [34] Befestigungssystem WB von SFS intec
„Querzugverstärkung, Allgemeine Bemessungsgrundregeln“
Datenblatt Nr. 01

5 Internet

- [35] <http://www.zamg.ac.at/>

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl