



Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Master-Thesis

Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Feuchte an Fichtenholz mit dem gravimetrischen Messverfahren sowie dem elektrischen Widerstandsmessverfahren und Entwicklung einer Kalibrierfunktion für elektronische Holzfeuchte-Messgeräte

Experimental studies for the determination of timber moisture on spruce timber by gravimetric measuring method and electric resistive measuring method and development of functions of calibration for electronic measuring instruments of timber moisture

zur Erlangung des Grades eines

Master of Science

der Hochschule Wismar

eingereicht von: Dipl.-Ing. (FH) Dirk Schwedland
geboren am 09. Oktober 1968 in Wittstock/Dosse
Studiengang Master Bautenschutz

Betreuer: Frau Dr.-Ing. Gesa Haroske

weitere Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. Olaf Niekamp

Werder, den 01. Oktober 2015

Inhalt

Inhalt

I Bildverzeichnis

II Abkürzungsverzeichnis

III Formelzeichenverzeichnis

1. Zusammenfassung / Summary

2. Einleitung und Problemstellung

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Holz im Allgemeinen und Fichte im Besonderen

3.2. Begriffe, Definitionen, Interpretationen

3.2.1. Holzfeuchte, Feuchtegehalt

3.2.2. Kalibrierung

3.2.3. Messunsicherheit

3.3. Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) und
Holzfeuchtemessgeräte im Allgemeinen

3.4. Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) und
Holzfeuchtemessgeräte auf Basis elektrischer
Widerstandsmessung im Besonderen

3.4.1. Status des Messverfahrens

3.4.2. Messprinzip

3.4.3. Normen und Vorschriften

3.4.4. Messbereiche und Messgenauigkeiten

3.4.5. Messabweichungen

3.4.5.1. Systematische Messabweichungen

3.4.5.2. Zufällige Messabweichungen

3.4.5.3. Grobe Messabweichungen

3.4.5.4. Einflussfreie Kenngrößen

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1. Messmethode

4.2. Prüfkörper

4.3. Messgeräte

4.3.1. Messgerät 1

4.3.2. Messgeräte 2 und 3

4.3.3. Messgerät 4

4.4. Klimaschrank

4.5 Trockenschrank

- 4.6. Versuchsanordnungen
 - 4.6.1. Versuchsanordnung C
 - 4.6.1.1. Vergleich der (unterschiedlichen) Trendlinien
 - 4.6.1.2. Definition einer Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion
 - 4.6.2. Versuchsanordnung D
 - 4.6.2.1. Vergleich der (unterschiedlichen) Trendlinien
 - 4.6.2.2. Definition einer Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion
- 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung
 - 5.1. Systematische Messabweichung SM-1
 - 5.2. Systematische Messabweichungen SM-2, SM-3
 - 5.3. Systematische Messabweichung SM-4
 - 5.4. Systematische Messabweichung SM-5
 - 5.5. Systematische Messabweichung SM-6
 - 5.6. Systematische Messabweichung SM-7
 - 5.7. Systematische Messabweichung SM-8
 - 5.8. Zufällige Messabweichung ZM-1
 - 5.9. Zufällige Messabweichung ZM-2
 - 5.10. Zufällige Messabweichung ZM-3
 - 5.11. Zufällige Messabweichung ZM-4
 - 5.12. Zufällige Messabweichung ZM-5
 - 5.13. Zufällige Messabweichung ZM-6
 - 5.14. Zufällige Messabweichung ZM-7
 - 5.15. Grobe Messabweichungen
- 6. Thesen
- 7. Literatur
- 8. Ehrenwörtliche Erklärung
- 9. Anlagenverzeichnis

I Bildverzeichnis

Bild 1: Keilstück eines Baumes am Beispiel 4-jähriger Kiefernstamm	11
Bild 2: Querschnitt: Zellwände mit Zellhohlräumen (Fichte)	13
Bild 3: Wasseranteil im Holz – Schwinden und Quellen	15
Bild 4: Wasseranteil im Holz – Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz	15
Bild 5: Fichte – Tangentialschnitt	16
Bild 6: Prüfadapter für HMW Firma GANN	21
Bild 7: Darstellung der Parameter „Präzision“ und „Richtigkeit“	24
Bild 8: Mikrocontroller	28
Bild 9: Position für die Messung nach DIN EN 13183-2	31
Bild 10: Schematische Darstellung des Messbereichs bei unisolierten Elektroden und isolierten Elektroden	31
Bild 11: Abhängigkeit des Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit vom Feuchtegehalt	36
Bild 12: Fichte, mikroskopischer Querschnitt	39
Bild 13: Kiefer, mikroskopischer Querschnitt	40
Bild 14: Eiche, mikroskopischer Querschnitt	40
Bild 15: Buche, mikroskopischer Querschnitt	41
Bild 16: Übersicht anerkannter Holzfeuchtemessgeräte	43
Bild 17: Schematische Darstellung des Ionenstroms bei unisolierten Elektroden und isolierten Elektroden	48
Bild 18: Arten von handelsüblichen Elektroden für HMW	49
Bild 19: Zellwandschichten einer Nadelholztracheide	52
Bild 20: Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Holz	54
Bild 21: Beispielhafte Veränderung von Feuchtegradienten in BSH-Bauteilen	56
Bild 22: Sorptionsdiagramm – Hygroskopische Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte	60
Bild 23: Sorptionskurven	60
Bild 24: Quellung und Schwindung von Holz nach DIN 52184	61

Bild 25: Rohlinge 1 und 2	67
Bild 26: Rohlinge 3 und 4	67
Bild 27: Prüfkörper nach Versuchsende	69
Bild 28: Schematische Darstellung der Prüfkörper-Anfertigung	70
Bild 29: Elektroden mit Kabel und Steckhülsen	72
Bild 30: Elektroden im eingebauten Zustand mit Darstellung des Messbereiches	72
Bild 31: Messgerät 1	73
Bild 32: Zusammenhang $10 \cdot \log(R)$ und Widerstand	74
Bild 33: Umrechnung Logarithmus	74
Bild 34: Aufzeichnung Langzeitmessung für die Phase der Adsorption	75
Bild 35: Aufzeichnung Langzeitmessung für die Phase der Desorption	75
Bild 36: Messgerät 2	77
Bild 37: Messgerät 3	77
Bild 38: Messgerät 4	78
Bild 39: Klimaschrank	79
Bild 40: Versuchsanordnung C – Diagramm Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion	85
Bild 41: Skizze einer (möglichen) „Feuchtekette“ für Bauholz	86
Bild 42: Versuchsanordnung D – Diagramm Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion	91
Bild 43: Diagramm Gegenüberstellung Kalibrierkurven und Kalibrierfunktionen für Versuchsanordnungen C und D	93
Bild 44: Prüfkörper mit unterschiedlicher Feuchteverteilung (Feuchtegradient) in der Phase der Trocknung	102

II Abkürzungsverzeichnis (sofern nicht im Text beschrieben)

A.d.V.	Anmerkung des Verfassers
Abk.	Abkürzung
annäh.	annähernd
bearb.	bearbeitet von
bzw.	beziehungsweise
BROOKHUIS	Firma Brookhuis Applied Technologies WOOD Institutenweg 15, 7521 PH Enschede, Niederlande
BRO196	HMW Fabrikat FMD der Firma BROOKHUIS – Schalterstellung 196 – europäische Fichte
BRO555	HMW Fabrikat FMD der Firma BROOKHUIS – Schalterstellung 555 – nordische Fichte
ca.	zirka (ungefähr)
d.h.	das heißt
d.V.b.	Bild durch Verfasser nachträglich bearbeitet (verändert)
DIN EN 350-2	DIN EN 350-2:1994-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz, Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa
DIN EN 13183-1	DIN EN 13183-1:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-1:2002-07:2003-12
DIN EN 13183-2	DIN EN 13183-2:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands- Messverfahren einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-2:2002-07:2003-12
f.	folgende Dokumentenseite
ff.	folgende Dokumentenseiten (mehrere)
Fi.	Fichte
GANN	Firma GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, Schillerstraße 63, 70839 Gerlingen, Deutschland
GAN6-5	HMW Fabrikat Hydromette RTU 600 der Firma GANN – Schalterstellung 6-5 – mitteleuropäische Fichte
GAN7-3	HMW Fabrikat Hydromette RTU 600 der Firma GANN – Schalterstellung 7-3 – skandinavische Fichte

ggf.	gegebenenfalls
GUM	Technische Regel: ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 – Titel (deutsch): Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
Hrsg.	Herausgeber
H.d.V.	Hervorhebung des Verfassers
HMW	elektronische(s) Holzfeuchte-Messgerät(e) auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes
lt.	laut
MPA Stuttgart	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart, Deutschland
Nr.	Nummer
o.ä.	oder ähnliches
o.g.	oben genannt(en)
P.	Punkt(e)
pH-Wert	Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung
r.L.	relative Luftfeuchte
S.	Seite(n)
SCANNTRONIK	Firma Scanntronik Mugrauer GmbH, Parkstraße 38, 85604 Zorneding, Deutschland
u.a.	unter anderem
USA	Vereinigte Staaten von Amerika (englisch: United States of America)
u.w.	und weitere
V	Volt
z.B.	zum Beispiel
[!]	offensichtlicher Fehler im Original

III Formelzeichenverzeichnis (sofern nicht im Text beschrieben)

g	Gramm
Ω	Ohm
+	plus
+/-	plus/minus
%	Prozent
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
K	Kelvin
μS	microSiemens ($1 \mu\text{S} = 10^{-6} \text{ S}$)
mS	milliSiemens ($1 \text{ mS} = 10^{-3} \text{ S}$)
S	Siemens – Maßeinheit elektrische Leitfähigkeit
cm	Zentimeter
cm^3	Kubikzentimeter
m	Meter
m^3	Kubikmeter

1. Zusammenfassung / Summary

In der vorliegenden Arbeit wurde anhand von Fichte das Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz mittels elektrischer Widerstandsmessung analysiert und das Prinzip der Kalibrierung entsprechender Messgeräte aufgezeigt.

Durch die Auswertung vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse und selbst durchgeführter praktischer Versuche wurde dargestellt, dass eine Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz mittels o.g. Verfahren für einen Anwendungsbereich von ca. 7 % bis ca. 30 % zweckmäßig und auch ausreichend ist, um für Holz die Änderung von bau-relevanten Eigenschaften bzw. Gefährdungen zu erkennen.

Mittels einer umfangreichen Analyse möglicher Messabweichungen wurde aber auch dargestellt, dass das Verfahren mit Messunsicherheiten behaftet ist.

Diese Arbeit soll dem Anwender bzw. der Anwenderin von elektronischen Holzfeuchte-Messgeräten auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes vermitteln, dass ihm/ihr die Beurteilung von Messabweichungen bzw. Messunsicherheiten obliegt und soll ihm/ihr dahingehend Ursachen und Wirkungen aufzeigen.

In the present thesis was analyzed the procedure for the determination of moisture content of timber on the basis of spruce by electric resistance measurement and present the principle of calibration of relevant measuring instruments.

By analysis of available scientific findings and self-conducted practical studies was represented, that the determination of moisture content of timber by named above procedure for the range of application from circa 7 per cent up to circa 30 per cent is practicably and also sufficiently in order to find out the changing of relevant characteristics and accordingly hazards.

By comprehensive analysis of possible error of measurements was also represented, that this process is afflicted with uncertainty of measurement.

This thesis shall arbitrate the user of electronic measuring instruments of timber moisture based on electric resistant measurement, that fall to him the assessment of error of measurement or measurement uncertainty and shall arbitrate him cause and effect.

2. Einleitung und Problemstellung

Derzeit international standardisierte und unstrittige Methoden zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) sind direkte Messverfahren (z.B. Darrverfahren).

Diese (direkten) Messverfahren stellen jedoch zerstörende Prüfverfahren dar, d.h. es erfolgt ein Eingriff in den Werkstoff bzw. Baustoff, welcher mit optischen und ggf. statischen Einschränkungen verbunden ist. Zudem sind diese Prüfverfahren relativ aufwendig und in der Praxis oftmals nicht durchführbar.

Daher haben sich für die Praxis u.a. elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes (nachfolgend HMW abgekürzt) als ein zerstörungsfreies [DIN13183-2], leicht und schnell handhabbares Prüfverfahren etabliert.

Die Funktionsweise von HMW basiert auf einer Kalibrierung und diese wiederum auf einem „Normal“.

„Für die Holzfeuchtemessung gibt es kein (**einheitliches**, A.d.V.) Normal und keine von einem sonstigen staatlich anerkannten Institut vorgegebene Werte (Ausnahme: Die vom Otto-Graf-Institut an der MPA Stuttgart für den anerkannten Holzleimbau nach DIN 1052 vorgegebene Kalibrierkurve für die Holzart Fichte).

Die Kalibrierkurven für die einzelnen Holzarten bzw. Bau- und Isolierstoffe werden von seriösen Geräteherstellern selbst erstellt. Die aufwendige Erstellung erfolgt über eine Vielzahl von Messreihen für jede einzelne Holzart bzw. für jeden Bau- oder Isolierstoff mittels des Darrverfahrens. Die so erstellten Kalibrierkurven gehören zu den Betriebsgeheimnissen eines Herstellers.“ [GA1;S.88]

Ziel dieser Master-Thesis ist es anhand von Fichtenholz (für HMW):

- **diesen *Betriebsgeheimnissen* „auf die Spur zu kommen“;**
- **Anwendungsbereich und Unsicherheiten des elektrischen Widerstands-Messverfahrens zu analysieren und**
- **den Weg zur Erstellung einer (eigenen) Kalibrierfunktion aufzuzeigen.**

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Holz im Allgemeinen und Fichte im Besonderen

Holz ist die lignin- und zellulosehaltige Substanz zwischen Markröhre und Rinde eines Baumes oder Strauches in der Form stehender oder gefällter Bäume oder Sträucher oder solches der ersten Verarbeitungsstufen (Sägen, Entrinden, Zerspanen). Der Begriff Holz umfasst nicht Holzwerkstoffe und Holzspäne.

[DIN EN 1001-2;P.1.44+1.54]

Um eine Vorstellung vom Aufbau des Holzes zu erhalten, sei der Keilschnitt eines Baumes vorangestellt (Bild 1).

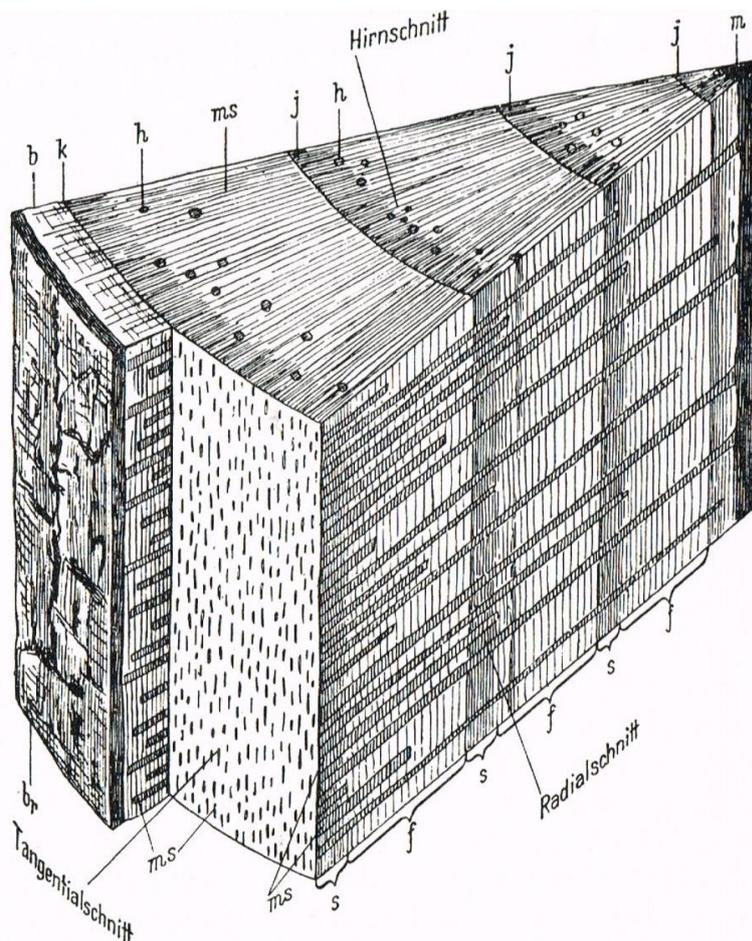


Bild 1. Keilstück aus einem 4jährigen Kiefernstamm. (Nach E. Strasburger *b* Bast, *br* Borke, *f* Frühholz, *h* Harzkanal, *j* Jahrringgrenze, *k* Kambium, *m* Mark, *ms* Markstrahl, *s* Spätholz.)

Bild 1: Keilstück eines Baumes am Beispiel 4-jähriger Kiefernstamm [KO2;S.1]

Entsprechend dem Keilstück (Bild 1) sind zu unterscheiden:

folgende Baumschichten (von außen nach innen):

- die **Außenrinde** oder Borke;
- die **Innenrinde** oder Bast;
- das **Kambium**, eine dünne Haut zarter, lebender Zellen;
- die **Holzmasse**, die den größten Teil des Stammes ausfüllt;
- den im Innern verlaufenden **Markstrang**; [KO2;S.1f.]

bzw.

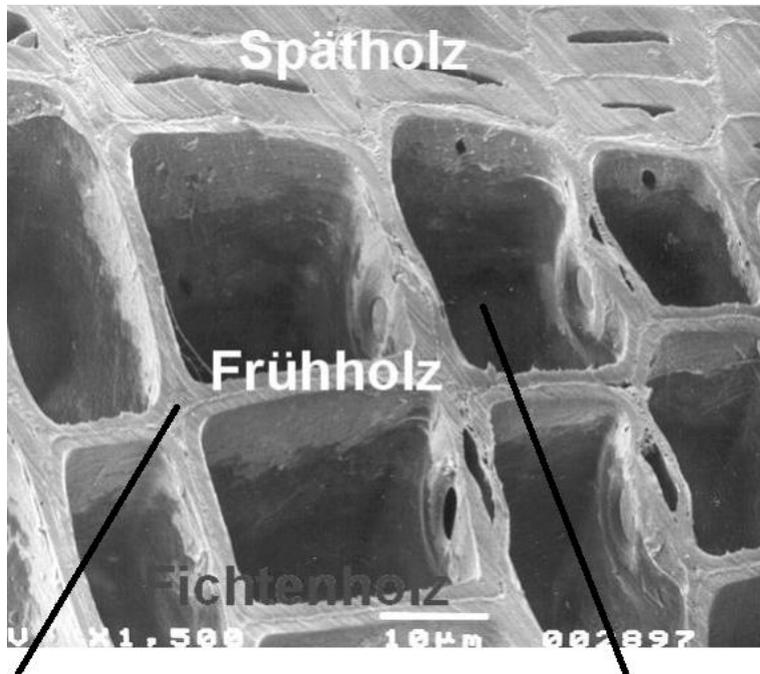
folgende Hauptschnittrichtungen mit den dazugehörigen Flächen:

- **Hirnschnitt bzw. Querschnitt** – quer zur Stammachse in Richtung der Holzstrahlen; **Hirnfläche**;
- **Radialschnitt bzw. Riftschnitt** – parallel zur Stammachse in Richtung der Holzstrahlen (Marktstrahlen) bzw. senkrecht zu den Zuwachszonen (Kambium) im Winkel von etwa 90°; **Radialfläche**;
- **Tangentialschnitt bzw. Fladerschnitt** – parallel zur Stammachse quer zu den Holzstrahlen (Marktstrahlen) bzw. tangential zu den Zuwachszonen (Kambium) < 45°; **Tangentialfläche**. [WÜ;S.22]

„Holz ist ein sekundäres Dauergewebe der Bäume und Sträucher und wird durch eine ringförmige Bildungsschicht, dem Kambium, erzeugt. Dieses Kambium erweitert ständig seinen Umfang und teilt nach innen Holzzellen (Xylem) und nach außen Rindenzellen (Phloem) ab; dabei bleibt der Rindenzuwachs gegenüber dem Holzzuwachs weit zurück. **Holz setzt sich aus einer Vielzahl von axial und radial gerichteten Zellen unterschiedlicher Art, Größe, Form, Anzahl und Verteilung zusammen** und ist das Ergebnis eines Differenzierungswachstums in Verbindung mit einem Flächen- und Dickenwachstum der Zellwände. **Gleichartige Zellen verbinden sich zu Geweben**, die insbesondere der Festigung, Wasserleitung und Stoffspeicherung dienen“ [WÜ;S.19] (H.d.V.)

Entsprechend dem Holzaufbau wird differenziert nach Nadelhölzern und Laubhölzern. Nadelhölzer sind entwicklungs-technisch älter als Laubhölzer und haben diesen gegenüber einen verhältnismäßig einfachen und regelmäßigen Holzaufbau.

„Holz ist ein fester Verband unzähliger (überwiegend, A.d.V.) röhrenförmiger, pflanzlicher Zellen, die (überwiegend, A.d.V.) annähernd parallel zur Achse des Baumstammes ausgerichtet sind. Jede einzelne Zelle besteht aus der Zellrohrwand und dem von ihr eingeschlossenen Zellhohlraum -Lumen- oder Porenraum. Auch zwischen den Zellen existieren Hohlräume die Interzellularräume.“ [DI;S.2]



Zellwand –

Einlagerung von
gebundenem Wasser

Zellhohlraum (Lumen, Porenraum)

Einlagerung von
freiem Wasser

Bild 2: Querschnitt: Zellwände mit Zellhohlräumen (Fichte) [NI3;S.44]

„Die Zellwände des Holzgewebes bestehen im Wesentlichen aus Zellulose-Hemizellulose- und Lignin-Makromolekülen, die unterschiedlich häufig vernetzt sind. Kristalline und amorphe Zonen wechseln einander ab. Zellulose-Molekülketten sind dabei in der Lignin-Matrix gleichsam eingebettet. Die so aufgebaute Zellwand enthält zahlreiche feine und feinste Kapillaren. Holz wird deshalb auch als kapillar-poröser Stoff bezeichnet, dessen „innere“ Oberfläche etwa 250 m²/g beträgt. (H.d.V.)

Die chemischen Bestandteile der Zellwand besitzen eine unterschiedlich große Affinität (Bestreben von Atomen eine Bindung einzugehen, A.d.V.) zu Wassermolekülen. Holz verhält sich deshalb hygroskopisch. Die Lagerung eines darrgetrockneten Holzes in einer wasserdampfhaltigen Atmosphäre bewirkt eine Anlagerungsreaktion von Wassermolekülen an die nicht abgesättigten Hydroxyl-Gruppen der Zellulose-Moleküle. Diese sogenannte **Chemosorption** innerhalb der den Wassermolekülen zugänglichen amorphen Bereiche (keine geordnete Atom-Struktur, A.d.V.) der Mikrofibrillen (Bestandteile der pflanzlichen

Zellwand, A.d.V.) führt zunächst zu einer einlagigen Beschichtung der inneren Oberfläche mit Wassermolekülen. Die **Holzfeuchte** liegt dabei **etwa** im Bereich **0-6 %**.

Bei einer relativen Luftfeuchte bis etwa 60 % wird von den Zellwänden weiteres Wasser aufgenommen. Infolge elektrochemischer Anziehungskräfte zwischen den Wassermolekülen werden weitere Wassermolekülschichten durch **Adsorption** angelagert. Die **Holzfeuchte** beträgt in diesem Abschnitt der Sorption **etwa 5-15%**.

Die Kapillarstruktur begünstigt bei weiter zunehmender relativer Luftfeuchte bis hin zur Sättigung (100 % relative Luftfeuchte, A.d.V.) eine zunehmende **Kapillarkondensation**. Oberhalb von etwa 15 % Holzfeuchte kondensiert hier aufgrund der Dampfdruckabsenkung in den gefüllten Kapillaren Wasserdampf, so dass sich diese weiter füllen. **Fasersättigung** (bzw. der Fasersättigungspunkt, A.d.V.) ist dann erreicht, wenn alle Kapillaren im submikroskopischen und mikroskopischen Bereich der Zellwände mit Wasser gefüllt sind. Bei den meisten einheimischen Holzarten liegt der Fasersättigungsbereich um 30 % bei 20 °C. Die beschriebenen drei Stufen der Sorption überlagern sich jeweils in den Übergangsbereichen.“ [DI;S.9] (H.d.V.)

Fasersättigung bzw. Fasersättigungspunkt bezeichnet den „Zustand eines Holzstückes, bei dem Zellwände mit Wasser gesättigt sind, jedoch kein Wasser in den Zellhohlräumen vorhanden ist“ [DIN844-4;P.4.2] (Bild 2)

Bezugnehmend auf voran gegangene Ausführung ist zu beachten, dass (entgegen einer landläufigen Meinung) die Fasersättigung bzw. der Fasersättigungspunkt nicht mit dem Sorptionsgleichgewichts-Zustand des Holzes bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % gleichzusetzen ist. Bei vielen Holzarten liegt die Fasersättigung bzw. der Fasersättigungspunkt deutlich oberhalb einer relativen Luftfeuchte von 100 %.

Der Fasersättigungspunkt bildet auch den „oberen Grenzpunkt“ für die Änderung des Volumens von Holz infolge Änderung des Feuchtegehaltes (Holzfeuchte).

Ein Anstieg des Feuchtegehaltes von Holz vom darrtrockenen Zustand (Feuchtegehalt 0 %) bis zum Fasersättigungspunkt bewirkt proportional zur Aufnahme von (gebundenem) Wasser eine Volumenvergrößerung (Quellen) des Holzes.

Ein Absinken des Feuchtegehaltes von Holz vom Fasersättigungspunkt bis zum darrtrockenen Zustand (Feuchtegehalt 0 %) bewirkt proportional zur Abgabe von (gebundenem) Wasser eine Volumenverkleinerung (Schwinden) des Holzes.

Oberhalb des Fasersättigungspunktes erfolgt weder ein Quellen noch ein Schwinden des Holzes (Bild 3).

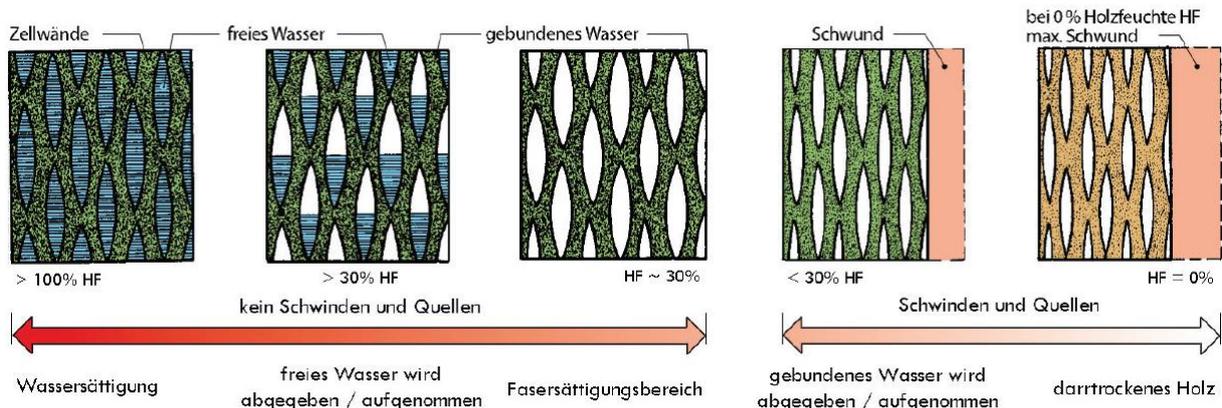


Bild 3: Wasseranteil im Holz – Schwinden und Quellen [ME;S.11]

Oberhalb des **Fasersättigungspunktes** bis zum **Wassersättigungspunkt** erfolgt über das in den Zellwänden gebundene Wasser hinaus die Einlagerung von freiem (frei tropfbarem) Wasser in den Zellhohlräumen (Bild 2).

Der Wassersättigungspunkt ist erreicht, wenn alle Zellwände gesättigt und auch alle Hohlräume vollständig mit Wasser gefüllt sind. Der Wassersättigungspunkt für Holz liegt bei einem Feuchtegehalt (Holzfeuchte) von ca. 140 %.

Ein Feuchtegehalt (Holzfeuchte) oberhalb einer relativen Luftfeuchte von 100 % bis hin zum Wassersättigungspunkt lässt sich nur die entsprechend lang anhaltende Wasserlagerung, ggf. in Verbindung mit dem Absaugen der im Holz befindlichen Luft erreichen.

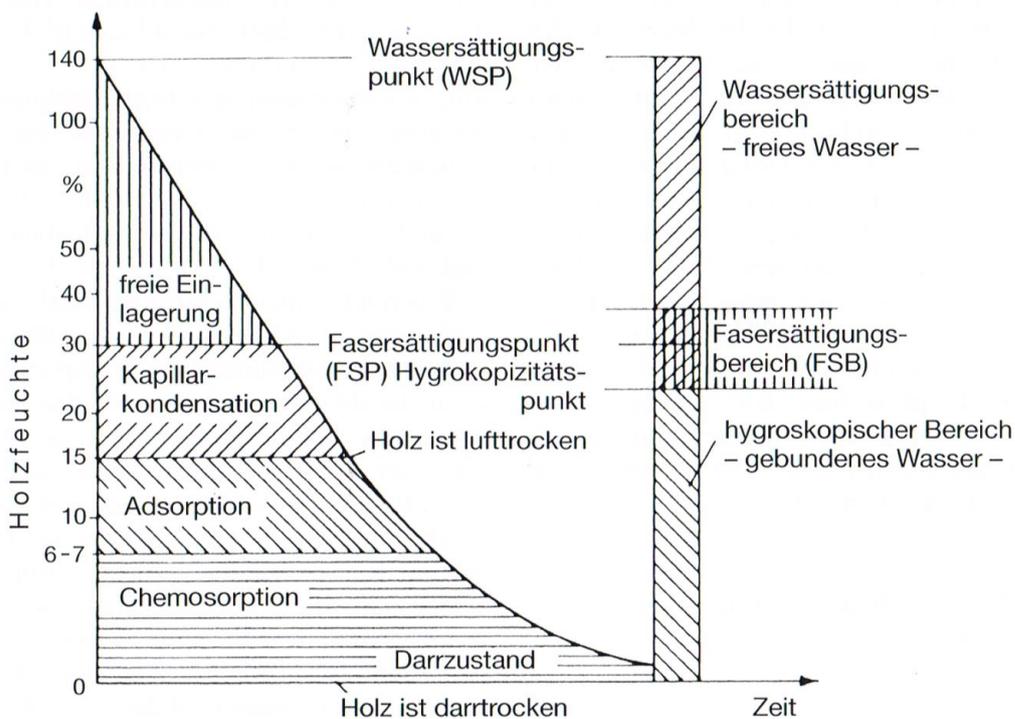


Bild 4: Wasseranteil im Holz – Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz [ME;S.11]

Für die experimentellen Untersuchungen wurde die Holzart Fichte zugrunde gelegt.

„Die Fichten (*Picea*) bilden eine der sechs Gattungen der Familie der Kieferngewächse. Sie umfasst ca. 40 Arten, die die nördliche, gemäßigte Zone Europas, Nordamerikas und Asiens besiedeln. Mit einem Flächenanteil von 28 % ist die Fichte neben der Kiefer die häufigste Baumart in Deutschland und für die Forstwirtschaft der bedeutendste Holzlieferant. Sie wird deshalb auch ‚Brotbaum des Waldbesitzers‘ genannt.“

[Informationsblatt Schutzgemeinschaft Deutscher Wald, 2015]

Fichten besitzen u.a. folgenden Bestimmungsschlüssel bzw. weisen folgende Eigenschaften auf:

- Nadelholz mit Harzkanälen (Harzkanäle im Spätholz als helle Flecken);
- Reifholzbaum (Baum mit hellem Kernholz, Splint- und Kernholz sind farblich nicht zu unterscheiden);
- weiches, leichtes, relativ elastisches Holz;
- Holzfarbe: gelblichweiß
- Textur: Tangentialschnitt: gefladert; Radialschnitt: gestreift;
- Jahrringgrenze: allmählich bis deutlich zwischen hellem Früh- und dunklem Spätholz
- Rohdichte – lufttrocken (12 - 15 % Feuchtegehalt): 330...470...680 kg/m³
(in der Fachliteratur sind dazu unterschiedliche Angaben zu finden);
- Porenanteil: etwa 71 %;
- Resistenzklasse nach DIN EN 350-2: 4 (wenig dauerhaft);
- Verwendung: u.a. Bauholz (z.B. für Dachstühle) als Schnittholz, Konstruktionsvollholz, Brettschichtholz. [HA]



Bild 5: Fichte – Tangentialschnitt

3.2. Begriffe, Definitionen, Interpretationen

3.2.1. Holzfeuchte, Feuchtegehalt

Die „Holzfeuchte“ bzw. „Holzfeuchtigkeit“ ist das prozentuale Verhältnis zwischen der Masse des in der Holzprobe enthaltenen Wassers und der Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Holzprobe.

Die Holzfeuchte bzw. Holzfeuchtigkeit besitzt das Formelzeichen u und berechnet sich wie folgt:

$$u = (m_u - m_o) / m_o \cdot 100 \text{ in \%}$$

Dabei ist:

m_u Masse der feuchten Holzprobe in g und

m_o Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe in g. [DIN52183;P.3+7]

Der Begriff „Holzfeuchte“ bzw. auch „Holzfeuchtigkeit“ mit o.g. Definition und Berechnung hat sich seit fast 100 Jahren in Theorie und Praxis etabliert und wurde auch in der DIN 52183 – Prüfung von Holz – Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, Ausgabe November 1977 verwendet.

Diese DIN wurde jedoch 2006 zurückgezogen und der Regelsetzer empfiehlt stattdessen die Anwendung der DIN EN 13183-1:2002-07.

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung werden u.a. in den aktuellen, relevanten Normen

- DIN EN 844-4:1997-08 Rund- und Schnittholz – Terminologie
Teil 4: Begriffe zum Feuchtegehalt
und
- DIN EN 13183-1:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz,
Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren

anstelle der Begriffe „Holzfeuchte“ bzw. „Holzfeuchtigkeit“ der Begriff „Feuchtegehalt“ (Formelzeichen ω) verwendet und wie folgt definiert:

Der Feuchtehalt ω ist die „Masse des im Holz enthaltenen Wassers, ausgedrückt als Prozentsatz der Masse des darrtrockenen Holzes.“ [DIN844-4;P.4.1]

„Der Feuchtegehalt (ω) ist als Massenteil in Prozent nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\omega = (m_1 - m_0) / m_0 * 100$$

Dabei ist:

m_1 die Masse, in Gramm, des Prüfkörpers vor dem Trocknen;

m_0 die Masse, in Gramm, des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand;

ω der Feuchtegehalt in Prozent.“ [DIN13183-1;P.6]

Grundsätzlich sind „Holzfeuchte“ und „Feuchtegehalt“ das gleiche.

Auch in dieser Thesis sind sowohl der Begriff „Holzfeuchte“ - bei Übernahme aus zitierten Quellen, als auch der Begriff „Feuchtegehalt“ als „neuer“ Begriff zu finden.

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung sollte und wird sich auch in Deutschland der Begriff „Feuchtegehalt“ mit genannter Definition und Berechnung durchsetzen.

Weiterhin sollte der früher übliche Begriff „Feuchtigkeit“ im Zusammenhang mit Holz und Holzwerkstoffen nicht mehr verwendet werden (Kurznachrichten des Normenausschuss Holz vom 30.6.83). [LO;S.373]

Nicht mit den Begriffen/Definitionen „Feuchtegehalt“ bzw. „Holzfeuchte“ zu verwechseln bzw. gleichzusetzen ist der Begriff/Definition „Durchfeuchtungsgrad“.

Der Begriff „Durchfeuchtungsgrad“ entstammt der Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen (WTA-Merkblatt 4-11-02/D) und definiert eine nicht mit o.g. „Feuchtegehalt“ bzw. „Holzfeuchte“ zu vergleichende Feuchtekonstellation.

Der Begriff bzw. die Definition „Durchfeuchtungsgrad“ findet im Zusammenhang mit der Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz keine Anwendung.

3.2.2. Kalibrierung

Die Genauigkeit der Messergebnisse elektronischer Holzfeuchte-Messgeräte basiert u.a. auf einer vorausgegangenen Kalibrierung dieser Geräte.

Bei einer **Kalibrierung** handelt es sich im Sinne der Definition um eine „Tätigkeit die unter festgelegten Bedingungen in einem ersten Schritt eine Beziehung zwischen den durch Normale zur Verfügung gestellten Größenwerten mit ihren Messunsicherheiten und den entsprechenden Anzeigen mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten herstellt und in einem zweiten Schritt diese Informationen verwendet, um eine Beziehung herzustellen, mit deren Hilfe ein Messergebnis aus einer Anzeige erhalten wird“. [IW;P.2.39]

Für HMW (siehe Abkürzungsverzeichnis) bedeutet dies, dass

- unter festgelegten Umweltbedingungen (Temperatur) und festgelegten Messverfahren (Messung des elektrischen Widerstandes und z.B. Darrverfahren)
 - in einem ersten Schritt eine Beziehung hergestellt wird, zwischen den, durch Holzproben bzw. –muster (= „Normale“) zur Verfügung gestellten Feuchtegehalten (= Größenwert) und den (unter o.g. Bedingungen) entsprechenden elektrischen Widerständen (= Anzeigen)
- und
- in einem zweiten Schritt dieser Zusammenhang mittels statistischer und mathematischer „Idealisierung“ in die praxisorientierte Ableitung eines Feuchtegehaltes als Zahlenwert mit der Maßeinheit % (= Messergebnis) umgewandelt wird.

Bei dem zuvor genannten **Normal** handelt es sich im Sinne der Definition um die „Realisierung der Definition einer **Größe**, mit angegebenen Größenwert und beigeordneter Messunsicherheit, benutzt als Referenz“. [IW;P.5.1]

Die **Größe** ist diesbezüglich definiert als die „Eigenschaft eines Phänomens, eines Körpers oder einer Substanz, wobei die Eigenschaft einen Wert hat, der durch eine Zahl und eine Referenz ausgedrückt werden kann“ [IW;P.1.1].

Ein *Normal* hat den Zweck eine Einheit oder einen Wert einer Größe darzustellen, zu bewahren oder zu reproduzieren, um diese an andere Messgeräte durch Vergleich weiterzugeben. [DIN1319-1;P.4.7]

Ein *Normal* muss ausreichend homogen und stabil sein.

Ein *Normal* stellt z.B. das *Urkilogramm* dar. Es besteht aus einem kleinen Zylinder aus Platin und Iridium und wurde 1889 in Paris hergestellt. Es wiegt genau ein Kilo und dient der Kalibrierung von Messgeräten (Waagen) und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Zu unterscheiden ist in ein internationales Normal und in ein nationales Normal.

Bei einem internationalen Normal handelt es sich im Sinne der Definition um ein „Normal, das von den Unterzeichnern eines internationalen Abkommens für die weltweite Benutzung anerkannt wurde“. [IW;P.5.2]

Ein internationales Normal ist z.B. das o.g. *Urkilogramm*.

Ein nationales Normal beschränkt sich im Gegensatz zu einem internationalen Normal auf ein Land oder eine Volkswirtschaft. [IW;P.5.3]

Weiterhin sind ein Primärnormal und ein Sekundärnormal zu unterscheiden.

Bei einem Primärnormal handelt es sich im Sinne der Definition um ein „Normal, das auf einem Primärmessverfahren beruht oder auf Grundlage einer Vereinbarung als Artefakt geschaffen ist“. [IW;P.5.4]

Ein Primärnormal ist z.B. das o.g. *Urkilogramm*.

Bei einem Sekundärnormal handelt es sich im Sinne der Definition um ein „Normal, das durch Kalibrierung gegen ein Primärnormal für eine Größe der gleichen Art geschaffen ist“. [IW;P.5.5]

Ein Sekundärnormal ist von einem Primärnormal abgeleitet.

Für die Messung des Feuchtegehaltes von Holz gibt es derzeit kein internationales bzw. nationales Primär- bzw. Sekundärnormal. Es gibt nicht den *Normal*-Baum (Primärnormal) und es gibt auch keine Behörde o.ä., die den *Normal*-Baum bzw. eine Ableitung davon erschaffen hat (Sekundärnormal).

Die Kalibrierungen von elektronischen Holzfeuchte-Messgeräten basieren auf, durch die jeweiligen Entwickler/Hersteller **selbst** ausgewählte Holzproben bzw. -muster, welche als „Referenzmaterial“ dienen und können sich im Ergebnis voneinander unterscheiden.

Insofern müssen alle Kalibrierungen zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz als relativ (bezogen auf das Referenzmaterial) betrachtet werden.

Die Kalibrierung an sich und die Übertragung auf andere Holzproben bzw. -muster sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet und nur eingeschränkt reproduzierbar.

Seitens der Hersteller von HMW hergestellte Prüfadapter (z.B. für das im Rahmen dieser Thesis verwendete HMW der Firma GANN – Bild 6) dienen der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Geräte, stellen jedoch kein *Normal* dar.



Bild 6: Prüfadapter für HMW Firma GANN mit Größenvergleich

Im Zusammenhang mit „Kalibrierung“ wird oft auch von „Justierung“ bzw. „Eichung“ gesprochen.

„Kalibrierung“ ist nicht mit „Justierung“ gleichzusetzen!

Während die „**Kalibrierung**“ die Erstellung der holzart- und temperaturabhängigen Widerstandskennlinie(n) (Kalibrierfunktion(en)) an sich und die entsprechende Programmierung im Holz-Feuchtemessgerät beinhaltet, beinhaltet die „**Justierung**“ die Einstellung der Holzsorte und Temperatur am Holz-Feuchtemessgerät mittels entsprechender Wahlschalter und dadurch die Zuordnung der entsprechenden Widerstandskennlinie (Kalibrierfunktion).

Durch die Justierung kann eine programmierte Widerstandskennlinie (Kalibrierfunktion) ausgewählt, jedoch nicht verändert werden.

„Kalibrierung“ ist nicht mit „Eichung“ gleichzusetzen!

Eichung ist „eine von den Eichbehörden vorzunehmende Prüfung und Kennzeichnung von Meßgeräten (auch Maßverkörperungen), die im öffentlichen Bereich verwendet werden. Durch die Prüfung wird festgestellt, ob das Gerät den Eichvorschriften genügt, d.h. ob es den an seine Beschaffenheit und seine meßtechnischen Eigenschaften zu stellenden Anforderungen genügt, insbesondere ob die Beträge der Meßabweichungen die durch die Eichordnung vorgegebene Eichfehlergrenze(n) nicht überschreiten. Die Kennzeichnung (Stempelung) beurkundet, daß das Meßgerät zum Zeitpunkt der Prüfung den Anforderungen genügt hat und aufgrund seiner Beschaffenheit auch in Zukunft genügen wird“. [IR1]

3.2.3. Messunsicherheit

„Die Messung einer physikalischen Größe ist ohne die Angabe der Messunsicherheit wissenschaftlich wert- und sinnlos. Eine Messunsicherheit ist kein Negativkriterium oder Mangel, sondern beschreibt die tatsächliche Qualität bzw. Sicherheit eines erzielten Messergebnisses.“ [MÜ;S.12]

Bei der **Messunsicherheit** handelt es sich im Sinne der Definition um einen „nichtnegativen Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße (Größe, die gemessen werden soll, A.d.V.) auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“. [IW;P.2.26]

Das vollständige Messergebnis mit kalibrierten Messgeräten muss somit lauten:
Messwert +/- Messunsicherheit (auch Standardmessunsicherheit).

Um Messunsicherheiten wissenschaftlich ermitteln bzw. auch miteinander vergleichen zu können, bedarf es einheitlicher Verfahren bzw. Normen und Vorschriften.

Dem wird Rechnung getragen durch die

- Technische Regel: ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 –
Titel (deutsch): Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der
Unsicherheit beim Messen
(Titel (englisch): Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression
of uncertainty in measurement (GUM:1995)).

„Dieses Dokument legt die Grundsätze und die Forderungen fest, auf denen eine Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen zu gründen ist und denen die Angabe der Messunsicherheit in Kalibrierscheinen zu genügen hat.“ [DA;P.1.1]

Weiterhin stehen für die Ermittlung von Messunsicherheiten die DIN 1319 – Grundlagen der Messtechnik zur Verfügung.

Die im Messergebnis benannte bzw. zu benennende Standardmessunsicherheit berücksichtigt nicht die gegenüber dem wahren Wert mögliche maximale Messabweichung. Die Standardmessunsicherheit stellt eine, durch den Erweiterungsfaktor k charakterisierte Überdeckungswahrscheinlichkeit des Messergebnisses mit dem wahren Wert dar, „sie blendet extreme Ausreißer aus“.

Die Standardmessunsicherheit wird anhand des angestrebten Erweiterungsfaktor k ermittelt, welcher diesbezüglich im Zusammenhang mit Kalibrierungen ebenfalls zu benennen ist.

Durch den in der Regel verwendeten Erweiterungsfaktor $k = 2$ wird ausgedrückt, dass der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb des Messergebnisses (Messwert +/- Messunsicherheit) liegt.

Vergleichend dazu wird durch den Erweiterungsfaktor $k = 1$ eine Wahrscheinlichkeit von 68 % und durch den Erweiterungsfaktor $k = 3$ eine Wahrscheinlichkeit von 99 % ausgedrückt.

Weiterhin ist für Kalibrierungen der Anwendungsbereich, in dem bzw. für den diese gilt, zu benennen, z.B. Holz-Feuchtebereich zwischen 5 % und 25 %.

Eine normgerechte Bestimmung der Messunsicherheit ist ein sehr komplexes Thema und nur mit einer ausreichenden, deutlich höheren, als z.B. im Rahmen dieser Thesis zur Verfügung stehenden Datenmenge durchführbar.

Vielfach wird im Zusammenhang mit Messunsicherheit auch von Messgenauigkeit bzw. Genauigkeit gesprochen.

Bei der **Messgenauigkeit** handelt es sich im Gegensatz zur Messunsicherheit im Sinne der Definition um:

„Ausmaß der Annäherung eines Messwerts an einen wahren Wert einer Messgröße“.
[IW;P.2.13]

Die Messunsicherheit bzw. Messgenauigkeit sind durch die Parameter „Präzision“ und „Richtigkeit“ gekennzeichnet.

Eine geringe Messunsicherheit bzw. hohe Messgenauigkeit ist gekennzeichnet durch:

- hohe Präzision und hohe Richtigkeit.

Eine hohe Messunsicherheit bzw. geringe Messgenauigkeit ist gekennzeichnet durch:

- hohe Präzision, aber geringe Richtigkeit
oder
- geringe Präzision, aber hohe Richtigkeit
oder
- geringe Präzision und geringe Richtigkeit.

Zur Verdeutlichung der Parameter „Präzision“ und „Richtigkeit“ soll die Zielscheibe eines z.B. Bogenschützen dienen (Bild 7).

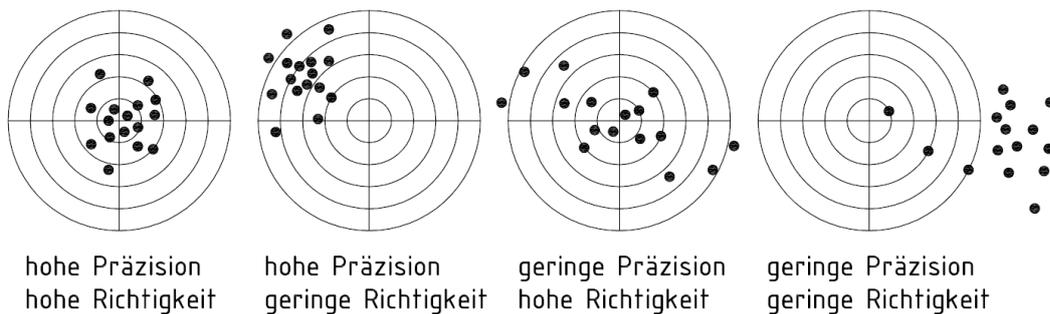


Bild 7: Darstellung der Parameter „Präzision“ und „Richtigkeit“ anhand einer Zielscheibe

3.3. Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) und Holzfeuchtemessgeräte im Allgemeinen

Grundsätzlich wird bei der Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) zwischen direkten und indirekten Messverfahren unterschieden.

Bei den direkten Messverfahren wird der Holzprobe (Messgut) Feuchte entzogen und diese direkt, entweder gravimetrisch (Ermittlung der Masse) oder volumetrisch (Ermittlung des Volumens (Menge)) bestimmt und dadurch der Feuchtegehalt abgeleitet.

Als geeignete direkte Messverfahren stehen

- Gravimetrische Verfahren;
- Chemische Verfahren

zur Verfügung, wobei das Gravimetrische Verfahren der „Marktführer“ ist.

Die direkten Messverfahren sind zerstörende Prüfverfahren. Sie erfordern einen verhältnismäßig hohen Zeitaufwand sowie eine Laborauswertung und sind für eine kontinuierliche Erfassung des Feuchtegehaltes ungeeignet.

Bei den indirekten Messverfahren verändert sich der Feuchtegehalt des Messgutes nicht. Die Funktionsweise der einzelnen indirekten Messverfahren beruht auf bestimmte (feuchteabhängige) Eigenschaften des Holzes, die mit der Feuchte im Holz in einem funktionalen Zusammenhang stehen, wie z.B. die elektrische Leitfähigkeit und die entsprechende Messung und Umformung in ein Messergebnis.

Als geeignete indirekte Messverfahren stehen

- Elektrische Verfahren;
- Chemische Verfahren;
- Thermometrische Verfahren;
- Hygrometrische Verfahren;
- Akustische Verfahren;
- Infrarot-Verfahren;
- Kernphysikalische Verfahren

zur Verfügung, wobei die Elektrischen Verfahren, insbesondere HMW der „Marktführer“ sind.

Voraussetzung für die Funktion und Präzision der indirekten Messverfahren und -geräte ist (u.a.) eine Werteermittlung auf Grundlage direkter Messverfahren.

Die direkten Messverfahren liefern gegenüber den indirekten Messverfahren, die zuverlässigeren, von wenigen Störungen abgesehenen, absolut richtigen, d.h. von einer Kalibrierung unabhängigen Ergebnisse. [LO;S.377]

Die Durchführung der genannten direkten und indirekten Messverfahren ist auch in Kombination (mehrparametrische Verfahren) möglich, wodurch grundsätzlich die Messgenauigkeit erhöht bzw. überprüft werden kann.

3.4. Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz (Holzfeuchte) und Holzfeuchtemessgeräte auf Basis elektrischer Widerstandsmessung im Besonderen

3.4.1. Status des Messverfahrens

Die ersten brauchbaren Holzfeuchtemessgeräte auf Basis der Widerstandsmessung erschienen etwa 1930 in den USA. [KO2;S.370]

HMW sind in der heutigen Baupraxis unentbehrlich. Mit ihnen kann und wird in holzverarbeitenden Bereichen (Betriebe, Baustellen) schnell (innerhalb weniger Sekunden), unkompliziert, zerstörungsfrei und relativ genau und zuverlässig der Feuchtegehalt von Holz (Holzfeuchte) gemessen.

Typische Einsatzbereiche sind z.B.

- lfd. Überwachung von Holz Trocknungsprozessen;
- lfd. Überwachung bei der Herstellung konstruktive Vollholzprodukte in Betrieben (z.B. Brettschichtholz);
- Überwachung der maximalen Einbaufeuchte von Holzbauteilen im Hinblick auf einen regelkonformen vorbeugenden baulichen Holzschutz nach DIN 68800-2 (Eingangskontrolle, Kontrolle vor Bekleiden);
- Gutachtertätigkeit im Zusammenhang mit aufgetretenen Bauschäden;
- lfd. Kontrollen bei der Beseitigung von Bauschäden;
- Untersuchungen im Rahmen von Wissenschaft und Forschung

aber auch zunehmend

- Langzeituntersuchungen (Monitoring) an Konstruktionen, welche standort- bzw. nutzungsbedingt „gefährlichen“ Feuchteeinwirkungen bzw. -schwankungen ausgesetzt sind, z.B. klimatisierte Eissporthallen.

3.4.2. Messprinzip

Die Funktionsweise (Messprinzip) elektronischer Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes (HMW) beruht auf den Gesetzmäßigkeiten

- der elektrischen Spannung und des elektrischen Stroms und
- der elektrischen Leitfähigkeit bzw. dem elektrischen Widerstand von Stoffen im Allgemeinen und feuchtem Holz im Besonderen.

Handelsübliche HMW basieren auf Gleichspannung und Gleichstrom, d.h. der in Stärke und Richtung gleichbleibenden Bewegung der freien Ladungsträger.

Das auf seinen Feuchtegehalt zu untersuchende Holz wird dabei in den Stromflusskreislauf (Batterie und Leitungssystem) eingebunden und besitzt in diesem Kreislauf grundsätzlich die geringste elektrische Leitfähigkeit bzw. erzeugt grundsätzlich den größten elektrischen Widerstand.

Die elektrische Leitfähigkeit des Holzes basiert dabei auf der im Holz enthaltenen Wassermenge und weitere Holzinhaltstoffe, mit den darin eingelagerten Ionen als freie Ladungsträger, aber auch auf der Anatomie des Holzes und unterliegt mehr oder weniger physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten.

Bei Kenntnis dieser Gesetzmäßigkeiten kann durch die Messung des elektrischen Widerstandes auf den lokal vorhandenen Feuchtegehalt (Holzfeuchte) zurückgeschlossen werden.

Dabei gilt grundsätzlich:

Umso höher der elektrische Widerstand, umso geringer der Feuchtegehalt im Holz.

HMW messen den elektrischen Widerstand im Holz und rechnen diesen mittels geräteintegrierter elektronischer Komponenten (Mikrocontroller) in entsprechende Feuchtegehalte (Holzfeuchten) um.

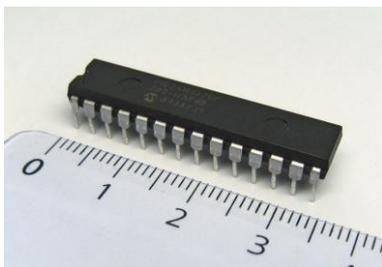


Bild 8: Mikrocontroller mit Größenvergleich

3.4.3. Normen und Vorschriften

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes basiert auf der

DIN EN 13183-2:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz,
Teil 2: Schätzung durch elektrische Widerstands-Messverfahren
einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-2:2002-07:2003-12.

Die DIN EN 13183-2 stellt eine anerkannte Regel der Technik dar und ist damit eine Grundlage für die Planung, Ausführung, Überwachung, aber auch gutachterliche und gerichtliche Bewertung von Bauvorhaben.

Die genaue Kenntnis und Umsetzung der DIN EN 13183-2 bei der Benutzung von HMW sollte diesbezüglich selbstverständlich und unerlässlich sein.

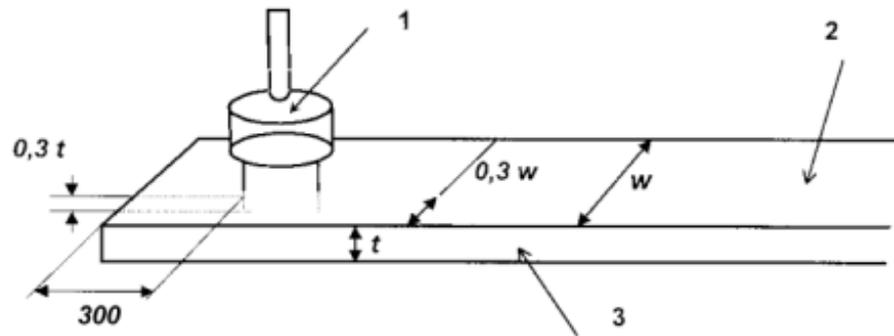
Für die Messung des Feuchtegehaltes gemäß DIN EN 13183-2 ist zu beachten, dass diese generell im Stichprobenverfahren erfolgt und der Feuchtegehalt sowie die Feuchteverteilung (Feuchtegradient) im Holz nicht vollumfänglich erfasst werden.

Im Folgenden wird für HMW eine geeignete Vorgehensweise für die Ermittlung des Feuchtegehaltes in einzelnen Stücken eines Loses oder einer Lieferung Schnittholz bzw. Holz, welches gehobelt oder anderweitig mechanisch oberflächenbearbeitet wurde, unter Berücksichtigung der wesentlichen Festlegungen der DIN EN 13183-2 und unter Berücksichtigung eigener Erkenntnisse beschrieben:

- Benennung des Anlasses der Messung und der relevanten Projekt-/Objektdaten
- Benennung des Verfahrens zur Bestimmung des Feuchtegehaltes und der angewendeten Normen, Vorschriften etc.
- Benennung der Holzherkunft, soweit möglich (Lieferscheine, Objektdokumentation o.ä.). Bei Kenntnis der Holzherkunft kann in der Regel auch auf die Holzart bzw. Holzunterart zurück geschlossen werden.
- Benennung der Holzart bzw. Holzunterart
Sofern die Holzart bzw. Holzunterart nicht zweifelsfrei erkannt und einer in dem verwendeten Holzfeuchte-Messgerät vorgesehenen Holzsorten-Einstellung zugeordnet werden kann, bieten die meisten Holzfeuchte-Messgeräte die Möglichkeit zur Einstellung einer „allgemeinen“ Holzsorte und damit allgemeinen Kalibrierfunktion (Widerstandskennlinie). Die Voraussetzungen für eine normgerechte Messung sind

dadurch aber nicht mehr gegeben, was bei der Auswertung der Messergebnisse zu berücksichtigen ist.

- Benennung des Prüfstückes (Entnahmeort bei Holzlieferungen, Einschnittlage im Stamm (in Abhängigkeit vom Jahrringverlauf), Abmaße) und ggf. vorgesehene Übertragung/Anwendung der nachfolgenden Messergebnisse auf weitere/andere Hölzer (Los, Lieferung etc.)
- Benennung des verwendeten Messgerätes
Bei der Auswahl des Holzfeuchte-Messgerätes einschl. der weiteren Messeinrichtungen (Messkabel, Elektroden, Elektroden-Einsatzgeräte) sollte beachtet werden, dass es sich um ein „grundsätzlich taugliches“ und aufeinander abgestimmtes System („Oberklasse“-Geräte) handelt.
Für die Holzart Fichte besteht zudem die Möglichkeit ein durch die MPA Stuttgart anerkanntes Messgerät zu verwenden, was z.B. für den anerkannten Holzleimbau eine Grundvoraussetzung ist.
- Benennung der ausgewählten Einstellungen am Holzfeuchte-Messgerät (Holzart bzw. Holzunterart, Temperatur) und Überprüfung des Messgerätes (Batteriekontrolle, Anschluss an Prüfadapter)
- Einsetzen der Messelektroden in das Holz
Die Elektroden sind immer im ungestörten Bereich des Holzes (keine Äste, Harzgallen, Schmutz etc.) einzusetzen.
Die Elektroden sind in einem Abstand von 0,3 Meter von einem oder anderen Ende des Prüfstückes einzusetzen oder im Mittelpunkt bei Prüfstücken die kürzer als 0,6 m sind.
Die Elektroden sind in einem Randabstand von 0,3 der Holzbreite (w) einzusetzen.
Die Elektroden sind entsprechend der Bedienungsanleitung des Gerätes quer bzw. längs zur Faserrichtung einzusetzen. Für die meisten Messgeräte sind der Einbau der Elektroden und damit die Messrichtung quer zur Faserrichtung festgelegt, da unterschiedlich feuchte Faserstränge somit „übermessen“ werden.
Die Elektroden sind im vorgesehenen Abstand zueinander einzusetzen. Die Hersteller von „Oberklasse“-Messgeräten bieten dafür entsprechende Einsatzgeräte (Einschlag-/Einstech-/Rammvorrichtungen) an, die den entsprechenden Elektrodenabstand, in der Regel 30 mm, vorgeben und sicherstellen.
Die Elektrodenspitzen sind bis zu einer Tiefe von 30 % der Dicke (Tiefe) des Prüfstückes einzusetzen.



Legende

- 1 Hammerelektrode
- 2 Oberfläche
- 3 Kante

- t Dicke
- w Breite

Bild 9: Position für die Messung nach DIN EN 13183-2 [DIN13183-2]

Es sind isolierte Elektroden mit unbeschädigter Isolation zu verwenden. Durch die Hersteller werden isolierte Elektroden, passend zu den genannten Einsetzgeräten angeboten. Durch die Isolation (bzw. Nichtisolation der Elektrodenspitzen) kann die Messtiefe im Holzquerschnitt genau festgelegt werden und insbesondere der starke Einfluss von Oberflächenfeuchte ausgeschlossen werden. Auf Grundlage der Kenntnisse über den Feuchtegradienten von Holz wird in einer Tiefe von 30 % der Dicke (Tiefe) des Prüfstückes der annähernd mittlere Feuchtegehalt gemessen, während in der Mitte des Prüfstückes die Kernfeuchte und bis zu einer Tiefe von ca. 5 mm die Oberflächenfeuchte gemessen wird.

Durch die Hersteller werden jedoch auch unisolierte Elektroden angeboten, bei denen sich der Messbereich über die gesamte Einschlagtiefe (einschl. Holzoberfläche) erstreckt. Diesbezüglich kann nicht ermittelt werden, in welcher Holztiefe die Messung erfolgt und der Einfluss von Oberflächenfeuchte und Feuchteunterschiede im Querschnitt des Prüfstückes nicht ausgeschlossen werden.

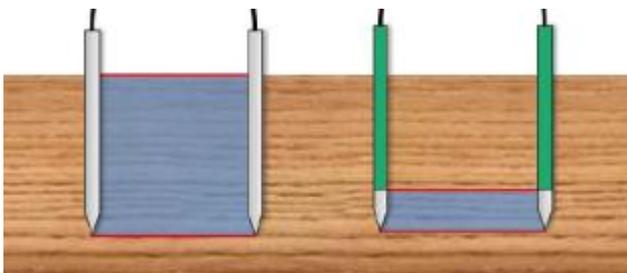


Bild 10: Schematische Darstellung des Messbereichs

bei unisolierten Elektroden (links) und isolierten Elektroden (rechts) [ME;S.33;d.V.b.]

- Messung

Vor der Messung muss am Gerät die betreffende Holzsorte und die vorhandene Holztemperatur eingestellt werden. Dafür ist jedem „Oberklasse“-Gerät eine Holzsorten-Tabelle beigelegt, aus der, die für die betreffende Holzsorte erforderliche Geräte-Einstellung (Justierung) entnommen werden kann. Bei der Einstellung der Temperatur sollte beachtet werden, dass die Holztemperatur und die Messgeräte-Temperatur annähernd sind gleich. Ggf. muss sich das zu messende Holz bzw. das Messgerät akklimatisieren.

Die Anzahl der zu prüfenden Stücke und die Anzahl der Messungen je Stück sollten (wird empfohlen) gemäß nachfolgender Tabelle aufeinander angestimmt werden.

Anzahl der zu prüfenden Stücke	Anzahl der Messungen je Stück
1	3
2	3
3	2
4	2
5	2
> 5	1

Der arithmetische Mittelwert der durchgeführten Messungen ergibt den mittleren Feuchtegehalt. Grobe Messabweichungen können/sollten dabei ausgeschlossen werden (siehe Punkt 3.4.5.3.).

Die Messergebnisse sind nach 2 bis 3 Sekunden, nachdem der Messkreis eingeschaltet wurde, abzulesen.

Die Messergebnisse (geschätzter Feuchtegehalt) sind mindestens mit der nächsten vollen Prozentzahl, d.h. auch Nachkommastellen sind möglich, anzugeben.

- Dokumentation der o.g. Messanordnung/-durchführung und der Messergebnisse sowie Schlussfolgerungen

Für Messergebnisse unterhalb eines Feuchtegehaltes von 7 % bzw. oberhalb eines Feuchtegehaltes von 30 % ist zu beachten, dass diese außerhalb des Anwendungsbereiches der DIN EN 13183-2 liegen und daher nicht verwendet werden sollten.

Weiterhin ist zu beachten, dass es sich bei dem o.g. Verfahren, auch innerhalb des Anwendungsbereiches, um eine *Schätzung* des Feuchtegehaltes handelt. Dies sollte entsprechend vermittelt werden.

3.4.4. Messbereiche und Messgenauigkeiten

Über die Genauigkeit der Bestimmung des Feuchtegehalts mittels elektrischem Widerstands-Messverfahren, welche letztendlich durch handelsübliche HMW umgesetzt wird, werden oftmals keine und wenn, unklare bzw. voneinander abweichende Angaben gemacht.

Unstrittig ist, dass innerhalb des ungefähren Feuchtebereichs zwischen Übergang Chemosorption/Adsorption (ca. 6-7 %) und Fasersättigungspunkt (ca. 25-35 %) (lediglich für einzelne Holzsorten, z.B. Eiche, Buche, Limba darüber hinaus), die höchste Messgenauigkeit erzielt werden kann, worauf auch in der Regel durch die Hersteller elektronischer Holzfeuchte-Messgeräte und in der Fachliteratur hingewiesen wird.

Auch die betreffende DIN EN 13183-2 sieht für dieses Messverfahren lediglich einen Anwendungsbereich zwischen 7 % und 30 % Feuchtegehalt vor [DIN13183-2], welcher mit o.g. Feuchtebereich vom Grundsatz her übereinstimmt.

Während renommierte Hersteller wie GANN und BROOKHUIS in den Prospekten für Ihre „Oberklasse“-Messgeräte im o.g. Anwendungsbereich (Holzfeuchtebereich) eine Messgenauigkeit von +/-0,5 % [GA1;S.90] und sogar 0,2 % [BR1] suggerieren, Fachautoren wie LIßNER/RUG eine Messgenauigkeit von +0,5 bis 1 % (bei Holzfeuchte $u < 30\%$) beschreiben [LI;S.174], haben DU/GEISSEN/NOACK im Rahmen einer Untersuchung anhand von 8 marktüblichen Feuchtemessgeräten festgestellt, dass im o.g. Anwendungsbereich ein systematischer Fehler von +/-3,5 % Holzfeuchte nicht ausgeschlossen werden kann. [DU;S.1]

Die DIN EN 13183-2 selbst beschreibt die Bestimmung des Feuchtegehaltes mittels elektrischer Widerstandsmessung als „*Schätzung* des Feuchtegehaltes“, ohne Angabe einer zu erwartenden Messunsicherheit.

Unabhängig davon, hat sich das Messverfahren in der Praxis etabliert und Messungen innerhalb des zuvor genannten Feuchte- bzw. Anwendungsbereiches sind in der Regel aus nachfolgend genannten Gründen ausreichend.

Ein Feuchtegehalt unterhalb des genannten Feuchte- bzw. Anwendungsbereiches ist auf Grund der Hygroskopie des Holzes im natürlichen Zustand nur unter besonderen Umständen erreichbar (z.B. innerhalb allseitig geschlossener Bauwerke mit Zentralheizung) und hat auch keinen Einfluss auf bau-relevante physikalische Eigenschaften bzw. zu erwartende Schädigungen durch Pilze bzw. Insekten. Als „Schaden“ bzw. „Schädigung“ können nur

Risse infolge einer zu hohen Einbaufeuchte auftreten, wobei diesbezüglich der Feuchtegehalt zum Zeitpunkt des Einbaus zu messen wäre.

Oberhalb des genannten Feuchte- bzw. Anwendungsbereiches ist hinsichtlich der Änderung bau-relevanter physikalischer Eigenschaften (z.B. Volumenänderung durch Quellen und Schwinden, Tragfähigkeit) bzw. zu erwartender Schädigungen durch Pilze bzw. Insekten die baupraktische „Schmerzgrenze“ erreicht und sogar überschritten, d.h. das Holz darf bzw. sollte nicht eingesetzt werden.

„Die Einbaufeuchte der Hölzer darf in den Gebrauchsklassen GK 0, GK 1, GK 2, GK 3.1 (d.h. für Holz welches im Gebrauch trocken bzw. gelegentlich feucht ist) nicht höher als 20 % liegen.“ [DIN68800-2;S.91]

Insofern ist es nur von Bedeutung, dass die für die HMW vorgesehene bzw. zugelassene obere Anwendungsgrenze deutlich oberhalb der maximal zulässigen Feuchtegehalte liegt und sich somit die Möglichkeit bietet, Werte im Grenzbereich der maximal zulässigen Feuchtegehalte zu ermitteln.

Für Messungen außerhalb des zuvor genannten Feuchte- bzw. Anwendungsbereiches, z.B. bei einem Wasserschaden im Rahmen der Sanierung oder bei Analysen in der Vorbereitung bzw. im Rahmen der Holz Trocknung verliert das Verfahren bekannter Maße weiter an Genauigkeit und Zuverlässigkeit bzw. sind keine Messergebnisse mehr erzielbar.

Um die Ursachen zu ergründen, muss man sich die bereits unter Punkt 3.1. beschriebenen Einlagerungsformen des Wassers im Holz und den Grenzzustand der Fasersättigung sowie die damit verbundene, für die elektrische Leitfähigkeit ausschlaggebende Bewegung der Ionen im Wasser als Ladungsträger vor Augen halten.

Zwischen Darrzustand (Feuchtegehalt 0 %) und Fasersättigung (Feuchtegehalt ca. 25-35 %) erfolgt die Einlagerung von Wasser ausschließlich innerhalb der Zellwände. In den Zellhohlräumen ist **kein** Wasser vorhanden. (Bild 2)

Die Bewegung der Ionen erfolgt ausschließlich und **eindeutig** im Bereich der Zellwände und beruht auf erkennbaren chemischen bzw. physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die Zunahme der Messunsicherheit bzw. die Nicht-Messbarkeit unterhalb eines Feuchtegehaltes von 7 % (untere Anwendungsgrenze gemäß DIN EN 13183-2) resultiert daraus, dass unterhalb dieses Bereiches zu wenig „leitendes“ Wasser im Holz ist.

Mit zunehmender Trockenheit steigt der elektrische Widerstand und das Holz nimmt zunehmend die Eigenschaften eines Isolators/Nichtleiters an. Es ist kein ausreichend konstanter bzw. gar kein Stromfluss vorhanden.

Die Zunahme der Messunsicherheit oberhalb eines Feuchtegehaltes von 30 % (obere Anwendungsgrenze gemäß DIN EN 13183-2) stellt eigentlich einen Widerspruch dar, da sich mit zunehmenden Feuchtegehalt die elektrische Leitfähigkeit erhöht und leichter und genauer messbar sein sollte.

Die Zunahme der Messunsicherheit ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- (1) „nicht eindeutiger“ Ionenfluss;
- (2) elektrische Leitfähigkeit als „starke“ Exponentialfunktion;
- (3) zunehmender Einfluss der Inhaltsstoffe des Wassers.

(1) Bei einem Feuchtegehalt über ca. 25-35 % ist die Fasersättigung erreicht und es erfolgt die zusätzliche Einlagerung von freiem (ungebundenem) Wasser in den Zellhohlräumen. (Bild 2)

Grundsätzlich besitzt das freie Wasser in den Zellhohlräumen gegenüber dem gebundenen Wasser in den Zellwänden eine höhere Konzentration und dadurch bessere Leitfähigkeit.

Dabei verteilt sich das (freie) Wasser in den Zellhohlräumen durch die „Ungebundenheit“ vermutlich nicht gleichmäßig, sondern lagert sich auf Grund von Adhäsions- bzw. Kohäsionskräften ab, wodurch in diesen, sofern die Wassersättigung nicht erreicht ist, auch „nicht leitende Luftbereiche“ vorhanden sind.

Durch die teilweise bzw. vollständige Einlagerung von freiem Wasser in den Zellhohlräumen ändert sich der Weg des Ionenflusses.

Während bis zur Fasersättigung die „Straße“ mittels der miteinander verbundenen Zellwände vorgegeben war, „kürzen“ die Ionen jetzt über das Wasser in den Zellhohlräume ab, so dass sich eine Kombination der „Transportwege“ ergibt.

Da das Volumen bzw. die für die elektrische Leitfähigkeit ausschlaggebende Querschnittsfläche der Zellhohlräume gegenüber den Zellwänden größer ist, wird der eigentliche Transportweg „Zellwände“ zur „Nebensache“.

Die Ionen „gehen den Weg des geringsten Widerstandes“, welcher jedoch **„nicht mehr eindeutig“** ist und keinen genauen Rückschluss auf den Feuchtegehalt ermöglicht.

(2) Nach KOLLMANN und STAMM ändert sich die Leitfähigkeit bzw. der elektrische Widerstand vom Darrzustand bis zur Fasersättigung annähernd einmillionenfach, während oberhalb des Fasersättigungspunktes bis zur völligen Wassersättigung eine weniger als fünffache Änderung in Form einer „starken“ Exponentialfunktion erfolgt (Bild 11). [KO2;S.527f.]

Die Messergebnisse liegen demzufolge oberhalb des Fasersättigungspunktes bis zur völligen Wassersättigung sehr dicht beieinander und können dadurch auch unter Berücksichtigung weiterer Messabweichungen schlechter einem entsprechenden Feuchtegehalt zugeordnet werden.

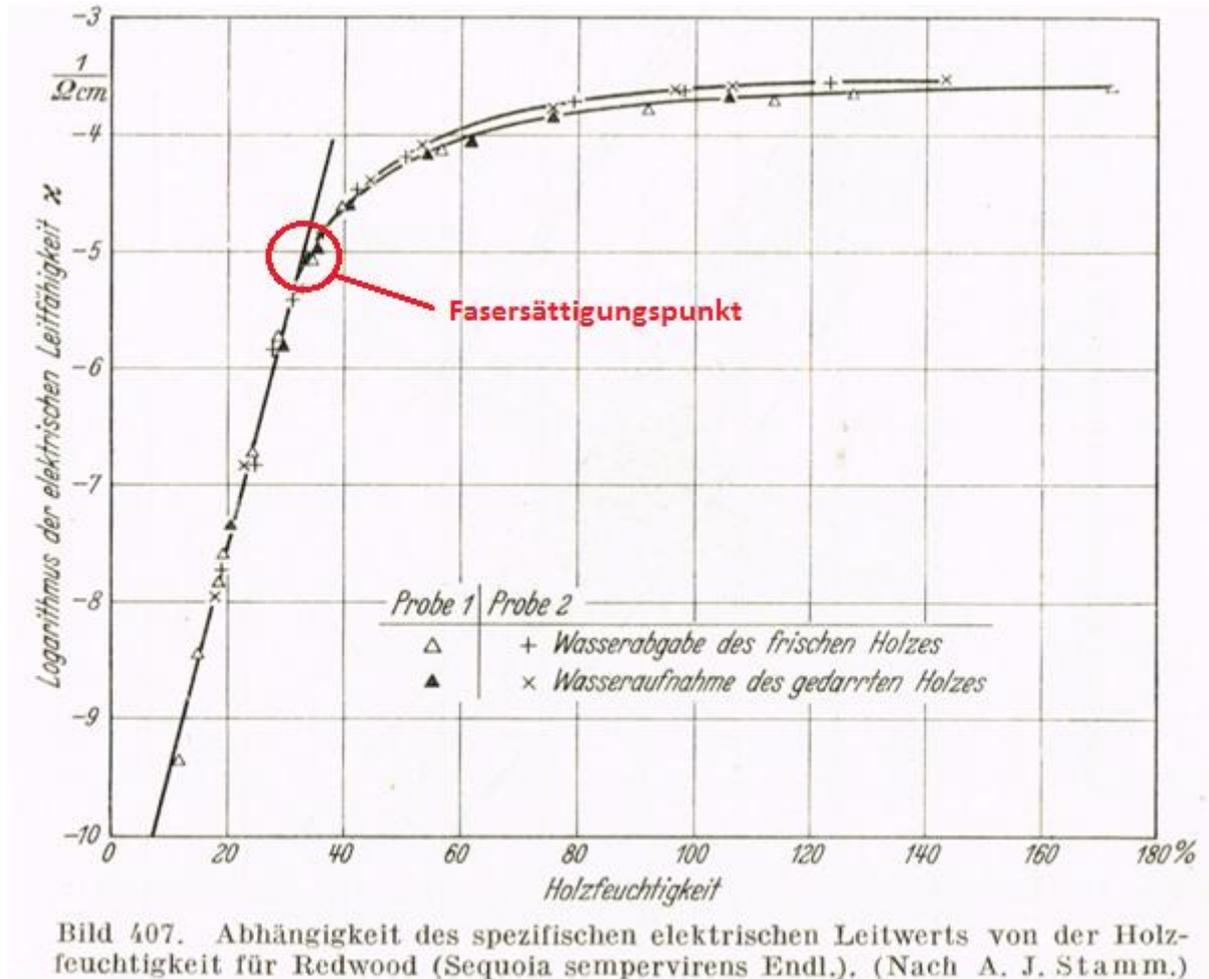


Bild 11: Abhängigkeit des Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit vom Feuchtegehalt (nach STAMM, 1930) [KO2;S.527] mit rot dargestellten Ergänzungen seitens des Verfassers

(3) Grundsätzlich wirken sich die eigentlichen Inhaltsstoffe des Wassers (insbesondere Salz) auf die Leitfähigkeit des Wassers (Ionenfluss) und dadurch auf das Messergebnis aus.

Mit Erhöhung der Konzentration des Wassers verstärkt sich dieser Einfluss, so dass ein genauerer Rückschluss auf den Feuchtegehalt nur noch mit einer Analyse der Inhaltsstoffe des, insbesondere freien Wassers und entsprechender Kalibrierung möglich wäre, was jedoch für den heutigen Stand der Geräteentwicklung ausscheidet. (siehe Punkt 3.4.5.1 – SM-6).

3.4.5. Messabweichungen

Um die Messunsicherheiten/Messgenauigkeiten der Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz auf Basis der Widerstandsmessung beurteilen zu können, muss man die möglichen Messabweichungen kennen.

In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass gemäß wissenschaftlicher Wortwahl nicht (mehr) der Begriff „Messfehler“, sondern der Begriff „Messabweichung“ verwendet wird.

Folgende Möglichkeiten von Messabweichungen sind zu unterscheiden:

- systematische Messabweichungen (Abkürzung: SM);
- zufällige (statistische) Messabweichungen (Abkürzung: ZM);
- grobe Messabweichungen (Abkürzung: GM).

Systematische und zufällige Messabweichungen sind nicht immer klar unterscheidbar.

Als Regel lässt sich jedoch festhalten:

„Durch systematische Messabweichungen wird ein Messergebnis immer unrichtig, während durch zufällige Messabweichungen ein Messergebnis immer unsicher wird.“ [MÜ;S.12]

Systematische Messabweichungen und zufällige Messabweichungen treten in der Regel nach dem Zufallsprinzip in Kombination auf. Die gleichgerichtete Wirkung verursacht eine Erhöhung der Messunsicherheit. Bei entgegengesetzter Wirkung erfolgt eine scheinbare Reduzierung der Messunsicherheit.

Grobe Messabweichungen verfälschen das Messergebnis dahingehend, dass es nicht verwertbar ist.

3.4.5.1. Systematische Messabweichungen (Abkürzung: SM)

Bei der systematischen Messabweichung handelt es sich um eine:

„Komponente der Messabweichung, die bei wiederholten Messungen konstant bleibt oder sich in vorhersagbarer Weise ändert“. [IW;P.2.17]

Systematische Messabweichungen basieren auf:

- (SM-1) Inhomogenität (Eigenschaftsstreuung) des Holzes – Holzarten bzw. Holzunterarten zueinander;
- (SM-2) in den jeweiligen Holzfeuchtemessgeräten für die einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten hinterlegten, herstellereigenen Kalibrierfunktionen (Widerstandskennlinien);
- (SM-3) falsche Einstellung der Holzart und damit der Kalibrierfunktion durch den Messgeräte-Bediener;
- (SM-4) (eigene) Messabweichungen in den für die Kalibrierung und Rückführbarkeit verwendeten direkten Messverfahren;
- (SM-5) Art der Holz Trocknung (freiluft-getrocknet bzw. technisch-getrocknet);
- (SM-6) unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit des eingelagerten Wasser;
- (SM-7) Ausführung (Oberfläche und Entfernung) der Elektroden;
- (SM-8) Messabweichungen der elektrischen bzw. elektronischen Bauteile in den Messgeräten.

(SM-1) Holz weist eine mehr oder weniger starke Inhomogenität, d.h. Eigenschaftsstreuung auf.

Die Eigenschaftsstreuung auf Grund unterschiedlicher Holzarten (z.B. Fichte, Kiefer, Eiche, Buche etc.) sei anhand der Bilder 12 - 15 verdeutlicht und ist für jeden nachvollziehbar.

Jedoch bewirken auch Unterarten einer Holzart (z.B. europäische, nordische oder Sitka-Fichte) eine Eigenschaftsstreuung.

Die Holzart Fichte z.B. umfasst zurzeit ca. 40 Unterarten, die die nördliche, gemäßigte Zone Europas, Nordamerikas und Asiens besiedeln.

Auf Grund des weitverbreiteten Besiedlungsgebietes und der damit verbundenen teilweise voneinander isolierten Entstehung (nach der Eiszeit) sowie den damit verbundenen unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Bodenverhältnissen, weisen die einzelnen Unterarten untereinander mehr oder weniger deutliche genetische Unterschiede und Unterschiede im inneren Aufbau (auch erkennbar durch unterschiedliche Rohdichten) auf.

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Unterschiede als Folge der jeweiligen Anpassung an die Umwelt auch Einfluss auf das Wasseraufnahme-, Wassereinlagerungs- und Wasserleitvermögen sowie die damit verbundene elektrische Leitfähigkeit haben.

„Für das Wachstum gilt, daß an kurze Vegetationsperioden mit langen Tagen angepasste Fichten vom nördlichen Arealrand (Nordskandinavien, Sibirien) aber auch solche aus den Hochlagen Mitteleuropas langsam wachsen. Außerdem treiben sie im Frühjahr früh aus (Provenienz Strömsnäs und Hatfjellidal). Fichten, die in klimatisch günstigeren Regionen des Fichtenareals beheimatet sind, wachsen schneller und sie treiben später aus.“ [IR2]

Unterschiede in der Rohdichte von Holzarten und Holzunterarten sind auf den Zellwandanteil, d.h. auf das Volumen der Zellwände zurückzuführen. Die Reindichte der Zellwände (= Masse des darrgetrockneten Holzes zu Volumen der reinen Zellwand, ohne Hohlräume) beträgt für alle Holzarten bzw. Holzunterarten einheitlich ca. 1.500 kg/m³.

Je höher die Rohdichte, umso höher der Zellwandanteil und umso geringer der Zellhohlraumanteil. Mit Erhöhung des Zellwandanteils erhöht sich auch der Fasersättigungspunkt, d.h. der maximale Feuchtegehalt in den Zellwänden. [NI;S.14]

Die Eigenschaftsstreuung, welche sich aus den Unterschieden der einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten zueinander ergeben, können als systematische Messabweichung betrachtet werden.

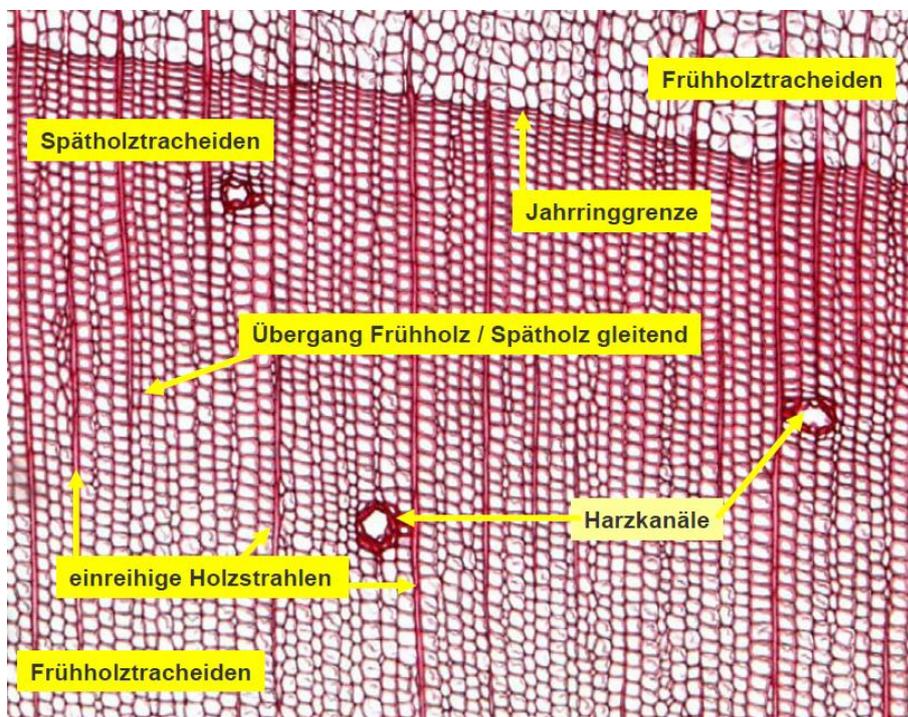


Bild 12: Fichte, mikroskopischer Querschnitt [TU;S.5]

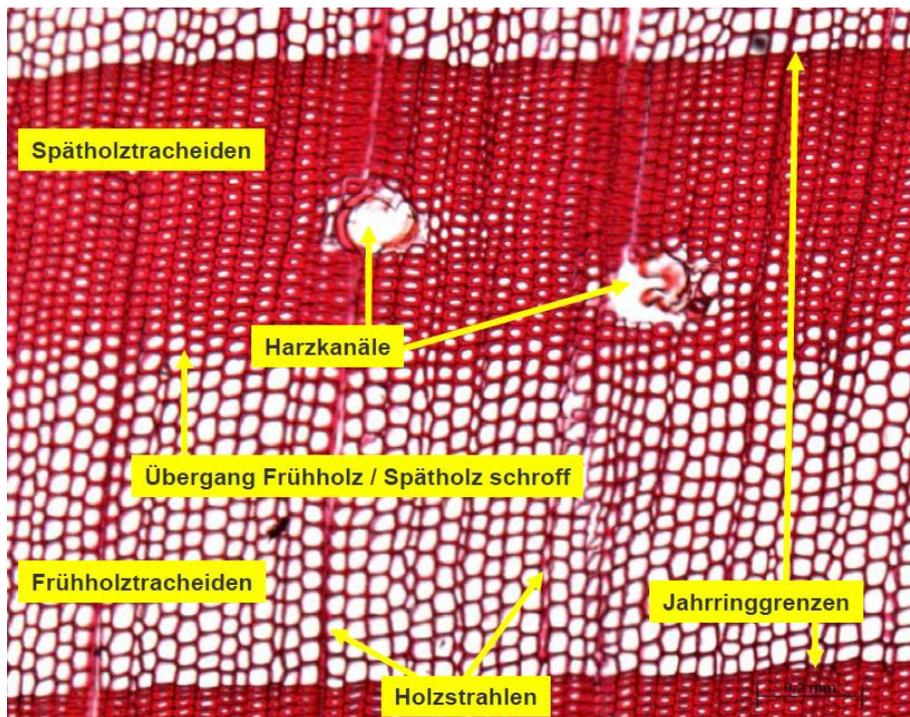


Bild 13: Kiefer, mikroskopischer Querschnitt [TU;S.2]

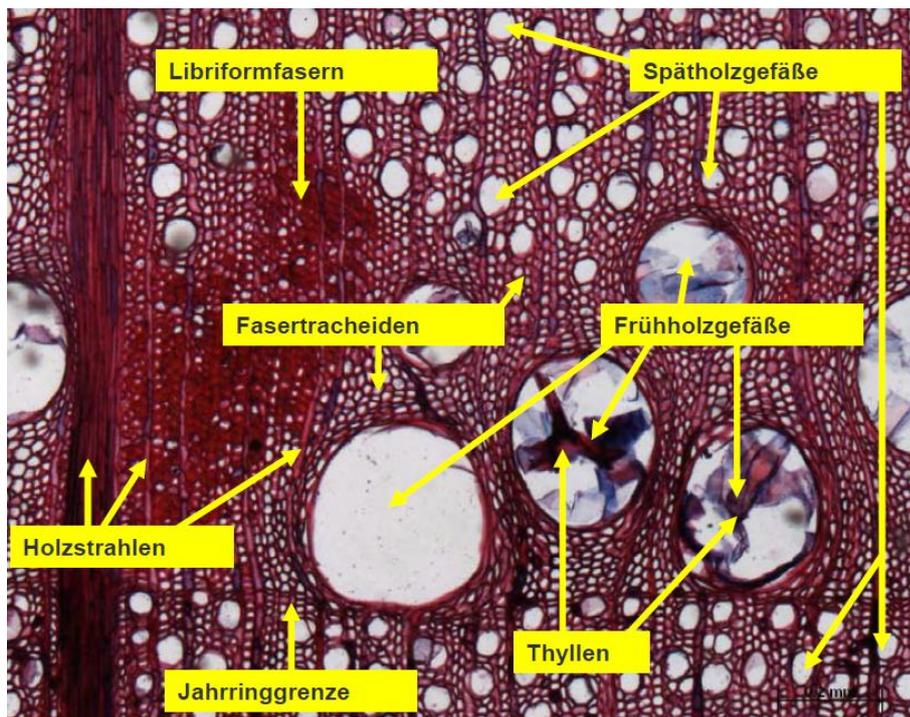


Bild 14: Eiche, mikroskopischer Querschnitt [TU;S.9]

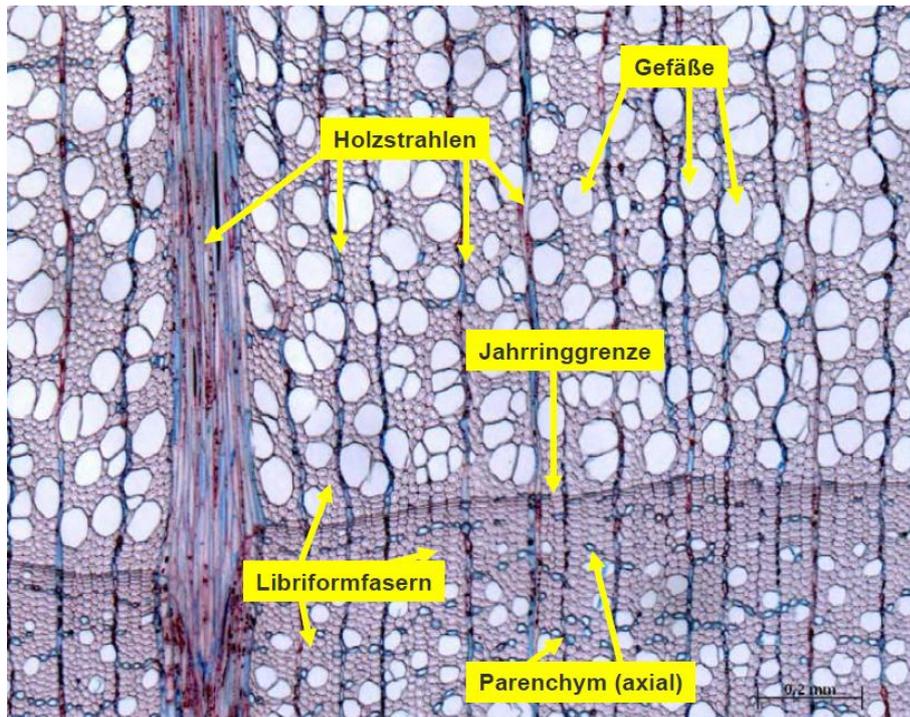


Bild 15: Buche, mikroskopischer Querschnitt [TU;S.15]

(SM-2) Die Messgenauigkeit der Messgeräte wird u.a. durch die, für die einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten spezifischen Holzsorten-Einstellungen und den damit verbundenen (Geräte-)Kalibrierungen (Widerstandskennlinien) bestimmt.

Dabei basieren die Kalibrierfunktionen auf, durch die jeweiligen Entwickler/Hersteller **selbst** ausgewählte Holzproben bzw. -muster, welche als „Referenzmaterial“ dienen und **selbst** durchgeführte Versuche mit statistischer und mathematischer Ableitung.

Kalibrierungen (Widerstandskennlinien) können auch „falsch“ bzw. ungenau sein.

Wie bereits erläutert, gibt es für die Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz kein Normal und keine von einem sonstigen staatlich anerkannten Institut vorgegebene Werte.

Lediglich für die Holzart Fichte hatte in den Jahren 2004/2005 die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart) von verschiedenen Herstellern von Holzfeuchtemessgeräte den Auftrag bekommen über Testreihen eine von den Herstellern für ihre jeweiligen Geräte zugrunde gelegte Kalibrierkurve für Fichte zu bestätigen, da im Rahmen der Herstellerbefähigungsnachweise zum Kleben tragender Holzbauteile nach DIN 1052 zur Qualitätssicherung die Verwendung **anerkannter** Holzfeuchte-Messgeräte erforderlich war/ist.

Die Prüfung bezog sich auf einen Holzfeuchtebereich (Prüfbereich) zwischen ca. 6 % und 18 %, da eine Verarbeitung von Brettschichtholz nur bis zu einer Holzfeuchte von maximal 15% zulässig ist und der Prüfbereich diesbezüglich ausreichend war/ist.

Im Ergebnis der Überprüfung erhielten die Hersteller eine entsprechende Anerkennung (Bild 16).

Somit liegt für HWM zumindest ansatzweise für die Holzart Fichte eine verbindliche Prüfung der Messgenauigkeit vor.

Zum damaligen Zeitpunkt stand auch die Prüfung und Anerkennung von (Geräte-) Kalibrierungen (Widerstandskennlinien) für andere Holzarten (Kiefer, Lärche, Douglasie) durch die MPA Stuttgart im Raum, wobei diese bis zum heutigen Tage nicht erfolgt sind.

Nach Kenntnis des Verfassers gibt es, außer für die Holzart Fichte in o.g. Form, keine Prüfung und Bescheinigung einer Messgenauigkeit von HMW in o.g. bzw. anderweitig unabhängiger Form. Ob die Hersteller Ihre Messgeräte bzw. Kalibrierungen mit denen anderer Hersteller (heimlich) abgleichen ist nicht bekannt.

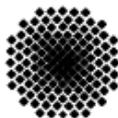
Diesbezüglich sei dann auch folgender „Mythos“ aufgeklärt:

Die im Punkt 2 – Einleitung und Problemstellung zitierten Ausnahme: „Die vom Otto-Graf-Institut an der MPA Stuttgart für den anerkannten Holzleimbau nach DIN 1052 vorgegebene Kalibrierkurve für die Holzart Fichte“ [GA1;S.88] gibt es (bis zum heutigen Tage) **nicht**.

Es gibt lediglich, wie bereits beschrieben, Kalibrierkurven/Kalibrierfunktionen, welche durch die Hersteller selbst erstellt und durch die MPA Stuttgart geprüft wurden.

Die Kalibrierkurven/Kalibrierfunktionen und alle weiteren Ergebnisse sind Betriebsgeheimnisse der betreffenden Messgeräte-Hersteller.

Anfragen seitens des Verfassers an die Hersteller der im Rahmen dieser Thesis verwendeten HMW hinsichtlich der Übersendung von Kalibrierkurven/Kalibrierfunktionen blieben (erwartungsgemäß) erfolglos.



**Anerkannte Holzfeuchtemeßgeräte zur Verwendung im Rahmen des
Herstellerbefähigungsnachweises zum Kleben tragender Holzbauteile**

(Stand: 12 / 2005)

1. Handmeßgeräte

„H-DI-3.10“, Kennlinie 4 (Fichte), 20 °C	BES Bollmann GmbH
„Combo 100 / 200“ mit der H-DI-3.10 – Kennlinie Fichte, 20 °C	Zepplinstraße 14, 78244 Gottmadingen Telefon 07731 - 78 60, Fax 78 61 45
„FME“ und „FMD 6“ Kennlinie 196 (Fichte), 20 °C	Brookhuis Micro-Electronics BV Postfach 11, NL - 7500 AA Enschede Telefon 0031 53 - 4 80 36 36, Fax 4 80 36 46
„M 2050“ und „M 4050“, Kennlinie 373 (KLB 2 - Eichung für Fichte), 20 °C	Gann Meß- und Regeltechnik GmbH Postfach 100165, 70826 Gerlingen Telefon 07156 - 4 90 70, Fax 49 07 40
„GMH 3830 und GMH 3850“, Kennlinie "h 460" (für Fichte), 20 °C	Greisinger electronic GmbH Hans-Sachs-Straße 26, 93128 Regenstauf Telefon: 09402 - 93 83 - 0, Fax 09402 93 83 - 33
„Aqua Boy“ BHM I	K. P. Mundinger GmbH Postfach 1260, 71265 Renningen Telefon 07159 - 93 67 00, Fax 93 67 07

2. Taktmeßgeräte

„Tromatic TM-UMEC 2230“	BES Bollmann GmbH
„Hydromat DMT 6 bzw. 7 oder 8“	Gann Meß- und Regeltechnik GmbH

3. Durchlaufmeßgeräte

Kontaktfreies Industrie-Holzfeuchtemeßgerät "FMI" für Fichte und Kiefer im Längsdurchlauf und mit einer Rohdichtekorrektur der Meß- werte	Brookhuis Micro-Electronics BV
---	--------------------------------

4. Einrichtung für Darrproben

Geeignete Waage mit Trockenschrank (Trockentemperatur 103 °C)

12 / 2005

Bild 16: Übersicht anerkannter Holzfeuchtemessgeräte, herausgegeben durch die MPA Stuttgart

(SM-3) Die ggf. falsche Einstellung der Holzart, insbesondere einer Holzunterart am Gerät und damit falschen Kalibrierfunktion durch den Messgeräte-Bediener auf Grund einer falschen Holzartenbestimmung kann nicht ausgeschlossen werden und ist ebenfalls als systematische Messabweichung einzustufen, da sie sich in der Praxis als sehr schwierig darstellen kann und nicht zufällig erfolgt bzw. ein Zeichen für fehlende Qualifikation sein muss.

Im Rahmen der industriellen Bearbeitung von Holz kann die Herkunft sicherlich eindeutig bestimmt und demzufolge am Gerät eingestellt werden.

Auf der Baustelle, insbesondere wenn das Holz mehrere „Irrfahrten“, z.B. über Großhändler hinter sich hat und auch bei Sanierung sind dagegen in der Regel die Herkunft und insbesondere die Holzunterart nicht mehr bestimmbar, so dass die Einstellung diese am Gerät objektiv nicht möglich ist.

In diesem Zusammenhang empfiehlt sich zusätzlich die Einstellmöglichkeit einer Holzunterarten-**Mittelung**, welche jedoch in heutigen handelsüblichen HMW nicht vorhanden ist. Diese kann dann zwar nicht so genau sein, wie die zutreffende Holzunterart-Einstellung. Sie wäre aber wiederum genauer, als eine falsch eingestellte Holzunterart und kann nicht zu solchen „Fangfragen“ führen wie z.B. „Woher wissen Sie, dass es sich um eine mitteleuropäische Fichte handelt?“.

(SM-4) Die Ergebnisse der für die Kalibrierung und Rückführbarkeit verwendeten direkten Messverfahren (Gravimetrisches Verfahren bzw. Chemisches Verfahren) werden zwar als unstrittig angesetzt, jedoch weisen diese Messverfahren auch eigene Messunsicherheiten auf.

Die direkten Messverfahren sind darauf ausgelegt, dass dem Holz möglichst nur die wässrigen Bestandteile entzogen und darüber der Feuchtegehalt für Wasser ermittelt werden.

Nach LESCHNIK kann für das Gravimetrisches Verfahren (Darrverfahren) selbst bei sorgfältigem Vorgehen eine Messunsicherheit von +/-0,5 % Feuchtegehalt nicht ausgeschlossen werden. Für das zweite anwendbare direkte Messverfahren, dem Chemischen Verfahren ist sogar mit einer Messunsicherheit von +/-3 % Feuchtegehalt zu rechnen. [LE;S.5]

Der Gründe dafür können sowohl in der

- nicht vollständige Extraktion des Wasser („Untertrocknung“)

als auch in der

- zusätzliche Extraktion weiterer Inhaltsstoffe (z.B. Harze) („Übertrocknung“)

und den damit verbundenen Masseänderungen liegen.

Da die Messabweichung nach Extraktion des Wassers bzw. weiterer Inhaltsstoffe entsteht, wirkt sie sich **systematisch** auf alle Messungen vor Extraktion aus.

Bei den direkten Messverfahren ist zu beachten, dass

- eine „Untertrocknung“, d.h. nicht vollständige Extraktion des Wasser ein gegenüber dem wahren Feuchtegehalt zu geringes Messergebnis

und eine

- „Übertrocknung“, d.h. zusätzliche Extraktion weiterer Inhaltsstoffe ein gegenüber dem wahren Feuchtegehalt zu hohes Messergebnis

bewirkt.

Als für die Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz vorrangiges direktes Messverfahren hat sich das Darrverfahren (Gravimetrisches Verfahren) etabliert, wobei zu beachten ist, dass sich dabei im Holz vorhandenes Harz verflüssigt und austreten kann, wodurch eine „Übertrocknung“ bewirkt wird.

Das Darrverfahren ist daher nicht für alle Holzarten anwendbar.

Grundsätzlich können indirekte (abgeleitete) Messverfahren nicht genauer sein, als die für die Kalibrierung und Rückführbarkeit verwendeten direkten Messverfahren.

Die Messunsicherheiten der direkten Messverfahren sind bei der weiteren Ermittlung von Messunsicherheiten für die indirekten Verfahren zu berücksichtigen („Fehlerfortpflanzung“).

(SM-5) Für die Holz Trocknung gibt es 2 grundlegende Verfahren – die natürliche und die technische Holz Trocknung.

Bei der (planmäßigen) natürlichen Holz Trocknung wird das Holz mittels geeigneter Lagerung (Stapelung) dem örtlichen Klima ausgesetzt. Das Holz passt sich dabei auf Grund seines Sorptionsverhaltens naturgemäß allmählich dem umgebenden Klima an, was die Reduzierung des Feuchtegehaltes (Holz Trocknung) bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte (Ausgleichsfeuchte zwischen ca. 14 % bis 16 %) bewirkt.

Bei der technischen Holz Trocknung wird das Holz in einer dafür geeigneten technischen Anlage prozessgesteuert bei einer Temperatur von mindestens 55 °C mindestens 48 Stunden auf eine Holzfeuchte (Feuchtegehalt) $\leq 20\%$ getrocknet. [DIN 68800-1;P.3.20]

Bei der technischen Holz Trocknung verdampfen durch die Erhitzung flüchtige Holzinhaltstoffe wie z.B. Pinen und Caren und die im Holz enthaltenen Eiweiße werden denaturiert (im Prinzip „hart gekocht“).

Durch DU/GEISSEN/NOACK wurde anhand von Buchenholz der Einfluss der Art der Holz Trocknung - freiluft-getrocknet bzw. technisch-getrocknet auf die elektrische Leitfähigkeit untersucht. Dabei stellten sie (für einen Feuchtebereich zwischen 5 % und 30 %) fest, dass die **freiluft-getrockneten Prüfkörper bei gleicher Holzfeuchte** (Feuchtegehalt) gegenüber den technisch-getrockneten Prüfkörpern einen **höheren elektrischen Widerstand** aufwiesen, welcher etwa einem Holz-Feuchtegehalt von 1 % entsprach. [DU;S.4]

Im Falle einer Messung mit einem HMW würde das bei den selben Bedingungen (einschl. der selben Holzsorteneinstellung) bedeuten, dass durch das Gerät bei **freiluft-getrocknetem Holz** ein ca. 1 % **höherer Feuchtegehalt**, als bei technisch-getrocknet Holz angezeigt wird.

Es davon auszugehen, dass die o.g. Erkenntnisse grundsätzlicher Natur und auch auf andere Holzsorten übertragbar sind – abschließend ergründet ist dies jedoch nicht.

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die Art der Trocknung des zu messenden Holzes.

(SM-6) Wasser, in dem Salze, Säuren oder Basen gelöst sind, ist elektrisch leitend.

„Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für die Summe aller ionisch vorliegenden Substanzen (Salze, Säuren, Laugen (=Basen, A.d.V.) und einige organische Substanzen) in Flüssigkeiten“. [WA;S.3]

„Die Untersuchung eines gegebenen Elektrolyten (leitfähiges Wasser, A.d.V.) zeigt, dass die **Leitfähigkeit** sowohl von der **Art** als auch von der **Konzentration** und der **Ladung** der Ionen abhängt. Die Leitfähigkeit einer Lösung nimmt bei steigender Anzahl von Ionen in der Lösung zu, also ist die Leitfähigkeit der Konzentration zunächst einmal proportional.

Die Leitfähigkeit ist jedoch nur bis zu einem bestimmten Grad der Ionenkonzentration proportional: ab einer bestimmten Konzentration nimmt die Leitfähigkeit wieder ab, weil die Ionen sich gegenseitig behindern. Dies wird durch eine geringere Dissoziation und Mobilität der Ionen erklärt (gegenseitige Anziehung der Ionen u.a.).“ [IR3]

Verschiedene Wässer sind durch unterschiedliche Leitfähigkeiten gekennzeichnet.

„Holz im lebenden Stamm ist schwach sauer, jedoch herrschen nach Holzart, Stammteil und Standort große Unterschiede. Im Allgemeinen scheint das Kernholz etwas saurer zu sein als das Splintholz und der Säuregrad mit der Standhöhe abzunehmen.“ [KO2;S.177]

„...; zu Beginn der Jahrringbildung sind beispielsweise Fichten- und Tannenkernholz um 0,2 bis 0,4 pH-Grade sauer als während der übrigen Vegetationszeit und enthalten demnach doppelt so viel freie Wasserstoffionen;...“ [KO2;S.41]

Wird dem Holz von außen (fremdes) Wasser eingetragen, z.B. durch einen Wasserschaden durch ein undichtes Dach oder durch einen „Rohrbruch“ kommt der Leitfähigkeit des Wasser eine ganz besondere Bedeutung zu.

Zur Veranschaulichung seien folgende **spezifische Leitfähigkeiten** genannt:

Reinstes Wasser: ca. 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

Destilliertes Wasser: bis ca. 0,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

Regenwasser: ca. 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

Trink- bzw. Grundwasser: ca. 300-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

Industrielles Abwasser: ca. 5 mS/cm ;

Meerwasser: ca. 50 mS/cm .

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die spezifische Leitfähigkeit verschiedener Wässer im zu messenden Holz.

(SM-7) Neben der Art, der Konzentration und der Ladung der Ionen (siehe Punkt SM-6 - Leitfähigkeit des Wasser) wird die Leitfähigkeit auch durch die **Art der Elektroden** beeinflusst. Dabei ist die leitfähige (unisolierte) Oberfläche, d.h. die mögliche „Andock-Fläche“ an die Elektroden und die damit verbundenen „Wegbreite“ des Ionenstroms (Bild 17) von Bedeutung. Zudem wird durch den eigentlichen Abstand der Elektroden, d.h. durch die „Weglänge“ des Ionenstroms die Leitfähigkeit beeinflusst. Die spezifische Leitfähigkeit der Elektroden in Abhängigkeit vom Material kann, sofern es sich um metallische Leiter handelt und deren „Andock-Fläche“ nicht korrodiert ist, vernachlässigt werden.

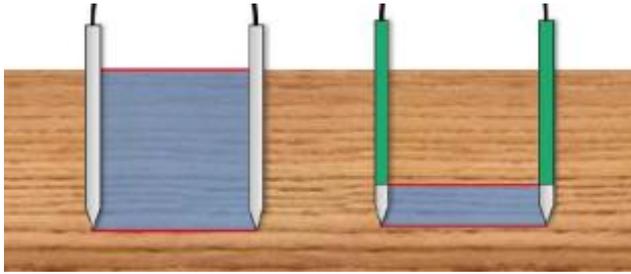


Bild 17: Schematische Darstellung des Ionenstroms bei unisolierten Elektroden (links) und isolierten Elektroden (rechts); [ME;S.33;d.V.b.]

„Ausgehend von Abb. 2 kann man sich vorstellen, dass sich zwischen den beiden Elektrodenplatten ein **Lösungsquerschnitt** befindet, der für die Gesamtlösung repräsentativ ist.

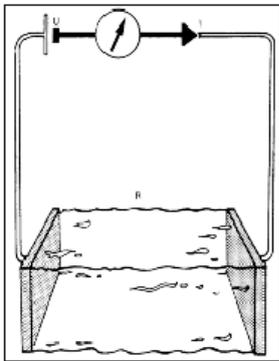


Abb. 2 (aus Original): Leitfähigkeitsmessung einer Lösung

Wenn nun eine Gleichspannung angelegt wird, werden die Ionen zu den entsprechenden Platten gezogen und dort entladen. Es ist plausibel, dass sich bei einer größeren Plattenoberfläche die Anzahl der bewegten Ionen ebenfalls vergrößert und demzufolge die Leitfähigkeit zunimmt. Umgekehrt nimmt die Stärke des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden ab, wenn die Entfernung zwischen den Platten vergrößert wird, so dass eine geringere Anzahl von Ionen pro Zeiteinheit an den Platten entladen wird.

Zusammengefasst gilt: Eine größere Elektrodenoberfläche O führt bei gleich hoher Spannung zu einer höheren Leitfähigkeit.

Und: Eine größere Entfernung L zwischen den Elektroden führt bei gleich hoher Spannung zu einer niedrigen Leitfähigkeit. Demnach hängt die gemessene Leitfähigkeit sowohl von der Entfernung L zwischen den Elektroden als auch von deren Oberfläche O ab.“ [IR3]

Durch die Hersteller von HMW werden sowohl unisolierte als auch isolierte Elektroden angeboten (Bild 18). Unisolierte Elektroden weisen im Unterschied zu isolierten Elektroden eine größere Elektrodenoberfläche auf und bewirken grundsätzlich eine höhere Leitfähigkeit. Im direkten Vergleich (unter denselben Bedingungen) wird beim Einsatz unisoliertes Elektroden gegenüber isolierten Elektroden ein höherer Feuchtegehalt (höhere Leitfähigkeit) vermittelt.

Für die im Rahmen dieser Thesis verwendeten HMW war nicht (z.B. aus Bedienungsanleitungen) erkennbar, welche Art von Elektroden (isoliert bzw. unisoliert) der Kalibrierung zugrunde lagen und es bestand auch nicht die Möglichkeit einer entsprechenden Justierung der Geräte (Einstellung: isoliert bzw. unisoliert).

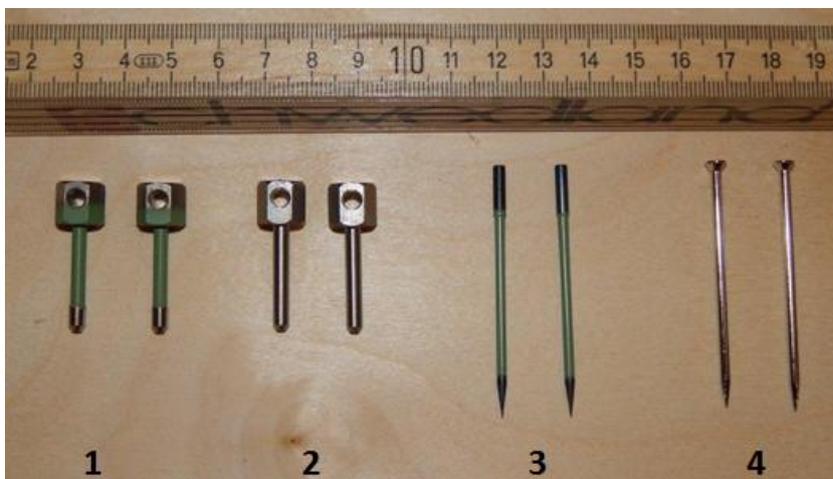


Bild 18: Arten von handelsüblichen Elektroden für HMW

- 1 = Einschlagelektroden – isoliert (mit direktem Anschluss für Messkabel)
- 2 = Einschlagelektroden – unisoliert (mit direktem Anschluss für Messkabel)
- 3 = Elektrodenspitzen – isoliert in Verbindung mit Einschlag- bzw. Rammgerät
- 4 = Elektrodenspitzen – unisoliert in Verbindung mit Einschlag- bzw. Rammgerät

(SM-8) Auch die meisten elektrischen bzw. elektronischen Bauteile in den Messgeräten bedürfen für ihre Funktion einer eigenen (mit Unsicherheiten verbundenen) Kalibrierung. Zudem wird die Funktion bzw. Genauigkeit elektrischer bzw. elektronischer Bauteile durch Leitungs-, Kontakt- bzw. „Eigen“-Widerstände sowie durch die Umgebungstemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte und weitere Faktoren beeinflusst.

Nach DU/GEISSEN/NOACK spielen diese Eigen-Unsicherheiten der elektrischen bzw. elektronischen Bauteile jedoch keine wesentliche Rolle für die Genauigkeit der Feuchtebestimmung, da sie nur einen Messfehler von etwa $\pm 0,1$ % Feuchtegehalt (Holzfeuchte) bewirken. [DU;S.2]

Systematische Messabweichungen

- beeinflussen alle Messwerte in gleicher Weise;
- können nur durch zusätzliche Informationen (Vergleich mit unstrittigen Messverfahren, z.B. Darrverfahren) erkannt und beseitigt werden;
- können durch Verfahren der Statistik weder erkannt noch beseitigt werden;
- bewirken eine geringe Genauigkeit auf Grund einer zwar hohen Präzision, aber geringen Richtigkeit.

3.4.5.2. Zufällige Messabweichungen (Abkürzung: ZM)

Bei der zufälligen Messabweichung handelt es sich um eine:

„Komponente der Messabweichung, die bei wiederholten Messungen in unvorhersagbarer Weise schwankt“. [IW;P.2.19]

Zufällige Messabweichungen basieren auf:

- (ZM-1) Inhomogenität (Eigenschaftsstreuung) des Holzes – innerhalb der einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten bzw. innerhalb eines Baum selbst;
- (ZM-2) Strukturschädigungen des Holzes durch klimatische, biologische bzw. technische Einflüsse;
- (ZM-3) Vorbehandlungen, wie z.B. eingetragene Holzschutzmittel;
- (ZM-4) Temperaturabweichungen/-schwankungen;
- (ZM-5) unterschiedliche Feuchteverteilung im Holz (Feuchtegradient);
- (ZM-6) zeitliche Instabilität der Messung und damit des Messergebnisses;
- (ZM-7) nicht erkennbare Abweichungen in der Messanordnung.

(ZM-1) Holz weist eine mehr oder weniger starke Inhomogenität, d.h. Eigenschaftsstreuung auf.

Während die Eigenschaftsstreuung, welche sich aus den Unterschieden der einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten zueinander ergeben, als systematische Messabweichung betrachtet werden können, sollte die Eigenschaftsstreuung innerhalb der einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten und auch innerhalb eines Baum selbst als zufällige Messabweichung betrachtet werden.

Die Ursachen für o.g. Eigenschaftsstreuung sind im **makroskopischen, mikroskopischen** bzw. **submikroskopischen** Holz-Aufbau zu finden.

Im **makroskopischen** Bereich besitzen Kernholz und Splintholz zueinander einen unterschiedlichen Aufbau mit daraus resultierend unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Wassereinlagerung und Wasserleitfähigkeit. „Kernholz enthält keine lebenden Zellen mehr. Die Verkernung wird durch anatomisch-physiologische Veränderungen, wie z.B. Hoftüpfelverschluss bei Nadelholztracheiden), Thyllenbildung (bei Laubholzgefäßen), Stoffabscheidungen, -umwandlungen sowie -einlagerungen im Zellwandbereich verursacht.“ [WÜ;S.22]

Im **mikroskopischen** Bereich können sich die einzelnen Zelltypen mit ihren spezifischen Funktionen (z.B. Frühholztracheiden zur Wasserleitung, Spätholztracheiden zur Festigung (Bilder 12, 13) in Abhängigkeit von Boden, Klima, Baumalter, forstwirtschaftlichen Maßnahmen etc. unterschiedlich ausbilden und dadurch eine unterschiedliche Leitfähigkeit innerhalb des Holzes bewirken.

Im **submikroskopischen** Bereich führen Unterschiede im Feinbau der Zellwand und Zellwanddurchbrechungen zur Eigenschaftsstreuung. Die Zellwand an sich besteht aus verschiedenen (Zellwand-)Schichten (Bild 19), welche in sich Dickenschwankungen aufweisen können. Zudem besitzt die Zellwand verschiedengestaltete Verdickungen.
[WÜ;S.107]

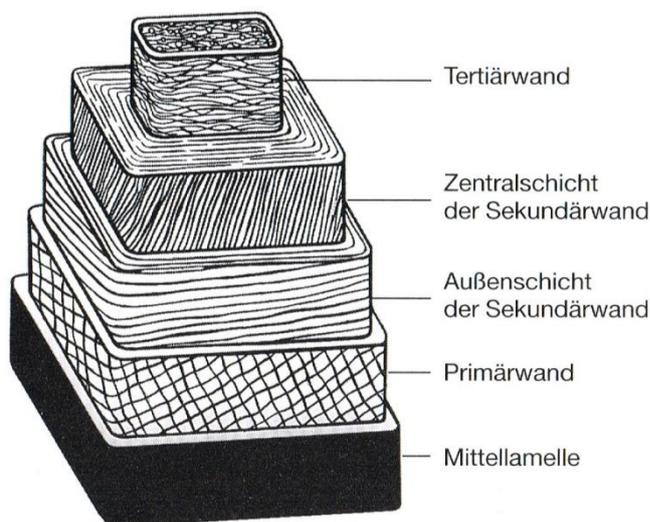


Bild 19: Zellwandschichten einer Nadelholztracheide, schematisch nach LIESE;
[WÜ;S.104]

Vom Grundsatz her kann man die Verschiedenartigkeit bzw. Gleichheit im Aufbau von Holz mit der Verschiedenartigkeit bzw. Gleichheit im Aufbau von Menschen vergleichen.

Jedes/jeder ist anders und doch irgendwie gleich.

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die Inhomogenität im Baum an sich bzw. in sich.

(ZM-2) Klimatische, biologische bzw. technische Einflüsse bzw. Einwirkungen können Schädigungen der Struktur im Holz bewirken, die zu veränderten Holzeigenschaften und dadurch zu unterschiedlichen Leitfähigkeiten führen.

Klimatische Einflüsse wie Hitze, Kälte, Immissionen etc. können z.B. zur Bildung von Stauchlinien und Zellwandbrüchen führen.

Biologische Einflüsse, wie Bakterien, Pilze bzw. Insekten führen zur Zerstörung der Zellwand, indem Holzinhaltsstoffe (z.B. Cellulose) abgebaut werden bzw. Fraßgänge angelegt werden.

Technische Einflüsse, z.B. durch mechanische Beanspruchung bzw. Bearbeitung können z.B. zu stark gewellten bzw. voneinander gelösten Holzfasern, Zellwandstauchungen und Zellwandrissen führen.

Grundsätzlich sollen die Messungen des Feuchtegehaltes mittels HMW in ungestörten, d.h. auch ungeschädigten Holzbereichen erfolgen. O.g. Schädigungen können aber teilweise von außen nicht erkennbar sein.

Für erkennbar geschädigte Holzbereiche stellt sich die grundsätzliche Frage, warum für diese der Feuchtegehalt überhaupt ermittelt werden soll/muss, wenn die erforderlichen Eigenschaften, insbesondere Tragfähigkeit nicht mehr vorhanden sind.

(ZM-3) Bei insbesondere älteren Holzkonstruktionen kann der Eintrag von Holzschutzmitteln, Flammenschutzmitteln etc. nicht ausgeschlossen werden. Dieser Eintrag kann vollständig, aber auch partiell erfolgen und zudem nicht erkennbar sein.

„Einige Arten von Holzschutzmitteln, Flammenschutzmitteln oder Mitteln zur chemischen Behandlung, insbesondere beim Einsatz von Salzen können die Genauigkeit der Messung beeinflussen und erfordern daher jeweils eine spezielle Kalibrierung des Messgerätes für jede Art der Behandlung.“ [DIN13183-2;P.4]

Diesbezüglich wird auf den Punkt 3.4.5.1. – SM-6 und dem darin beschriebenen Einfluss von Wasserinhaltsstoffen auf die elektrische Leitfähigkeit und einer dahingehend nicht möglichen Berücksichtigung verwiesen.

(ZM-4) Die elektrische Leitfähigkeit des im Holz enthaltenen Wasser ist neben den Holzinhaltsstoffen (Ionen) auch von der Temperatur des Wasser abhängig ist.

Die elektrische Leitfähigkeit, d.h. die Ionenwanderung erhöht sich mit steigender Temperatur, d.h. abnehmender „Zähflüssigkeit“ (Viskosität). (Bild 20)

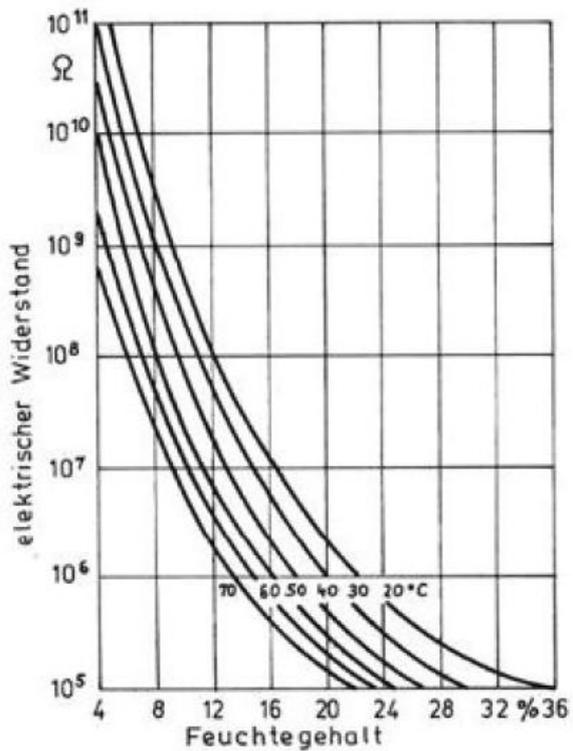


Bild 20: Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Holz (nach KEYLWERTH & NOACK, 1956); [ME;S.32]

Diesbezüglich ist im Rahmen von Kalibrierungen neben der Holzart-/Holzsorte auch die zum Messzeitpunkt vorhandene Holz-Temperatur zu berücksichtigen. Dabei wird davon ausgegangen, dass ggf. nach Akklimatisierung die Umwelt-/Raum-Temperatur gleich der Holz-Temperatur gleich der Temperatur des im Holz enthaltenen (leitenden) Wassers ist. Beide Einstellungen (Holzart/-sorte und Holz=Wasser-Temperatur) sind für gebrauchstaugliche HMW und eine normgerechte Messung nach DIN EN 13183-2 unerlässlich.

(ZM-5) Änderungen der Klimabedingungen und die verbundene Änderung der Luftfeuchtigkeit sowie Wasserlagerung bewirken im Holz auf Grund des Sorptionsverhaltens einen „Anpassungsdrang“, d.h. das Holz gibt bis zum Erreichen eines (Feuchte-) Gleichgewichtszustandes mit der Umgebung Feuchte ab bzw. nimmt Feuchte auf. Dabei passen sich zuerst jeweils nur die äußeren Schichten und zeitlich verzögert der innere Querschnitt an, so dass sich in dieser Phase im Holz eine unterschiedliche Feuchteverteilung (Feuchtegradient) ausbildet.

In der Regel erfolgen Messungen mittels HMW nicht im Zustand des (langfristigen) Gleichgewichts zwischen Holz-Feuchtegehalt und Umgebungsfeuchte, sondern aus gegebenem Anlass infolge Unkenntnis der vorherigen Umgebungsfeuchte in unbestimmten Situationen (z.B. Holzanlieferung auf Baustelle) bzw. Änderung der Umgebungsfeuchte (z.B. Wassereintritt).

Durch die Messungen mit HMW an sich und durch die Stichprobenartigkeit können die unterschiedliche Feuchteverteilung im Holz jedoch nicht bzw. nur ansatzweise erfasst werden.

Eine unterschiedliche Feuchteverteilung im Holz führt zu Unsicherheiten bzw. Abweichungen beim Rückschluss bzw. der Prüfung von Messergebnissen mittels HMW durch direkte Messverfahren (z.B. Darrverfahren).

Durch direkte Messverfahren können nur der durchschnittliche (globale) Feuchtegehalt des jeweiligen Prüfkörpers ermittelt werden, während durch HMW der Feuchtegehalt in einer bestimmten Holztiefe bzw. der höchste Feuchtegehalt gemessen wird.

Auf Grundlage der Kenntnisse über Feuchtegradienten wird derzeit davon ausgegangen, dass der Feuchtegehalt in einer Messtiefe von 30 % der Dicke (Tiefe) des Prüfstückes dem mittleren Feuchtegehalt entspricht. Dahingehend erfolgen auch die durch die DIN EN 13183-2 getroffenen Festlegungen zur Messung mit HMW.

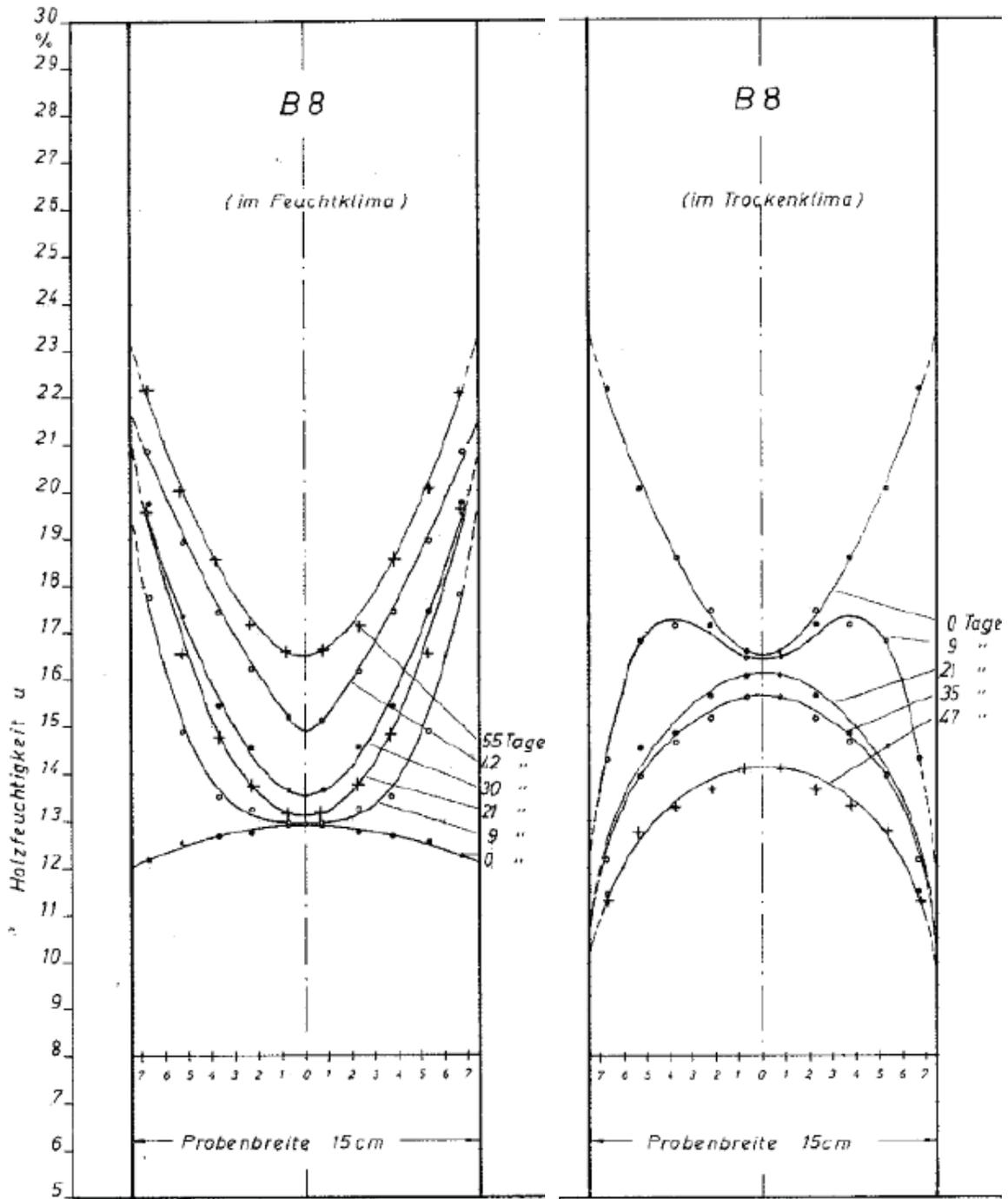


Bild 21: Beispielhafte Veränderung von Feuchtegradienten in BSH-Bauteilen
(MÖHLER & STECK, 1980) [ME;S.15]

(ZM-6) Hervorgerufen durch das Gleichstrom-Prinzip und der damit verbundenen gleichgerichteten Ladungsträger-Bewegung (Wanderung) tritt beim Anlegen einer Spannung jeweils eine Konzentration der positiv geladenen Ionen an der Anoden-Elektrode und der negativ geladenen Ionen an der Kathoden-Elektrode auf. Die Ionen werden an den Elektroden neutralisiert, dabei verändern sich jedoch die elektrischen Verhältnisse an der Kathode, was eine Verringerung der Leitfähigkeit und damit Änderung des Messergebnisses bewirkt. Minimiert werden kann dieser Effekt durch Messverfahren auf Basis Wechselstrom bzw. Gleichspannungs-Messgeräte mit einem Umpoler (Plus- und Minuspol vertauschen), der eine Umpolung der Elektroden bewirkt. [MO;S.61]

Mit zunehmenden Feuchtegehalt bzw. zunehmender Ionenkonzentration verstärkt sich bei Gleichspannungs-Messgeräten der Effekt der Verringerung der Leitfähigkeit mit zunehmender Messdauer.

(ZM-7) Nicht erkennbare Abweichungen in der Messanordnung können hervorgerufen werden durch:

- (ZM-7.1) schlechten Kontakt zwischen Holz und Elektroden;
- (ZM-7.2) eigene statische Aufladung des Messgeräte-Bedieners.

(ZM-7.1) Schlechter Kontakt zwischen Holz und Elektroden kann u.a. durch zur großes „Vorbohren“ oder auch nachträgliches Schwinden des Holzes, z.B. bei Langzeitmessungen verursacht werden und bewirkt einen erhöhten Übergangswiderstand und damit ein zu niedriges Messergebnis (Anzeige eines zu geringen Feuchtegehaltes).

(ZM-7.2) In der Bedienungsanweisung für das im Rahmen dieser Thesis verwendete Holzfeuchtemessgerät der Firma GANN wird darauf hingewiesen, dass sich bei niedrigen Holzfeuchten (Feuchtegehalt) unter 10 %, begünstigt durch äußere Umstände (Reibungen beim Materialtransport, hoher Isolationswert des Umgebungsbereiches, niedrige relative Luftfeuchte, etc.) statische Elektrizität mit hoher Spannung aufbauen kann, die nicht nur zu starken Messwertschwankungen oder Minusanzeigen, sondern teilweise auch zur Zerstörung des Gerätes führen kann. [GA1;S.28]

Zufällige Messabweichungen

- zeigen sich darin, dass bei wiederholten Messungen unter den selben Bedingungen im Allgemeinen nicht die gleichen Messwerte erzielt werden;
- können durch mehrfaches bzw. wiederholtes Messen erkannt werden;
- können durch Verfahren der Statistik (Mittelwert mehrerer Messungen) „bereinigt“ werden;
- bewirken eine geringe Genauigkeit auf Grund einer geringen Präzision, aber hohen Richtigkeit bzw. einer geringen Präzision und geringen Richtigkeit.

3.4.5.3. Grobe Messabweichungen (Abkürzung: GM)

Grobe Messabweichungen sind in dem Sinne nicht definiert. Sie entstehen durch gravierende Irrtümer beim Messen oder Notieren der Werte, Nichtbeachten von größeren äußeren Störeinflüssen, Versagen des Messgerätes o.ä. [MÜ;S.12]

„Erkennt man starke Abweichungen in einer Messreihe eindeutig als grobe Fehler, lassen sich diese Messwerte bei der Auswertung vernachlässigen – aber nur dann!“ [MÜ;S.12]

Da natürlich jede Manipulation des Datensatzes als fragwürdig einzuschätzen ist, ist diesbezüglich sicherzustellen, dass es sich wirklich um eine grobe Messabweichung und nicht um einen vielleicht unerwarteten physikalischen Effekt handelt.

Grobe Messabweichungen basieren auf:

- Fehlbedienung bzw. Defekt des Messgerätes bzw. der Messanordnung;
- gravierend falscher Elektrodenanordnung (z.B. Abstand);
- gravierend schlechten Kontakt zwischen Holz und Elektroden;
- falsche Temperatur-Einstellung am Messgerät;
- falsche Protokollierung von Messergebnissen;
- mangelnde Objektivität des Messgeräte-Bediener;
- usw.

Grobe Messabweichungen werden nicht als Messunsicherheiten gewertet.

Beim Auftreten grober Messabweichungen sind die betreffenden (Einzel-)Messungen falsch und im Rahmen der Auswertungen nicht zu verwenden.

3.4.5.4. Einflussfreie Kenngrößen (Abkürzung: EK)

Folgende Kenngrößen können u.a. als auf die Messung einflussfrei betrachtet werden:

- (EK-1) Luftdruck und relative Luftfeuchte;
- (EK-2) Hysterese-Effekt (Adsorption / Desorption);
- (EK-3) Quellen bzw. Schwinden des Holzes;
- (EK-4) natürliche Holzalterung.

(EK-1) Luftdruck und relative Luftfeuchte stellen einen für die Messung vernachlässigbaren Einfluss dar, zumal dahingehend auch keine Gerätekalibrierung durch den Hersteller erfolgt bzw. Gerätejustierung durch den Anwender möglich ist.

Insofern kann bei den Messungen auf die Erfassung dieser Größen verzichtet werden.

Da jedoch Holz auf Grund seiner **Hygroscopicität** einen Feuchte-Gleichgewichtszustand mit der Umgebung anstrebt, kann bei einem zu prüfendem Holz, welches einem entsprechenden Zeitraum der gleichen Umgebungsfeuchte (relative Luftfeuchtigkeit) ausgesetzt wurde und sich dadurch im Gleichgewicht mit der Umgebung befindet, unter Zugrundelegung der umgebenden relative Luftfeuchte und der Temperatur und den damit zusammenhängenden Feuchte-Isothermen (Linien gleicher Temperatur) z.B. über das Sorptionsdiagramm nach KEYLWERTH (Bild 22) auf den Feuchtegehalt zurückgeschlossen werden. Diesbezüglich ist jedoch anzumerken, dass es auf Grund der Inhomogenität des Holzes und dem nachfolgend beschriebenen Hysterese-Effekt keine „reinen“ Feuchte-Isothermen, sondern einen Feuchte-Bereich gibt und Isothermen eine Idealisierung darstellen.

(EK-2) Trotz gleicher Luftfeuchte und Temperatur unterscheidet sich zwischen Darrzustand und ca. Fasersättigungsbereich der Gleichgewichts-Feuchtegehalt von Holz in der Phase der Adsorption (Wasseraufnahme) von dem in der Phase der Desorption (Wasserabgabe). Dadurch entstehen unterschiedliche Sorptionskurven. Der Unterschied zwischen beiden Sorptionskurven wird als Hysterese-Effekt (Bild 23).

Sowohl in der Normung als auch in den Messgeräten wird der Hysterese-Effekt nicht berücksichtigt. Theoretisch sollte sich der Hysterese-Effekt messtechnisch auch nicht auswirken, da er lediglich Unterschiede im Feuchtegehalt beschreibt.

Ob der Hysterese-Effekt praktisch von Bedeutung ist, ist nach Kenntnis des Verfassers derzeit nicht abschließend untersucht.

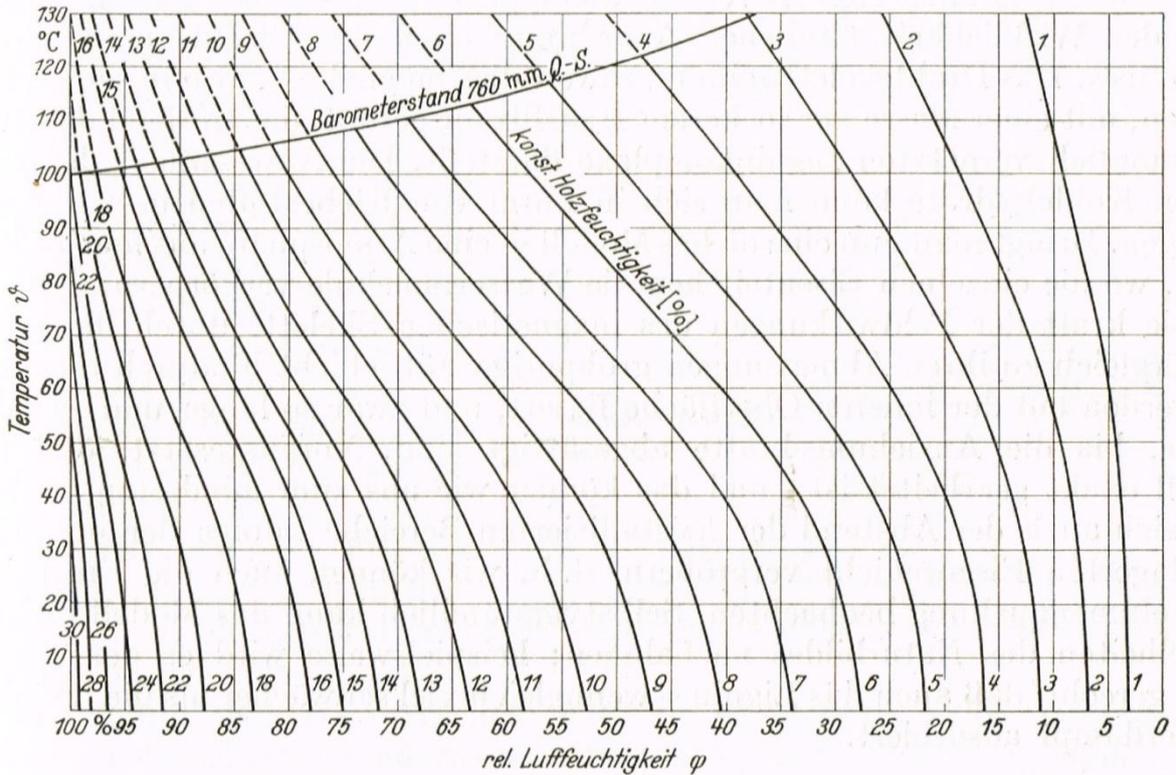


Bild 283. Hygroskopische Isothermen für Fichtenholz (*Picea sitchensis* Carr.). Die von W. K. Loughborough stammende Tafel wurde von R. Keylwerth auf Centigrade umgerechnet, berichtigt und für Temperaturen über 100° extrapoliert.

Bild 22: Sorptionsdiagramm – Hygroskopische Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (nach KEYLWERTH) [KO2;S.387]

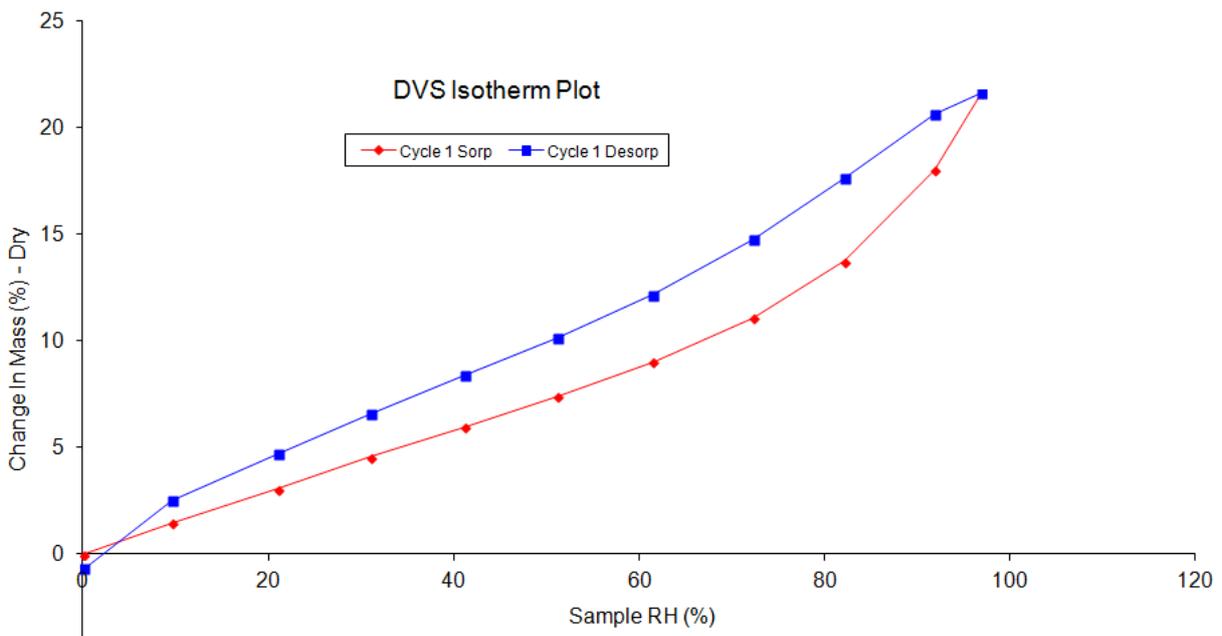


Bild 23: Sorptionskurven - rot: Phase der Adsorption; blau: Phase der Desorption

(EK-3) Die Änderung des Feuchtegehaltes im Holz innerhalb des hygroskopischen Bereiches (vom Darrzustand bis zur Fasersättigung) bewirkt eine proportionale Dimensionsänderung für das Holz, d.h. es erfolgt ein Quellen bzw. Schwinden des Holzstückes). Dabei unterscheiden sich die Quell- bzw. Schwindmaße in den 3 Hauptschnittrichtungen (längs, radial, tangential) wesentlich (Bild 24).

Da jedoch das Quell- und Schwindverhalten immer „gleich“ ist und sich „gleich“ auswirkt, ist davon auszugehen, dass es im Rahmen der Kalibrierung „automatisch“ Berücksichtigung findet und demzufolge keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Holzart	maximales Quellmaß (%)			differentielles Quellmaß (%/%)	
	längs	radial	tangential	radial	tangential
Fichte	0,2-0,4	3,7	8,5	0,19	0,36
Kiefer	0,2-0,4	4,2	8,3	0,19	0,36
Lärche	0,1-0,3	3,4	8,5	0,14	0,30
Buche	0,2-0,6	6,2	13,4	0,20	0,41
Eiche	0,3-0,6	4,6	10,9	0,18	0,34
Teak	0,2-0,3	2,7	4,8	0,16	0,26

Bild 24: Quellung und Schwindung von Holz nach DIN 52184 [NI2,S.13]

maximales Quellmaß = Dimensionsänderung in % bezogen auf den Darrzustand

differentielles Quellmaß = Dimensionsänderung in % pro % Feuchteänderung

(EK-4) Bei einer natürlichen Holzalterung ohne Veränderung der Struktur bzw. Inhaltsstoffe durch schädigende Einflüsse (siehe Punkt 3.4.5.2 - ZM-2) ist davon auszugehen, dass sich die Leitfähigkeit bzw. der Widerstand und damit die Messergebnisse nicht ändern.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1. Messmethode („allgemeine Beschreibung des logischen Vorgehens zur Durchführung einer Messung“ [IW;P.2.5])

Grundlage für die Kalibrierung von HMW sind experimentelle Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen dem **Feuchtegehalt von Holz** als unabhängigen Ausgangswert und dem diesbezüglich gemessenen **elektrischem Widerstand** als davon (scheinbar) abhängigen Wert und die Ableitung einer statistische Beziehung (Korrelation) und einer Trendlinie auf Grundlage einer mathematischen Funktionsgleichung (Interpolation).

Mit einer im Ergebnis entwickelten mathematischen Funktionsgleichung kann auf Grund eines gemessenen elektrischen Widerstandes ein mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhandener Feuchtegehalt von Holz „vorhergesagt“ werden.

Korrelationen und Interpolationen stellen eine “Bereinigung/Idealisierung“ der Messergebnisse dar.

Korrelationen und Interpolationen sind ein Hinweis aber kein Beweis für Ursachen- und Wirkungs-Zusammenhänge.

Für die experimentellen Untersuchungen bestand anfänglich das Ziel

- anhand der Holzart Fichte,
- einem definierten Prüfaufbau und einer Umgebungstemperatur von 20 °C
- für alle Phasen des Wasseranteils im Holz (zwischen Darrzustand und Wassersättigungspunkt)
- jeweils vorhandene elektrische Widerstände zu ermitteln und diese auf Grundlage des Darrverfahrens mit entsprechenden Feuchtegehalten gleichzusetzen,
- um im Ergebnis diese Beziehung mittels Korrelation und Interpolation in einer mathematischen Funktionsgleichung = Kalibrierfunktion auszudrücken.

Für die entwickelte Kalibrierfunktion war und ist nicht vorgesehen, diese in HMW „einzuarbeiten“ bzw. für weitere Messungen zu verwenden. Zudem war und ist sie auch nicht mit in HMW integrierten Funktionen/Befehlen vergleichbar, da diese nicht frei zugänglich sind (Betriebsgeheimnisse).

Vielmehr ging es neben der theoretischen Analyse darum, die Entwicklung einer Kalibrierfunktion „im kleinen Maßstab“ nachzuvollziehen und insbesondere die, zumindest für die Holzart Fichte höchst wahrscheinlich allgemein-gültige Aussage zu treffen, um welche Art von allgemeiner Kalibrierfunktion (allgemeiner mathematischer Funktionsgleichung) es sich handelt.

Insofern war es auch nicht von Bedeutung in vollen Umfang die von Herstellern von HMW vorgegebenen Zubehörteile, insbesondere Elektroden, zu verwenden, sondern es bestand die Möglichkeit diese adäquat zu ersetzen.

Grundlage für die experimentellen Untersuchungen waren die

- DIN EN 13183-2:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 2: **Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren** einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-2:2002-07:2003-12 und die
- DIN EN 13183-1:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: **Bestimmung durch Darrverfahren** einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-1:2002-07:2003-12.

Für die experimentellen Untersuchungen erfolgten 2 Versuchsanordnungen – Versuchsanordnungen C und D.

Die **Versuchsanordnung C** war auf die Entwicklung einer Kalibrierfunktion für HMW für den gemäß DIN EN 13183-2 **genormten Anwendungsbereich zwischen 7 und 30 % Feuchtegehalt** ausgerichtet.

Die **Versuchsanordnung D** war auf die die Entwicklung einer Kalibrierfunktion für HMW für einen Feuchtegehalt **von 7 % bis über 30 % hinaus** ausgerichtet. Wie im Nachfolgenden beschrieben entstand daraus ein **Anwendungsbereich zwischen 7 und 80 % Feuchtegehalt**.

Experimentelle Untersuchungen unterhalb eines Feuchtegehaltes von 7 % wurden auf Grundlage der Analyse des derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes bereits zu einem frühen Zeitpunkt ausgeschlossen, da dieser Feuchtebereich, wie bereits erläutert

- von untergeordneter feuchtetechnischer Bedeutung ist;
- ohnehin keine ausreichende Messgenauigkeit bzw. gar keine Messergebnisse zu erwarten waren.

Für beide Versuchsanordnungen erfolgten zur „internen Absicherung bzw. Bestätigung“ die experimentellen Untersuchungen anhand jeweils zweier unabhängiger Prüfreiheiten mit separaten Prüfkörpern – C 1 und C 2 bzw. D 3 und D 4.

Für die finale Entwicklung der Kalibrierfunktion für die Versuchsanordnung C (7/30) bzw. D (7/80) wurden dann die Ergebnisse der jeweiligen Prüfreiheiten zusammengefasst.

Die Versuchsanordnungen basierten auf einer Konditionierung der Prüfkörper auf verschiedene, repräsentative Feuchtegehalte, d.h. die Prüfkörper sollten jeweils in sich einen gleichmäßigen (globalen) Feuchtegehalt entsprechender Höhe (ohne Feuchtegradienten) aufweisen. Dies war es von entscheidender Bedeutung.

Die Konditionierung der Prüfkörper erfolgte bei jeweils gleicher Umgebungstemperatur (20 °C) mittels Klimaschrank, Wasserlagerung bzw. Freiluftlagerung.

Im Zustand der jeweiligen Konditionierung erfolgte dann für jeden Prüfkörper mittels nachfolgend beschriebener Messgeräte und Messverfahren

- vordergründig die Ermittlung des elektrischen Widerstandes und die Ermittlung der Masse (im feuchten Zustand)
und zudem
- die Ermittlung des Feuchtegehaltes mittels HMW.

Die Ermittlung des elektrischen Widerstandes diente der Erstellung der Kalibrierfunktion (siehe nachfolgend Punkt 4.3.1.).

Die Ermittlung des Feuchtegehaltes mittels HMW hatte überwachenden Charakter und diente der Analyse dieser Messgeräte (siehe nachfolgend Punkt 4.3.2.).

Im Zustand der ersten Konditionierung erfolgte die Ermittlung des Volumens und der Masse der Prüfkörper ohne Elektroden, so dass die entsprechende Rohdichte (vor Versuchsbeginn) und die eigentliche Masse der Elektroden ermittelt werden konnte.

Die Ermittlung der Rohdichte (vor Versuchsbeginn) hatte nur informativen Charakter. Die Abweichungen der Rohdichte der Prüfkörper ist neben der eigentlichen Inhomogenität des Holzes größtenteils auf Ungenauigkeiten in der Herstellung der Prüfkörper (sägen bzw. hobeln) und pro Holzachse nur einmalig durchgeführten Messung mittels Messschieber zurückzuführen. Grundsätzlich lagen die ermittelten Rohdichten im (in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Messung) erwarteten Bereich.

Die Ermittlung der (eigentlichen) Masse der Elektroden war erforderlich, da die Ermittlung der Masse im jeweiligen Konditionierungszustand einschl. der implantierten Elektroden erfolgen musste, diese jedoch für die nachfolgende beschriebene Berechnung gemäß DIN EN 13183-1 heraus zu rechnen waren.

Nach Durchführung der o.g. Messungen erfolgte in nachfolgend beschriebener Form die Trocknung der Prüfkörper auf einen Feuchtgehalt von 0 % und die Ermittlung der entsprechenden Masse im darrtrockenen Zustand (nach Darrverfahren).

Auf Grundlage der Masse der Prüfkörper zum Zeitpunkt der jeweiligen Konditionierung und der Masse der Prüfkörper im darrtrockenen Zustand erfolgte gemäß DIN EN 13183-1 die Berechnung der zum Zeitpunkt der Messungen tatsächlich vorhandenen (unstrittigen) Feuchtegehalte.

Mittels der software „Microsoft Office Excel 2007“ und den darin enthaltenen Standardfunktionen wurden die in dem jeweiligen Konditionierungszustand vorhandenen tatsächlichen Feuchtegehalte und die diesbezüglich ermittelten elektrischen Widerstände in Beziehung zueinander gesetzt.

Dahingehend war die Ableitung verschiedener mathematische Funktionen mit entsprechenden Trendlinien und Funktionsgleichungen möglich, wobei davon ausgegangen wurde, dass nur die Exponentialfunktion (allgemeine Funktionsgleichung: $y(x) = a \cdot e^{b \cdot x}$), Linearfunktion (allgemeine Funktionsgleichung: $y(x) = m \cdot x + b$), Logarithmusfunktion (allgemeine Funktionsgleichung: $y(x) = a \cdot \ln(x) + c$) bzw. Potenzfunktion (allgemeine Funktionsgleichung: $y(x) = a \cdot x^b$) von Bedeutung sind.

Im Rahmen der Auswertung wurden anfänglich alle 4 o.g. Funktionen in Betracht gezogen und grafisch dargestellt (Trendlinien) bzw. mathematisch ermittelt (Funktionsgleichungen).

Im Zusammenhang mit der Ermittlung der o.g. Trendlinien und Funktionsgleichungen erfolgte auch die Ermittlung des jeweiligen Bestimmtheitsmaßes R^2 , welches die Annäherung (Streuung) der Messwerte an eine Trendlinie und Funktionsgleichung beschreibt. Dafür galt: Umso dichter das Bestimmtheitsmaß R^2 zur Zahl 1 liegt, umso enger gruppieren sich die Messwerte um eine Trendlinie bzw. mathematische Funktion, d.h. umso zutreffender sind Trendlinie und mathematische Funktion. Bei einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 1$ liegen alle Messwerte auf der Trendlinie.

Auf Grundlage des Bestimmtheitsmaßes R^2 wurden letztendlich die Trendlinie und dazugehörige Funktionsgleichung mit der größten Annäherung an die Messwerte ausgewählt und als Kalibrierkurve mit Kalibrierfunktion definiert (Anlagen 21, 22, 26, 27).

Parallel zu den direkten Messungen des elektrischen Widerstandes mittels Messgerät 1 erfolgten jeweils auch Messungen mit 2 unterschiedlichen, kalibrierten HMW (nachfolgend Messgeräte 2 und 3 genannt), um die Messungen mittels Messgerät 1 zu überwachen, aber auch, um im Rückschluss die Messgenauigkeit dieser Geräte im vorgesehenen Anwendungsbereich und außerhalb des vorgesehenen Anwendungsbereiches zu analysieren.

Alle Messergebnisse wurden wie folgt protokolliert und ausgewertet (siehe Anlagen):

Messprotokolle C 1-0 / C 2-0 / D 3-0 / D 4-0:

- Rohdichte der Prüfkörper vor Versuchsbeginn;
- Masse der in den Prüfkörpern implantierten Elektroden;

Messprotokolle C 1-1 bis C 1-5 / C 2-1 bis C 2-5 / D 3-1 bis D 3-3 / D 4-1 bis D4-3:

- Elektrischer Widerstand in den Prüfkörper im jeweiligen Konditionierungszustand (Messgerät 1);
- Feuchtegehalt in den Prüfkörper im jeweiligen Konditionierungszustand lt. HMW (Messgeräte 2 und 3);
- Massen der Prüfkörper im jeweiligen Konditionierungszustand und im darrtrockenen Zustand (Messgerät 4);
- Berechnung des tatsächlichen Feuchtegehaltes (unter Abzug der Masse der Elektroden);
- Berechnung der Messabweichungen zwischen Feuchtegehalt lt. HMW und tatsächlichem Feuchtegehalt;
- Berechnung (Rückrechnung/Überprüfung) des Feuchtegehaltes auf Grundlage der erstellten Kalibrierfunktion mit Messabweichungen.

4.2. Prüfkörper

Wie bereits erläutert, gibt es für die Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz kein Normal und keine von einem sonstigen staatlich anerkannten Institut vorgegebene Werte. Es gibt nicht den *Normal*-Baum.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt 4 Rohlinge beschafft.

Die **Rohlinge 1 und 2** wurden durch die Firma Holzwerke Bullinger aus 73453 Abtsgmünd (Baden-Württemberg) im fertigen (für den Versuch verwendeten) Querschnitt mit jeweils einer Länge von ca. 1,5 m zur Verfügung gestellt.

Über die Lieferung durch die Firma Bullinger konnte sichergestellt werden, dass es sich um die Holzart Fichte und bereits technisch getrocknetes Holz handelte.

Da die Firma Bullinger jedoch Fichte aus Skandinavien und aus Mitteleuropa bezieht, konnte nicht nachvollzogen werden, aus welcher diesbezüglichen Region die Rohlinge stammen. Die dahingehende Zuordnung (Holzunterart) sollte im Rahmen der Untersuchungen durch den Einsatz der HMW und die Möglichkeit der Holzsorten-Einstellung (mitteleuropäische bzw. skandinavische/nordische Fichte) und den entsprechenden Rückschluss erfolgen.

Die Rohlinge 3 und 4 wurden am 18.04.2015 durch die Firma ANJ Forstservice aus 17194 Jabel (Mecklenburg-Vorpommern) als Stammware (mit Rinde) mit einem Durchmesser von jeweils ca. 30 cm und einer Länge von 1 m zur Verfügung gestellt. Die Rohlinge entstammen aus kurz zuvor in der Gemarkung Rogeez (Mecklenburg-Vorpommern) gefällten Fichten, d.h. mitteleuropäischen Fichten.

Über die Lieferung durch die Firma ANJ Forstservice konnte sichergestellt werden, dass es sich um die Holzunterart „mitteleuropäische Fichte“ und noch sägefrisches Holz handelte.



Bild 25: Rohlinge 1 und 2



Bild 26: Rohlinge 3 und 4 (+ 1 Ersatz)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden aus den zuvor genannten Rohlingen folgende Prüfkörper hergestellt:

für Versuchsanordnung C 1 (aus Rohling 1)

aus Fichte, Vollholz, kerngetrennt, technisch-getrocknet

- 10 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 4,1 cm * 7,6 cm * 7,8 cm;
- 2 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden in Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 8,2 cm * 7,6 cm * 4,2 cm;
- 1 Stück Prüfkörper, Einzelabmessungen a*b*c: 1 cm * 1 cm * 1 cm;

für Versuchsanordnung C 2 (aus Rohling 2)

aus Fichte, Vollholz, kerngetrennt, technisch-getrocknet

- 10 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 4,1 cm * 7,6 cm * 7,8 cm;
- 2 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden in Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 8,0 cm * 7,6 cm * 4,0 cm;
- 1 Stück Prüfkörper, Einzelabmessungen a*b*c: 1 cm * 1 cm * 1 cm;

für Versuchsanordnung D 3 (aus Rohling 3)

aus Fichte, Vollholz, kerngetrennt, freiluft-getrocknet

- 10 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 4,1 cm * 7,6 cm * 7,8 cm;
- 2 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden in Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 8,2 cm * 7,6 cm * 4,2 cm;
- 1 Stück Prüfkörper, Einzelabmessungen a*b*c: 1 cm * 1 cm * 1 cm;

für Versuchsanordnung D 4 (aus Rohling 4)

aus Fichte, Vollholz, kerngetrennt, freiluft-getrocknet

- 10 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 4,1 cm * 7,6 cm * 7,8 cm;
- 2 Stück Prüfkörper für Einbau der Elektroden in Faserrichtung, Einzelabmessungen a*b*c: 8,2 cm * 7,6 cm * 4,0 cm;
- 1 Stück Prüfkörper, Einzelabmessungen a*b*c: 1 cm * 1 cm * 1 cm.

Die Prüfkörper für Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung entsprachen den dahingehenden Vorgaben der Messgeräte-Hersteller und dienten der Entwicklung der jeweiligen Kalibrierfunktion.

Die Prüfkörper für Einbau der Elektroden in Faserrichtung, d.h. entgegen den Vorgaben der Messgeräte-Hersteller dienten der Analyse dahingehender Messabweichungen (im Vergleich zum Einbau quer zur Faserrichtung).

Die Prüfkörper mit den Einzelabmessungen $a*b*c$: 1 cm * 1 cm * 1 cm dienten zur Ermittlung der Sorptionsthermen mittels DVS-Gerät, wobei für diese Ermittlung eine weitere Zerkleinerung der jeweiligen Prüfkörper erfolgte.

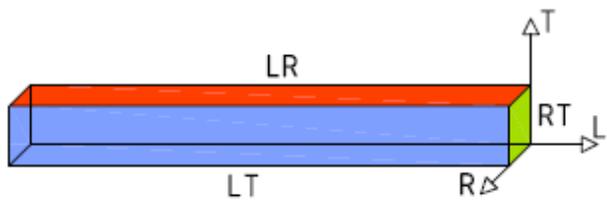
Die Ermittlung der Sorptionstermen für die Phasen Adsorption und Desorption mittels DVS-Gerät erfolgte, da die technische Möglichkeit bestand, der Vollständigkeit halber, jedoch ohne weiterführende Verwendung (Anlagen 35 - 38).

Die Prüfkörper erhielten Bohrungen mit einer Tiefe von 1,9 cm (Bild 28), so dass die Elektroden (Schrauben) eingesetzt werden konnten und jeweils das nicht isolierte Gewinde in einer darüber hinausgehenden Tiefe von 0,6 cm (Schaftlänge Schraube 2,5 cm) in das Holz kraft- und formschlüssig eingedreht werden konnte.



Bild 27: Prüfkörper nach Versuchsende

Rohlinge zur Herstellung der Prüfkörper



Schnittebene:

- - LR-Radialfläche, Riffschnitt
- - LT-Tangentialfläche, Fladerschnitt
- - RT-Querschnitt, Hirnfläche

Beschriftung/Zuordnung der Prüfkörper



Belastungsrichtungen:

- L - Longitudinal
- R - Radial
- T - Tangential

Versuchsanordnung C

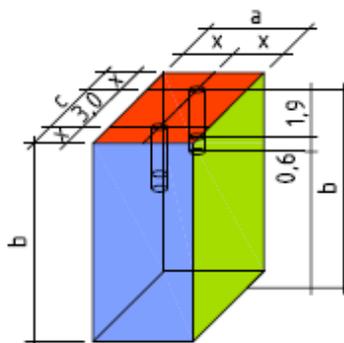
2 Kanthölzer, Fichte,
Querschnitt 7,6 cm x 7,8 cm,
Länge ca. 1,5 m,
technisch getrocknet

Versuchsanordnung D

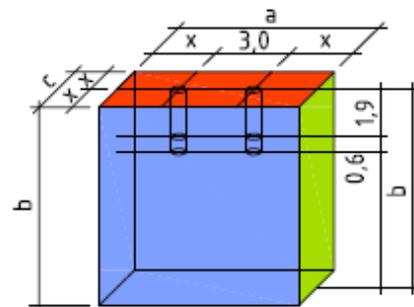
2 Kanthölzer, Fichte,
Querschnitt 7,6 cm x 7,8 cm,
Länge ca. 1 m,
sägefrisch

Geometrie der Prüfkörper

für den Einbau der Elektroden
quer zur Faserrichtung



für den Einbau der Elektroden
in Faserrichtung



- a - Maß in longitudinaler Richtung
- b - Maß in tangentialer Richtung
- c - Maß in radialer Richtung
- x - jeweils gleicher Randabstand

alle Maßangaben in cm

Bild 28: Schematische Darstellung der Prüfkörper-Anfertigung

4.3. Messgeräte

Im Sinne der Definition handelt es sich bei einem Messgerät um ein „Gerät, das allein oder in Verbindung mit zusätzlichen Einrichtungen für die Durchführung von Messungen verwendet wird“. [IW;P.3.1]

Diesbezüglich beinhaltet der im weiteren verwendete Begriff „Messgerät“ nicht nur das „Gerät“ an sich, sondern immer auch das erforderliche „Zubehör“ (Messkabel, Elektroden etc.), um die Messungen durchführen zu können.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte der Einsatz der nachfolgend beschriebenen Messgeräte bzw. Komponenten:

Einheitlicher Bestandteil der Messgeräte 1, 2 und 3 waren die in den Prüfkörpern eingesetzten Elektroden mit Kabel und Steckhülsen (Bild 29).

Die Elektroden mit Kabel und Steckhülsen wurden speziell für die Versuchsreihe angefertigt und waren auf den Langzeitversuch ausgerichtet.

Die Elektroden bestanden aus verzinkten Schrauben 4,0 * 25 mm. Der Schaft, außer die unteren ca. 6 mm wurde jeweils mit einer Schrumpfmuffe aus PVC überzogen und damit isoliert. Dadurch wurde gewährleistet, dass ein direkter Kontakt zum Holz nur im Bereich der unteren 6 mm gegeben war, was einer Messtiefe von ca. 0,3 * Holztiefe entsprach (Bild 30).

Die Schrauben wurden mittels Quetschkabelschuhe mit dem Kabel verbunden. Am anderen Ende wurden die Kabel mit Steckhülsen für 4-mm-Bananenstecker bestückt.

Im Rahmen der Konditionierung der Prüfkörper und damit zusammenhängender Desorption kam es an und in den Prüfkörpern zu merklichen Schwindprozessen und damit zu einer Lockerung der Verbindung zwischen Schraube und Kabel (Quetschkabelschuh) bzw. Holz und Schraube (freies Schraubengewinde). Die Schrauben ermöglichten dahingehend ein „Nachschrauben“ und die Wiederherstellung einer gleichbleibend elektrisch-leitfähigen Verbindung.

Für die nachfolgend beschriebenen Versuchsanordnungen C und D wurden die Elektroden in einem Abstand von 3 cm quer zur Faserrichtung (= Messrichtung) eingebaut, was auch den (einheitlichen) Vorgaben der Hersteller der Messgeräte 1, 2 und 3 entsprach.

Die Steckhülsen ermöglichten den vielfachen, schnellen und unkomplizierten Steck-Anschluss des eigentlichen Messkabels.



Bild 29: Elektroden mit Kabel und Stechhülsen

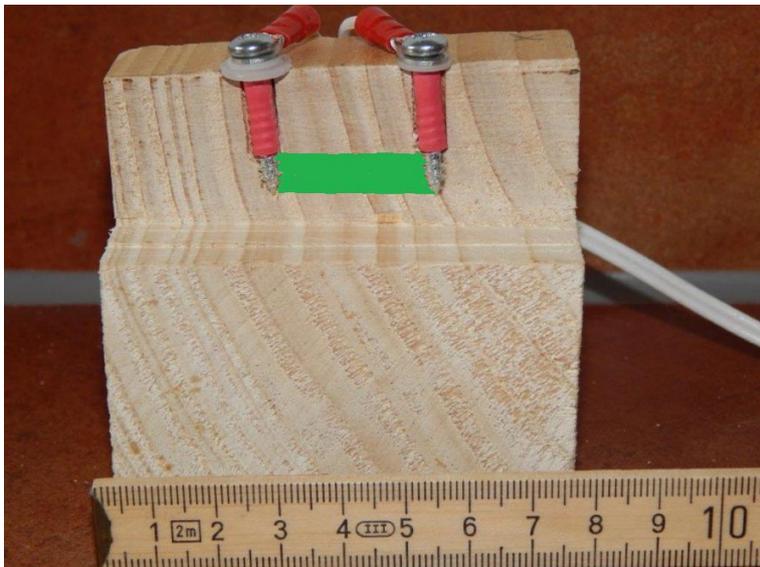


Bild 30: Elektroden im eingebauten Zustand mit Darstellung des Messbereiches (grün)

Die generelle Tauglichkeit der eigens angefertigten Elektroden wurde anhand von Messungen mit den nachfolgend beschriebenen Messgeräten 2 und 3 (HMW) und dem Vergleich der Messergebnisse mit dem tatsächlichen Feuchtegehalt nach DIN EN 13183-1 (Darrverfahren) überprüft und überwacht.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die mittels Messgeräte 1, 2 und 3 erzielten Messergebnisse ausschließlich im Zusammenhang mit dem Versuchsaufbau, insbesondere mit der Ausführung der Elektroden zu betrachten sind.

Eine Änderung des Versuchsaufbaus, insbesondere eine Änderung der Ausführung der Elektroden führt zu anderen Messergebnissen.

4.3.1. Messgerät 1 (Messverfahren I)

Die direkten Messungen des elektrischen Widerstandes (Messverfahren I) erfolgten mit einem Messgerät des Geräte-Herstellers SCANTRONIK (im weiteren Messgerät 1 genannt).

Das Messgerät 1 beinhaltet den Datenlogger „Materialfox“ (prozessgesteuerte Speicher- und Ableseeinheit) und das Erweiterungsmodul „Materialfeuchte Gigamodul“ und ermöglichte (auf Grund eines außergewöhnlich großen Messbereiches) Messungen zwischen unter 10 Kilo-Ohm (entspricht einem Feuchtegehalt von über 90 %) und über 100 Giga-Ohm (entspricht einem Feuchtegehalt von unter 6 %) und zudem gleichzeitige Messung an bis zu 8 Probekörpern in Intervallen zwischen 5 Minuten und 24 Stunden.

Das Messgerät wird mit 9 V Gleichstrom (6 Stück Mignon-AA-Batterien á 1,5 V) betrieben.

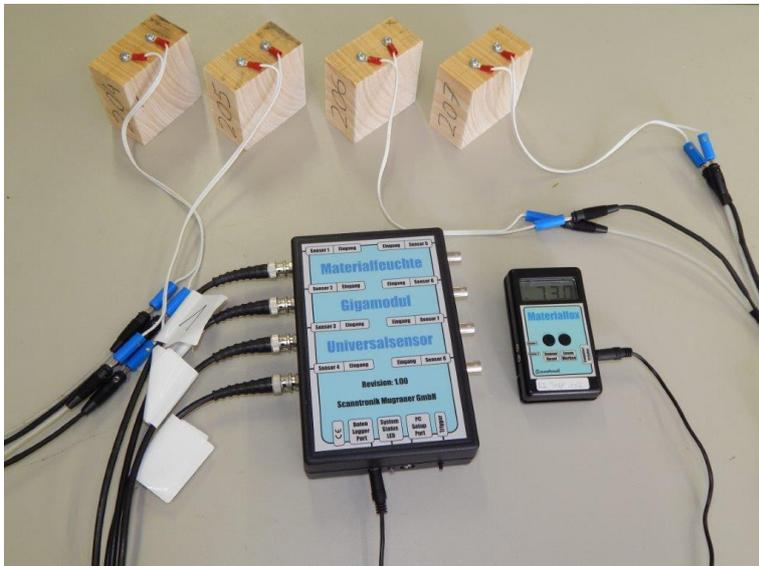


Bild 31: Messgerät 1 (links Erweiterungsmodul, rechts Datenlogger)

Die Anzeige des Messwertes (Anzeigewert) erfolgte in logarithmischer Form und war/ist wie folgt umzurechnen (Bild 32):

„**Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \text{Log}(R)$** “: In diesem Modus wird der Messwert direkt als Widerstandswert in Ohm zur Verfügung gestellt. Die Anzeige und Speicherung erfolgt hierbei entsprechend der Formel:

<u>Messwert = $10 \cdot \text{Log}(R)$</u> d.h. $R = 10^{(\text{Messwert}/10)}$

Folgende Beispiele sollen diesen Zusammenhang veranschaulichen:

Messwert / Anzeige	Widerstand [Ohm]
60,0	$10^6 = 1 \text{ M}$
80,0	$10^8 = 100 \text{ M}$
87,2	$10^{8,72} = 524,8 \text{ M}$
106,4	$10^{10,64} = 43,7 \text{ G}$

Bild 32: Zusammenhang $10 \cdot \text{Log}(R)$ und Widerstand [Ohm] [GM;S.11]

Als **Logarithmus** einer Zahl bezeichnet man den Exponenten, mit dem eine vorher festgelegte Zahl, die Basis, potenziert werden muss, um die gegebene Zahl zu erhalten. Mit Logarithmen lassen sich sehr stark wachsende Zahlenreihen übersichtlich, insbesondere im Diagramm darstellen, da der Logarithmus für große Zahlen viel langsamer steigt als die Zahlen selbst.

Dies sein anhand der Messergebnisse für den Prüfkörper 404 (Versuchsordnung D) verdeutlicht (Bild 33).

tatsächlicher Feuchtegehalt (Darrverfahren) [%]	Messwert (Anzeigewert) Ohm'scher Widerstand $10 \cdot \text{Log}(R)$ [Ohm]	Umrechnung in Ohm'scher Widerstand [Mega-Ohm]	Umrechnung in Ohm'scher Widerstand [Ohm]
71,9	52,4	0,174	174000
26,2	75,1	32,359	32359000
9,0	103,4	21877,616	21877616000

Bild 33: Umrechnung Logarithmus

Neben den Messungen zur Ableitung der Kalibrierfunktion wurde das Messgerät 1 auch dafür verwendet, um im Rahmen der Konditionierung der Prüfkörper im Klimaschrank den Zeitpunkt der Feuchtekonstanz und damit den Zeitpunkt für die nächsten Messzyklus zu ermitteln.

Dafür wurden während der jeweiligen Konditionierungsphase 5 repräsentative Prüfkörper dauerhaft mit dem Messgerät verbunden und die Änderungen des elektrischen Widerstandes aufgezeichnet. Sofern für die 5 repräsentativen Prüfkörper keine Änderung des elektrischen Widerstandes mehr zu verzeichnen war (Bilder 34, 35), wurde davon ausgegangen, dass für alle Prüfkörper der „angesteuerte“ Feuchtegehalt erreicht wurde und der nächste Messzyklus durchgeführt werden konnte.

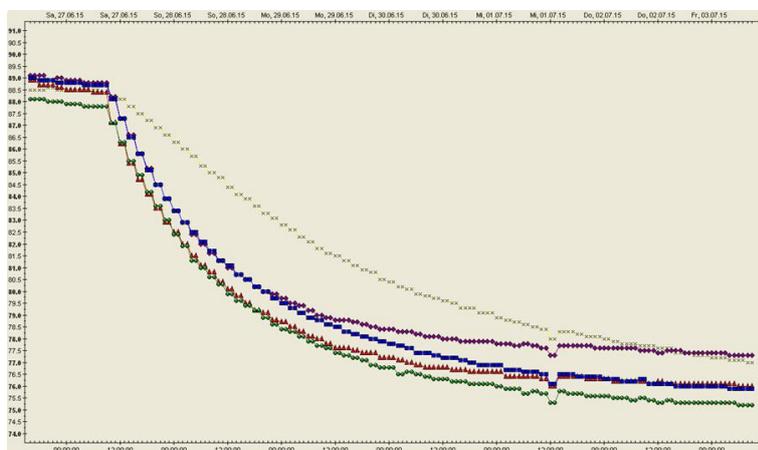


Bild 34: Aufzeichnung Langzeitmessung für die Phase der Adsorption (Erhöhung des Feuchtegehaltes = Abnahme des Widerstandes)

x-Achse: Zeit; y-Achse: elektrischer Widerstand



Bild 35: Aufzeichnung Langzeitmessung für die Phase der Desorption, einschl.

Störung der Konditionierungsphase (Ausfall des Klimaschranks)

(Abnahme des Feuchtegehaltes = Erhöhung des Widerstandes)

x-Achse: Zeit; y-Achse: elektrischer Widerstand

4.3.2. Messgeräte 2 und 3 (Messverfahren II)

Für die Messungen mittels kalibrierten HMW (Messverfahren II) wurden die Messgeräte 2 und 3 verwendet:

Bei dem Messgerät 2 handelte es sich um das „Oberklasse“-Holzfeuchtemessgerät Hydromette RTU 600 des deutschen Messgeräte-Herstellers GANN (Bild 36).

Der Begriff „Oberklasse“ entstammt dabei der Terminologie der Firma GANN und beschreibt HMW, welche über Auswahlmöglichkeiten für mindestens 75 verschiedene Holzsorten-Korrekturstufen, wenn nicht sogar individuelle Codenummern für jede Holzart (ab 250 Stück) verfügen. [GA1;S.90]

Das Gerät beinhaltet zur Geräteeinstellung eine Holzsorten-Tabelle (= holzart- bzw. holzunterartspezifische Kalibrierung) von über 900 verschiedenen Holzarten bzw. Holzunterarten, wovon für die, im Rahmen dieser Thesis verwendete Holzart Fichte 10 Holzunterart-Einstellungen – mitteleuropäische, skandinavische Fichte, Canadian Spruce, Coast Spruce, Northern Spruce, Oregon Spruce, Silver Spruce, Sitka Spruce, Western White Spruce und Yellow Spruce möglich sind, jedoch keine davon durch die MPA Stuttgart geprüft wurde.

Zudem beinhaltet das Gerät zur Einstellung der Holz-Temperatur die Möglichkeit von -10 °C bis +40 °C in Abständen von 5 K und von +40 °C bis +90 °C in Abständen von 10 K.

Das Messgerät wird mit 9 V Gleichstrom (1 Stück E-Block-Batterie á 9 V) betrieben.

Bei dem Messgerät 3 handelte es sich um das „Oberklasse“-Holzfeuchtemessgerät FMD des niederländischen Messgeräte-Herstellers BROOKHUIS (Bild 37).

Das Gerät beinhaltet zur Geräteeinstellung eine Holzsorten-Tabelle (= holzart- bzw. holzunterartspezifische Kalibrierung) von ca. 400 verschiedenen Holzarten bzw. Holzunterarten, wovon für die, im Rahmen dieser Thesis verwendete Holzart Fichte 3 Holzunterart-Einstellungen - europäische, nordische oder Sitka-Fichte möglich sind, jedoch nur die Einstellung 196 (europäische Fichte) durch die MPA Stuttgart geprüft und anerkannt wurde.

Zudem beinhaltet das Gerät zur Einstellung der Holz-Temperatur die Möglichkeit von -20 °C bis +80 °C in Abständen von 1 K.

Das Messgerät wird mit 6 V Gleichstrom (4 Stück Mignon-AA-Batterien á 1,5 V) betrieben.

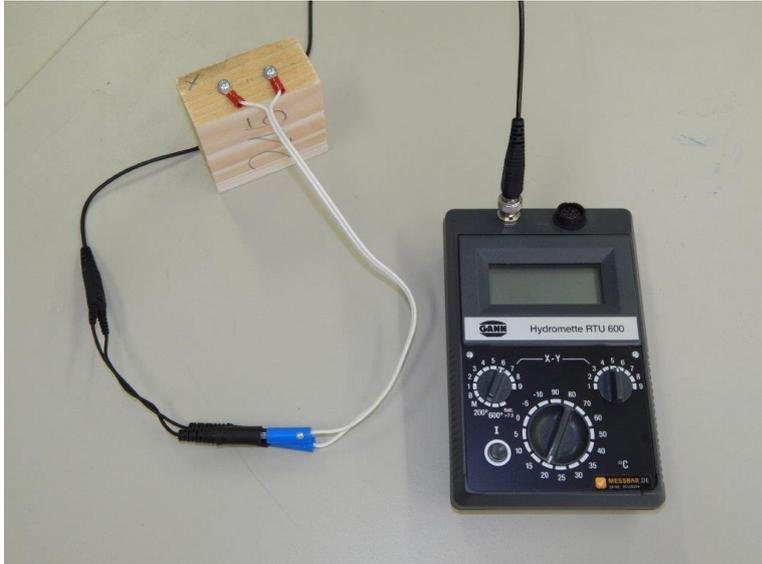


Bild 36: Messgerät 2 – Hydromette RTU 600

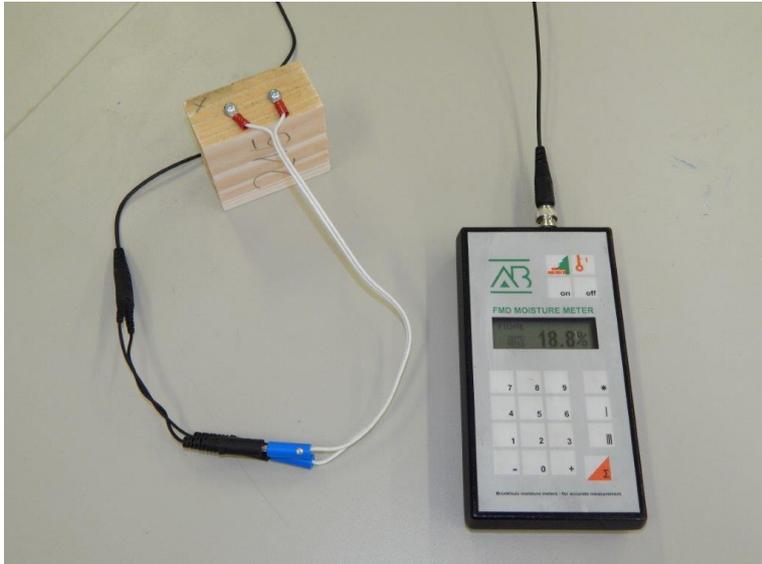


Bild 37: Messgerät 3 – FMD

4.3.3. Messgerät 4 (Messverfahren III)

Zur Berechnung des tatsächlichen Feuchtegehaltes nach DIN EN 13183-1 (Messverfahren III) erfolgte die Ermittlung der Masse der Prüfkörper im jeweils konditionierten Zustand (m_1 – Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen) bzw. im darrtrockenen Zustand (m_0 – Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand) mittels einer elektronischen Waage mit Skaleneinteilungswerten von 0,1 g.

Bei Konditionierung der Prüfkörper im Klimaschrank erfolgte die Ermittlung der Masse jeweils unmittelbar nach Entnahme aus dem Klimaschrank, um die Ausbildung eines Feuchtegradienten in den Prüfkörpern (schnelles Abtrocknen bzw. Feuchtaufnahme an den Randzonen) und damit verbundene Messabweichungen zu verhindern.

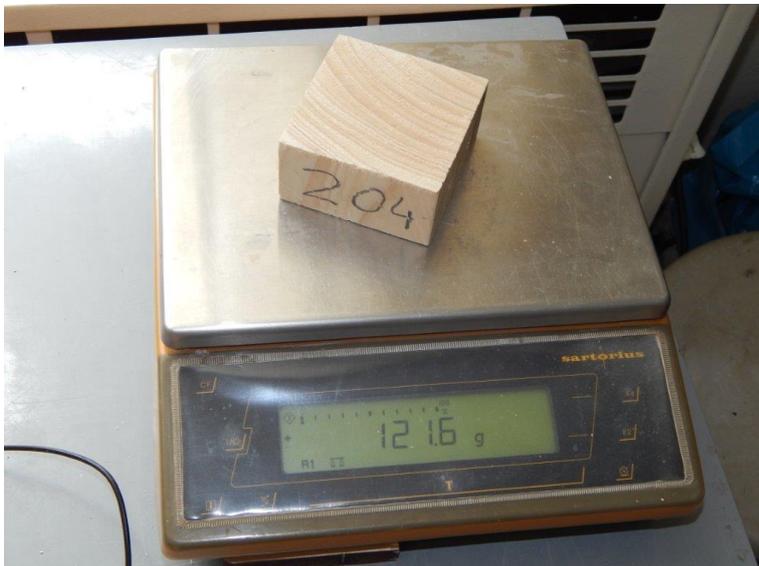


Bild 38: Messgerät 4 – elektronische Waage

4.4. Klimaschrank

Wie beschrieben war für die Versuchsanordnungen und Messungen ein jeweils gleichmäßiger Feuchtegehalt in den Prüfkörper (ohne Feuchtegradienten) erforderlich.

Mittels Klimaschrank erfolgte dahingehend die Konditionierung, d.h. Anpassung der Prüfkörper für einen Bereich zwischen ca. 10 % und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur von 20 °C.

Bei dem verwendeten Klimaschrank handelte es sich um das an der Hochschule Wismar vorhandene Fabrikat ATLAS SC600 der Firma Atlas Material Testing Technology LLC 4114 North Ravenswood Avenue Chicago, IL 60613 USA.



Bild 39: Klimaschrank

4.5. Trockenschrank

Für die abschließende Ermittlung der Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand war die Trocknung auf einen Feuchtegehalt von 0 % erforderlich.

Da ein professioneller Trockenschrank (Darrofen) nicht zur Verfügung stand, erfolgte diese mittels eines handelsüblichen Backofen bei einer Temperatur von 103 ± 2 °C.

Nachdem anfänglich für 3 Probekörper repräsentativ der Masseverlust = Feuchteverlust mittels Messgerät 4 ermittelt wurde, erfolgte in der Endphase der Trocknung stündlich die Messung der Masse der jeweiligen Prüfkörper mittels Messgerät 4.

Die Masse der Prüfkörper im darrtrockenen Zustand war erreicht, als für alle Prüfkörper (gemeinsam) für jeweils 2 aufeinander folgende Messungen keine Änderung der Masse mehr zu verzeichnen war.

Die Trocknung der Prüfkörper wurde im Anschluss an die übrigen Messungen durchgeführt, um die Eigenschaften der Prüfkörper, insbesondere durch Tüpfelverschluss nicht zu beeinflussen.

4.6. Versuchsanordnungen

4.6.1. Versuchsanordnung C (7/30)

Die **Versuchsanordnung C** war auf die Entwicklung einer Kalibrierfunktion für HMW für den gemäß DIN EN 13183-2 vorgegebenen Anwendungsbereich **zwischen 7 und 30 % Feuchtegehalt** ausgerichtet.

Für die Versuchsanordnung wurden die Prüfkörper auf 5 verschiedene, repräsentative Feuchtegehalte konditioniert.

Die Konditionierungen erfolgten bei jeweils ca. 20 °C mittels einer längeren Freiluftlagerung bzw. durch Einlagerung im Klimaschrank mit 4 verschiedenen relative-Luftfeuchte-Einstellungen (in der Reihenfolge: 70 % r.L., 90 % r.L., 95 % r.L., 40 % r.L.).

Für die Prüfkörper erfolgte jeweils dahingehend die Anpassung und Einstellung eines gleichmäßigen (globalen) Feuchtegehaltes entsprechender Höhe (ohne Feuchtegradienten). Die mittels Messgeräte 1, 2 und 3 in einer bestimmten Holztiefe gemessenen Werte konnten dadurch einem jeweils tatsächlich vorhandenen Feuchtegehalt (nach Darrverfahren) eindeutig zugeordnet werden und es konnten entsprechende Beziehungen abgeleitet werden.

Für die Versuchsanordnung erfolgt folgende Auswertung:

4.6.1.1. Vergleich der (unterschiedlichen) Trendlinien exponential / linear / logarithmisch / potenz für die Beziehung „**elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt**“

und

Bestimmung der Trendlinie und dazugehörigen Funktionsgleichung **mit der höchsten Annäherung an die Messwerte** auf Grundlage des Bestimmtheitsmaßes R^2 (höchstes Bestimmtheitsmaß)

(Die grundsätzliche Vorgehensweise dazu wurde bereits unter Punkt 4.1. erläutert.)

Für die Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) bzw. Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) wurden auf Grundlage der jeweiligen, mittels Messgerät 1 ermittelten (Mess-)Werte folgende **Trendlinien, Funktionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“** ermittelt.

Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1): Diagramm C 1-A – Anlage 21

Trendlinie, Funktionsgleichung – exponential:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9940$
Trendlinie, Funktionsgleichung – linear:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9653$
Trendlinie, Funktionsgleichung – logarithmisch:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9825$
Trendlinie, Funktionsgleichung – potenz:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9922$

Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2): Diagramm C 2-A – Anlage 22

Trendlinie, Funktionsgleichung – exponential:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9822$
Trendlinie, Funktionsgleichung – linear:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9602$
Trendlinie, Funktionsgleichung – logarithmisch:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9736$
Trendlinie, Funktionsgleichung – potenz:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9777$

Bei beiden Versuchsanordnungen wurde durch die (idealisierte) **Trendlinie mit Funktionsgleichung auf Grundlage der Exponentialfunktion** die höchste Annäherung an die (tatsächlichen, gestreuten) Messwerte erreicht.

Die weitere Auswertung für die Versuchsanordnungen C 1 und C 2 erfolgte mittels der **Trendlinie mit Funktionsgleichung auf Grundlage der Exponentialfunktion**.

4.6.1.2. Definition einer Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“ auf Grundlage der Trendlinie mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß;

Unter Verwendung der für die Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) und der Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) mittels Messgerät 1 ermittelten Werte für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“ erfolgte wie im Diagramm „Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-A“ gemäß Anlage 23 dargestellt die Ableitung einer (gemeinsamen) **Trendlinie A mit Funktionsgleichung A**.

Augenscheinlich stellte sich die (gemeinsame) **Trendlinie A mit Funktionsgleichung A** (Feuchtegehalt von Holz [%] (=y) = $135,22e^{-0,025 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) [\text{Ohm}] (=x))}$) (Anlage 23) als annehmbare Idealisierung der Messwerte dar.

Zur Überprüfung erfolgte eine „Rückrechnung“, d.h. aus den Messwerte Ohm'scher Widerstand wurde mittels o.g. Funktionsgleichung A der Feuchtegehalt Holz ermittelt und mit dem jeweiligen Feuchtegehalt nach Darrverfahren (= tatsächlicher Feuchtegehalt) verglichen.

Die rechnerische Auswertung ist den Mess-Protokollen gemäß Anlagen 1 - 6 bzw. 8 - 12, jeweils Spalten V und W zu entnehmen.

Die grafische Auswertung ist im Diagramm „Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-B“ gemäß Anlage 24 dargestellt.

Unerwarteterweise stellte sich heraus, dass die auf Grundlage der **Funktionsgleichung A** ermittelten Feuchtegehalte nicht einen idealisierten Mittelwert bildeten, sondern systematisch oberhalb des jeweiligen tatsächlichen Feuchtegehaltes lagen. Die Ursache dafür konnte nicht ermittelt werden, wird aber in einer software-integrierten „Rundung“ der Funktionsgleichung vermutet.

Folgendes Rechenbeispiel soll der Verdeutlichung dienen:

Berechnung 1:

Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \text{Log}(R)$ [Ohm]: 75

Exponent: -0,0250

Feuchtegehalt von Holz [%] = $135,22e^{-0,025 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) [\text{Ohm}])} = \underline{\underline{20,74}}$

Berechnung 2:

Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \text{Log}(R)$ [Ohm]: 75

Exponent: -0,0252 (verändert)

Feuchtegehalt von Holz [%] = $135,22e^{-0,0252 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) [\text{Ohm}])} = \underline{\underline{20,42}}$

Differenz zwischen Berechnung 1 und Berechnung 2: 0,3 % Feuchtegehalt

Zur Korrektur wurde auf Grundlage von Vergleichsrechnungen in die Funktionsgleichung A ein pauschaler Subtrahend von 0,6 % Feuchtegehalt eingefügt, so dass die neue **Funktionsgleichung B** wie folgt lautet:

$$\text{Feuchtegehalt von Holz [\%]} (=y) = 135,22e^{-0,025 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) [\text{Ohm}] (=x))} - 0,6.$$

Auf Grundlage der **Funktionsgleichung B** erfolgte eine erneute Überprüfung/Rückrechnung und es wurde festgestellt, dass diese eine (gegenüber der Funktionsgleichung A) bessere Idealisierung der Messwerte darstellt.

Die rechnerische Auswertung ist den Mess-Protokollen gemäß Anlagen 1 - 6 bzw. 8 - 12, jeweils Spalten X und Y zu entnehmen.

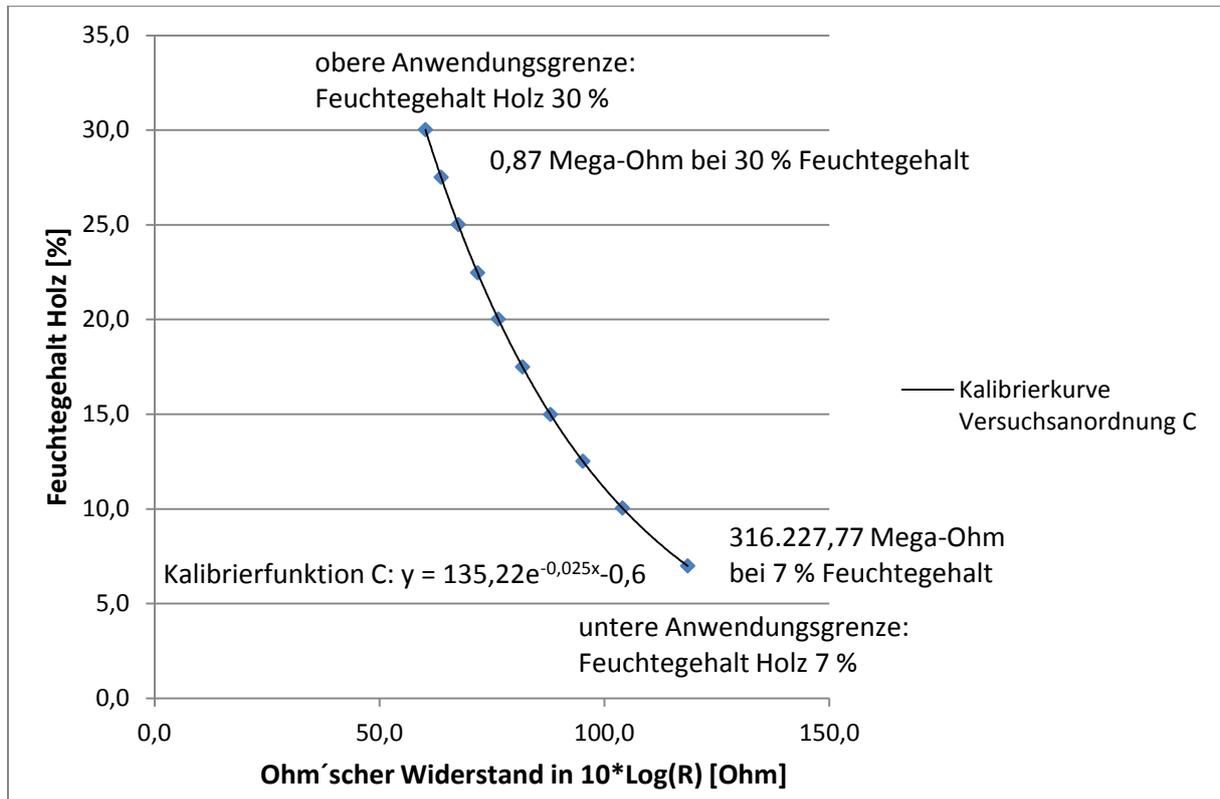
Die grafische Auswertung ist im Diagramm „Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-C“ gemäß Anlage 25 dargestellt.

Die beschriebene, leicht mögliche Korrektur einer Trendlinie mit Funktionsgleichung lässt vermuten, dass seitens der Entwickler/Hersteller von HMW die gleiche Verfahrensweise verwendet wird, um verschiedene Holzunterarten zu kalibrieren.

Die mittels demselben HMW erzielten Messergebnisse bei Einstellung unterschiedlicher Holzunterarten deuten jedenfalls darauf hin – Anlagen 1 - 6 bzw. 8 - 12, Gegenüberstellung der Spalten J/K bzw. L/M.

Auf Grundlage der **Funktionsgleichung B** wurde **speziell für die Versuchsanordnung C und für einen Anwendungsbereich zwischen 7 und 30 % Feuchtegehalt** folgende Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion abgeleitet (Bild 40).

Diagramm Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \log(R)$ [Ohm] / Feuchtegehalt Holz [%] –
 Versuchsanordnung C – Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion



Kalibrierfunktion

(Versuchsanordnung C, Anwendungsbereich 7 - 30 % Feuchtegehalt):

$$\text{Feuchtegehalt von Holz [\%]} = 135,22e^{-0,025 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \log(R) \text{ [Ohm]})} - 0,6$$

Eine Angabe der zu erwartenden Standardmessunsicherheit ist nicht möglich, da im Rahmen der Versuchsanordnung dahingehend keine ausreichende Datenmenge zur Verfügung stand.

Bild 40: Versuchsanordnung C – Diagramm Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion

4.6.2. Versuchsanordnung D

Die **Versuchsanordnung D** war auf die die Entwicklung einer Kalibrierfunktion für HMW für einen Feuchtegehalt **von 7 % bis über 30 % hinaus** ausgerichtet.

Wie bereits unter Punkt 4.2 beschrieben, entstammten die Rohlinge 3 und 4 kurz zuvor gefällten Bäumen. Nachdem die entsprechenden Stämme am 18.04.15 in der Länge zugeschnitten und in dieser Form bis zum 12.06.15 freiluft-gelagert wurden, erfolgte am 12.06.15 die Viertelung der Stämme und der Zuschnitt der Prüfkörper. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Zeitpunkt der ersten Messung am 26.06.15 erfolgte eine Unter-Wasserlagerung der Prüfkörper, so dass ein weiteres Trocknen verhindert wurde. Zudem konnte durch die 14-tägige Unter-Wasserlagerung eine Feuchteaufnahme infolge eines extremen Wasserschadens simuliert werden.

Auf Grundlage des o.g. Ablaufs stellte sich in den Prüfkörpern ein durchschnittlicher (globaler) Feuchtegehalt von ca. 76 % (Rohling 3) bzw. 70,5 % (Rohling 4) ein.

Unter Berücksichtigung der in Bild 41 dargestellten (möglichen) „Feuchtekette“ und auch dem dargestellten Feuchteunterschied zwischen Kernholz und Splintholz mit dem daraus resultierenden durchschnittlichen (globalen) Feuchtegehalt kann in der Praxis für Bauholz ein Feuchtegehalt oberhalb ca. 80 % mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, so dass Untersuchungen dahingehend unzweckmäßig erscheinen.

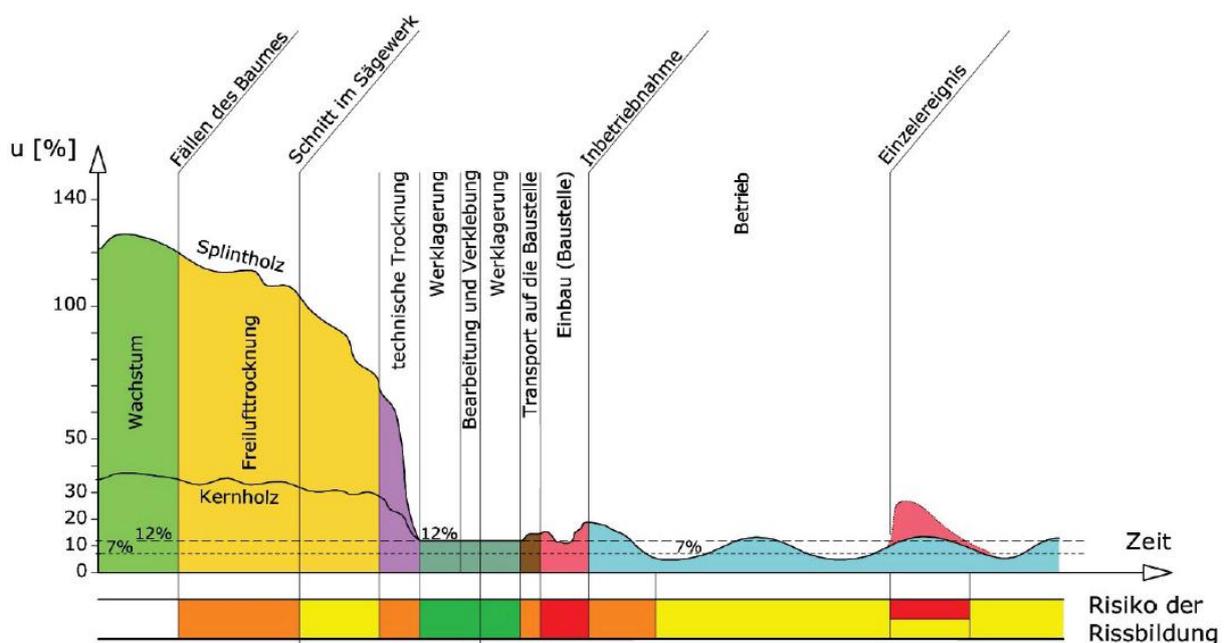


Bild 41: Skizze einer (möglichen) „Feuchtekette“ für Bauholz [ME;S.18]

Für die Versuchsanordnung wurden die Prüfkörper auf 3 verschiedene, repräsentative Feuchtegehalte konditioniert.

Die Konditionierungen erfolgten bei jeweils ca. 20 °C mittels zuvor beschriebenen Einschlag und Wasserlagerung, (kurzzeitiger) Freiluftlagerung bzw. Einlagerung im Klimaschrank (40 % r.L.).

Hinsichtlich der Wasser- bzw. Freiluftlagerung konnte auf Grund des Feuchteunterschiedes zwischen Kernholz und Splintholz (Bild 41) sowie dem Trocknungsverhalten von Holz **nicht** sichergestellt werden, dass sich in den Prüfkörper dahingehend ein gleichmäßiger (globaler) Feuchtegehalt entsprechender Höhe (ohne Feuchtegradienten) vorhanden war bzw. eingestellt hat. Vielmehr war/ist von einer ungleichmäßigen Feuchteverteilung in den Prüfkörpern auszugehen, so dass die mittels Messgeräte 1, 2 und 3 in einer bestimmten Holztiefe gemessenen Werte nicht eindeutig einem jeweils tatsächlich vorhandenen durchschnittlichen Feuchtegehalt (nach Darrverfahren) zugeordnet werden konnten/können.

Für die Auswertungen ist daher zu beachten, dass die Messergebnisse auf Grund der o.g. ungleichmäßigen Feuchteverteilung mit größeren (zufälligen) Messabweichungen behaftet sind. Die Ergebnisse sind „mit Vorsicht zu genießen“.

Für die Versuchsanordnung erfolgt folgende Auswertung:

4.6.2.1. Vergleich der (unterschiedlichen) Trendlinien exponential / linear / logarithmisch / potenz für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“

und

Bestimmung der Trendlinie und dazugehörigen Funktionsgleichung **mit der höchsten Annäherung an die Messwerte** auf Grundlage des Bestimmtheitsmaßes R^2 (höchstes Bestimmtheitsmaß)

(Die grundsätzliche Vorgehensweise dazu wurde bereits unter Punkt 4.1 erläutert.)

Für die Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) bzw. Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) wurden (analog der Versuchsanordnung C) auf Grundlage der jeweiligen, mittels Messgerät 1 ermittelten (Mess-)Werte folgende **Trendlinien, Funktionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“** ermittelt.

Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3): Diagramm D 3-A – Anlage 26

Trendlinie, Funktionsgleichung – exponential:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9734$
Trendlinie, Funktionsgleichung – linear:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,8473$
Trendlinie, Funktionsgleichung – logarithmisch:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9147$
Trendlinie, Funktionsgleichung – potenz:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = \mathbf{0,9904}$

Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4): Diagramm D 4-A – Anlage 27

Trendlinie, Funktionsgleichung – exponential:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9890$
Trendlinie, Funktionsgleichung – linear:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,8808$
Trendlinie, Funktionsgleichung – logarithmisch:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9291$
Trendlinie, Funktionsgleichung – potenz:	Bestimmtheitsmaß $R^2 = \mathbf{0,9952}$

Bei beiden Versuchsanordnungen wurde durch die (idealisierte) **Trendlinie mit Funktionsgleichung auf Grundlage der Potenzfunktion** die höchste Annäherung an die (tatsächlichen, gestreuten) Messwerte erreicht.

Die weitere Auswertung für die Versuchsanordnungen D 3 und D 4 erfolgte mittels der **Trendlinie mit Funktionsgleichung auf Grundlage der Potenzfunktion**.

4.6.2.2. Definition einer Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“ auf Grundlage der Trendlinie mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß;

Unter Verwendung der für die Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) und der Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) mittels Messgerät 1 ermittelten Werte für die Beziehung „elektrischer Widerstand / tatsächlicher Feuchtegehalt“ erfolgte wie im Diagramm „Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-A“ gemäß Anlage 28 dargestellt die Ableitung einer (gemeinsamen) Trendlinie und Funktionsgleichung.

Augenscheinlich stellte sich die (gemeinsame) **Trendlinie A mit Funktionsgleichung A**

(Feuchtegehalt von Holz [%] (=y) =

$$6 \cdot 10^6 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) [\text{Ohm}] (=x))^{-2,871}$$

(Anlage 28) als annehmbare Idealisierung der Messwerte dar.

Zur Überprüfung erfolgte auch hier eine „Rückrechnung“, d.h. aus den Messwerte Ohm'scher Widerstand wurde mittels o.g. Funktionsgleichung der Feuchtegehalt Holz ermittelt und mit dem jeweiligen Feuchtegehalt nach Darrverfahren (= tatsächlicher Feuchtegehalt) verglichen.

Die rechnerische Auswertung ist den Mess-Protokollen gemäß Anlagen 14 - 16 bzw. 18 - 20, jeweils Spalten V und W zu entnehmen.

Die grafische Auswertung ist im Diagramm „Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-B“ gemäß Anlage 29 dargestellt.

Auch in diesem Fall stellte sich heraus, dass die auf Grundlage der **Funktionsgleichung A** ermittelten Feuchtegehalte nicht einen idealisierten Mittelwert bildeten, sondern systematisch oberhalb des jeweiligen tatsächlichen Feuchtegehaltes lagen. Die Ursache dafür konnte ebenfalls nicht ermittelt werden (ggf. software-integrierten „Rundung“ der Funktionsgleichung analog Versuchsanordnung C).

Zur Korrektur wurde auf Grundlage von Vergleichsrechnungen in die Funktionsgleichung A ein pauschaler Subtrahend von 1,7 % Feuchtegehalt eingefügt, so dass die neue **Funktionsgleichung B** wie folgt lautet:

Feuchtegehalt von Holz [%] (=y) =

$$6 \cdot 10^6 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log}(R) \text{ [Ohm]} (=x))^{-2,871} - 1,7.$$

Auf Grundlage der **Funktionsgleichung B** erfolgte eine erneute Überprüfung/Rückrechnung und es wurde festgestellt, dass diese eine (gegenüber der Funktionsgleichung A) bessere Idealisierung der Messwerte darstellt.

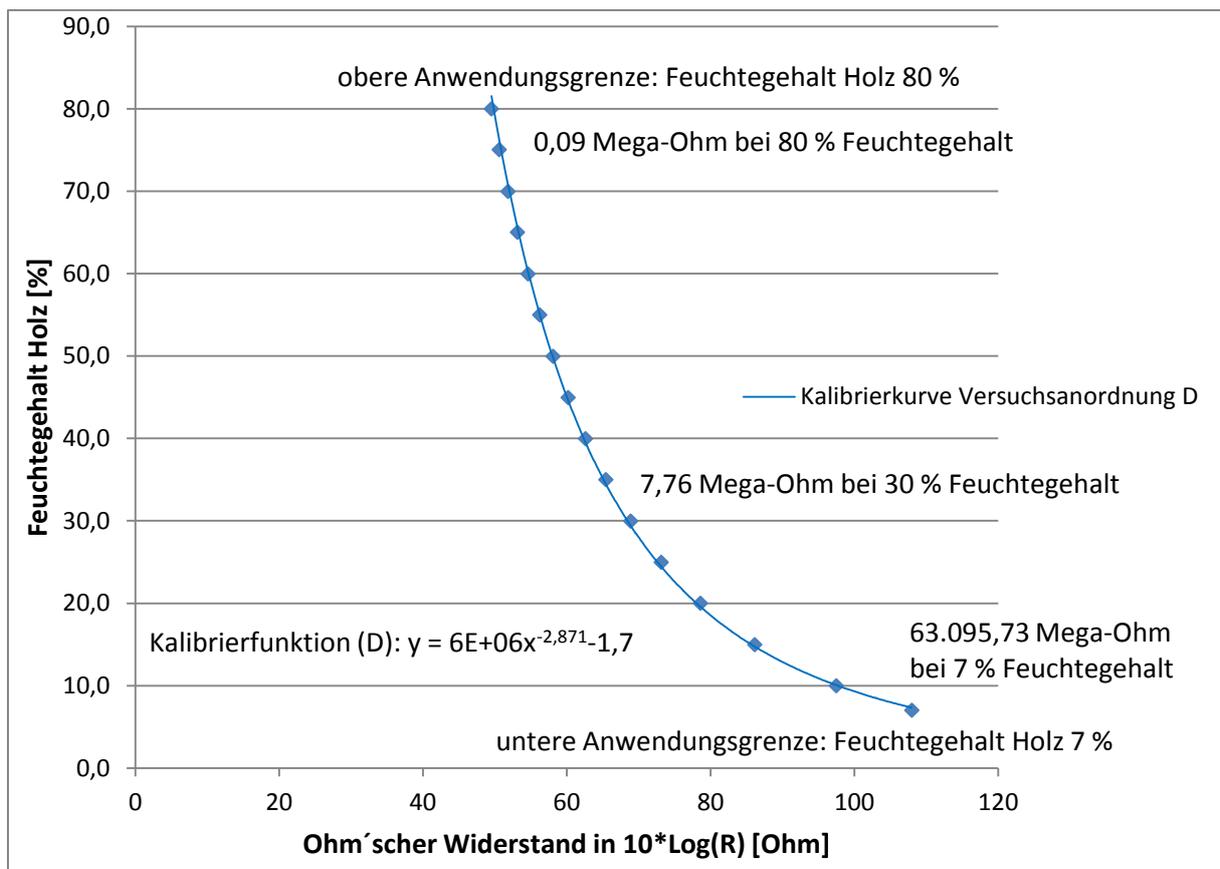
Die rechnerische Auswertung ist den Mess-Protokollen gemäß Anlagen 14 - 16 bzw. 18 - 20, jeweils Spalten X und Y zu entnehmen.

Die grafische Auswertung ist im Diagramm „Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-C“ gemäß Anlage 30 dargestellt.

Auf Grundlage der **Funktionsgleichung B** wurde **speziell für die Versuchsanordnung D und für einen Anwendungsbereich zwischen 7 und 80 % Feuchtegehalt** folgende Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion abgeleitet (Bild 42).

Für die Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion ist jedoch zu beachten, dass die Messergebnisse auf Grund einer ungleichmäßigen Feuchteverteilung (Feuchtegradient) im Referenzholz mit größeren (zufälligen) Messabweichungen behaftet sind. Die Ergebnisse sind „mit Vorsicht zu genießen“.

Diagramm Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \log(R)$ [Ohm] / Feuchtegehalt Holz [%] – Versuchsanordnung D – Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion



Kalibrierfunktion

(Versuchsanordnung D, Anwendungsbereich 7 - 80 % Feuchtegehalt):

Feuchtegehalt von Holz [%] =

$$6 \cdot 10^6 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \log(R) \text{ [Ohm]})^{-2,871} - 1,7$$

(6E+06 (Angabe lt. software im Diagramm) = $6 \cdot 10^6 = 6.000.000$)

Eine Angabe der zu erwartenden Standardmessunsicherheit ist nicht möglich, da im Rahmen der Versuchsanordnung dahingehend keine ausreichende Datenmenge zur Verfügung stand.

Bild 42: Versuchsanordnung D – Diagramm Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion

5. Auswertung und Schlussfolgerungen

An dieser Stelle sei der Bogen zwischen den experimentellen Untersuchungen und den, in den theoretischen Grundlagen beschriebenen

- systematischen Messabweichungen (Punkt 3.4.5.1., Abkürzung: SM);
- zufälligen Messabweichungen (Punkt 3.4.5.2., Abkürzung: ZM);
- groben Messabweichungen (Punkt 3.4.5.3., Abkürzung: GM) und
- einflussfreien Kenngrößen (Punkt 3.4.5.4., Abkürzung: EK)

gespannt.

5.1. Systematische Messabweichung SM-1 basierend auf der Inhomogenität (Eigenschaftsstreuung) des Holzes – Holzarten bzw. Holzunterarten zueinander

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich die, für die Versuchsanordnungen C (7/30) und D (7/80) entwickelten Kalibrierkurven in ihrem Verlauf systematisch voneinander unterscheiden (Bild 43).

Ob die unterschiedlichen Kalibrierkurven auf verschiedene Holzunterarten (siehe Punkt 5.2.) zurückzuführen sind, konnte nicht ermittelt werden, jedoch bestätigt sich unabhängig davon, dass die Inhomogenität des Holzes systematische Messabweichungen bewirken kann.

Diagramm Ohm'scher Widerstand in $10 \cdot \log(R)$ [Ohm] / Feuchtegehalt Holz [%] – Versuchsanordnungen C und D – Kalibrierkurven und Kalibrierfunktionen

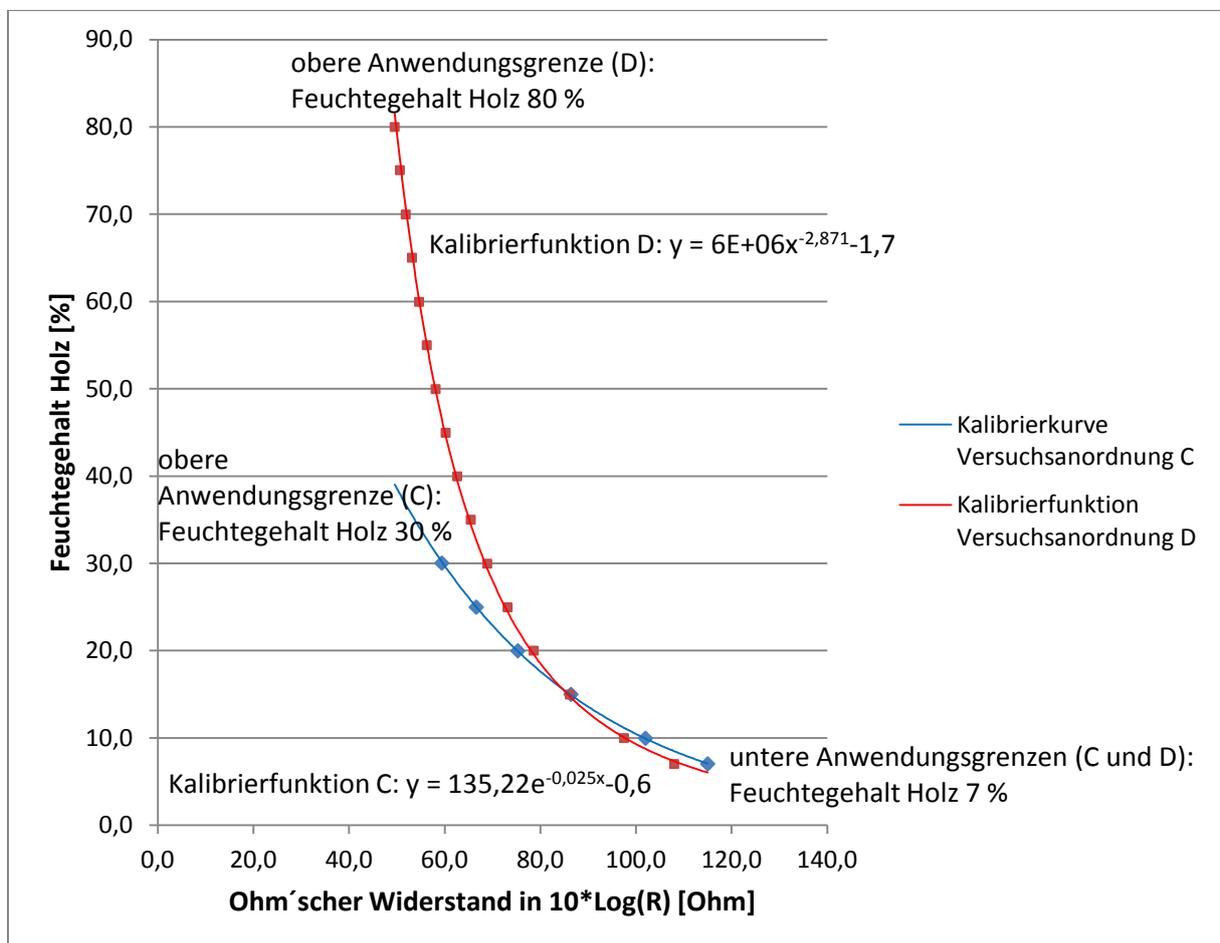


Bild 43: Diagramm Gegenüberstellung Kalibrierkurven und Kalibrierfunktionen für Versuchsanordnungen C und D

5.2. Systematische Messabweichungen SM-2, SM-3 basierend auf

- den, in den jeweiligen Holzfeuchtemessgeräten für die einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten hinterlegten, herstellereigenen Kalibrierfunktionen (Widerstandskennlinien) (SM-2) bzw.
- der falsche Einstellung der Holzart und damit der Kalibrierfunktion durch den Messgeräte-Bediener (SM-3)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgten mit genannten HMW (Messverfahren II) Begleitmessungen mit folgenden gleich zu bewertenden, für den europäischen Holzmarkt wichtigen Holzunterart-Einstellungen:

- mitteleuropäische Fichte nach GANN = europäische Fichte nach BROOKHUIS bzw.
- skandinavische Fichte nach GANN = nordische Fichte nach BROOKHUIS).

Alle Messungen basierten auf der gleichen Versuchsanordnung, insbesondere den gleichen Elektroden.

Die rechnerische Auswertung ist den Mess-Protokollen gemäß Anlagen 1 - 6 bzw. 8 - 12, jeweils Spalten J - M bzw. R - U zu entnehmen.

Die grafische Auswertung ist in den Diagrammen

- „Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Diagramm C 1-B“ gemäß Anlage 31 und
- „Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Diagramm C 2-B“ gemäß Anlage 32

dargestellt.

In Auswertung der Messergebnisse wurde festgestellt, dass sich folgende Trendlinien, d.h. der jeweiligen Durchschnitt der Messergebnisse voneinander unterscheiden:

- mitteleuropäische Fichte nach GANN / skandinavische Fichte nach GANN;
- europäische Fichte nach BROOKHUIS / nordische Fichte nach BROOKHUIS;
- mitteleuropäische Fichte nach GANN / europäische Fichte nach BROOKHUIS;
- skandinavische Fichte nach GANN / nordische Fichte nach BROOKHUIS.

Zusammenfassend unterschieden sich alle Trendlinien und davon abgeleitet alle Kalibrierfunktionen, auch bei eigentlich gleicher Holzunterart.

Dabei wurde im direkten Vergleich der beiden Geräte im genormten Anwendungsbereich zwischen 7 % und 30 % Feuchtegehalt bei eigentlich gleich zu bewertender Holzunterart-Einstellung im oberen Feuchtegehaltsbereich eine mittlere Abweichung von bis zu 2,3 % Feuchtegehalt ermittelt – siehe Anlagen 2 - 6 bzw. 7 - 12, jeweils Spalten R, S, T, U.

Die Unterschiede sind grundsätzlich auf die Verwendung unterschiedlicher Referenzhölzer durch die Entwickler/Hersteller im Rahmen der spezifischen Kalibrierung zurückzuführen.

Wie unter Punkt 4.2. beschrieben, war für die Rohlinge 1 und 2 die Herkunft (mitteleuropäische bzw. skandinavische/nordische Fichte) nicht bekannt. Die dahingehende Zuordnung (Holzunterart) sollte im Rahmen der Untersuchungen durch den Einsatz der HMW und die Möglichkeit der Holzsorten-Einstellung (mitteleuropäische bzw. skandinavische/nordische Fichte) und dem entsprechenden Rückschluss erfolgen.

Es war zu erwarten, dass die Herkunft der Rohlinge der Holzunterarten-Einstellung der Messgeräte und den dahingehenden Messwerten mit der größten Annäherung an den tatsächlichen Feuchtegehalt entspricht.

Auf Grund des nachfolgend durchgeführten Ranking's konnte diese Zuordnung jedoch nicht erfolgen, da sich die jeweiligen holzunterartbezogenen Trendlinien der beiden HMW in ihrer Annäherung an den tatsächlichen Feuchtegehalt widersprachen.

Folgende, widersprüchliche Annäherungen an den tatsächlichen Feuchtegehalt wurden ermittelt:

- höchste Annäherung durch das Messgerät 3 –
Schalterstellung 555 – **nordische** Fichte (hellblaue Trendlinie lt. Diagramme);
- zweit-höchste Annäherung durch das Messgerät 2 –
Schalterstellung 6-5 – **mitteleuropäische** Fichte (rote Trendlinie lt. Diagramme);
- dritt-höchste Annäherung durch das Messgerät 3 –
Schalterstellung 196 – **europäische** Fichte (gelbe Trendlinie lt. Diagramme);
- geringste Annäherung durch das Messgerät 2 –
Schalterstellung 7-3 – **skandinavische** Fichte (grüne Trendlinie lt. Diagramme).

Worauf die in den o.g. Geräten integrierten spezifischen Holzsorten-Einstellungen (Kalibrierfunktionen) basieren ist für den Geräte-Anwender nicht nachvollziehbar (Betriebsgeheimnisse).

Angesichts unterschiedlicher und widersprüchlicher Kalibrierfunktionen zwischen Messgeräten stellt sich die grundsätzliche Frage der Bedeutung und Genauigkeit von Holzunterarten-Einstellungen.

Zudem stellt sich die Frage, inwieweit es durch den Anwender in der Praxis überhaupt möglich ist, eine Holzunterart zu erkennen, um die entsprechende Einstellung am Gerät vornehmen zu können.

5.3. Systematische Messabweichung SM-4 basierend auf (eigene) Messabweichungen in dem für die Kalibrierung und Rückführbarkeit verwendeten direkten Messverfahren

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte die Ermittlung des tatsächlichen Feuchtegehaltes der Prüfkörper mittels Darrverfahren. Dazu wurden die Prüfkörper bei 103 +/-2 °C darrgetrocknet. Im Rahmen der Darrtrocknung war an einzelnen Prüfkörpern ein (holzartbedingter) Harzaustritt zu erkennen, d.h. Harz hat sich verflüssigt und ist ausgelaufen. Baumharz besitzt eine Rohdichte von ca. 1,2 g/cm³. Die Ermittlung der Masse des ausgetretenen Baumharzes und eine dahingehende Ergebniskorrektur war nicht Bestandteil der Untersuchungen.

(Zusätzlicher) Harzaustritt bewirkt, sofern keine Ergebniskorrektur vorgenommen wird, grundsätzlich eine „Übertrocknung“, d.h. die ermittelten Feuchtegehalte liegen systematisch oberhalb des wahren Wertes.

Folgende Berechnung soll dafür beispielgebend sein:

$$\text{Feuchtehalt } \omega = (m_1 - m_0) / m_0 * 100 \text{ [\%]}$$

m_1 die Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen [g]

m_0 die Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand [g]

„richtige“ Trocknung (ausschließlich vollständige Extraktion des Wassers):

$m_1 = 120 \text{ g}$ (incl. 20 g Wasser)

$m_0 = 100 \text{ g}$ (Extraktion von 20 g Wasser)

$$\omega = (120 \text{ g} - 100 \text{ g}) / 100 \text{ g} * 100 = \mathbf{20 \% \text{ Feuchtegehalt} = \text{wahrer Feuchtegehalt}}$$

„Übertrocknung“ (zusätzlicher Entzug weiterer Inhaltsstoffe, z.B. Harz):

$m_1 = 120 \text{ g}$ (incl. 20 g Wasser)

$m_0 = 99 \text{ g}$ (Extraktion von 20 g Wasser + 1 g Harz)

$$\omega = (120 \text{ g} - 99 \text{ g}) / 99 \text{ g} * 100 = \mathbf{21 \% \text{ Feuchtegehalt} = \text{Messergebnis zu hoch}}$$

Im Rahmen der Darrtrocknung wurde für die Prüfkörper eine klar erkennbare Massekonstanz erreicht, so dass eine „**Untertrocknung**“, d.h. die nicht vollständige Extraktion des Wassers mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann.

5.4. Systematische Messabweichung SM-5 basierend auf der Art der Holz Trocknung (freiluft-getrocknet bzw. technisch-getrocknet)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte die Verwendung von freiluft-getrockneten und technisch-getrockneten Prüfkörpern. Da diese Prüfkörper jedoch nicht demselben Rohling entstammten, war keine dahingehende Vergleichsgrundlage vorhanden und es wurde demzufolge auf eine dahingehende Untersuchung verzichtet.

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die Art der Trocknung des zu messenden Holzes.

5.5. Systematische Messabweichung SM-6 basierend auf unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit des eingelagerten Wasser

Die Analyse der Leitfähigkeit des im zu untersuchenden Holz eingelagerten Wassers war nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Es sei jedoch nochmal darauf verwiesen, dass Trink- bzw. Grundwasser (ca. 300-800 μ S/cm) gegenüber Regenwasser (ca. 50 μ S/cm) eine ca. 6- bis 16-fach bessere spezifische Leitfähigkeit besitzt und das es dahingehend schon von Bedeutung ist „aus welcher Richtung das Wasser kommt“.

Die Konditionierung der Prüfkörper im Rahmen der Unterwasserlagerung bzw. der Lagerung im Klimaschrank erfolgte mittels Trinkwasser.

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die spezifische Leitfähigkeit des im zu messenden Holz eingelagerten Wassers.

5.6. Systematische Messabweichung SM 7 basierend auf der Ausführung (Oberfläche und Entfernung) der Elektroden

In Auswertung der Messergebnisse wurde für alle Versuchsanordnungen festgestellt, dass die Trendlinien, d.h. der Durchschnitt der Messergebnisse der Messgeräte 2 und 3, außer im unteren Feuchtegehalts-Bereich systematisch und mit Erhöhung des Feuchtegehaltes in zunehmenden Maße unterhalb des jeweils tatsächlichen Feuchtegehaltes (nach Darrverfahren) lagen, d.h. durch die HMW erfolgte eine systematische Unterschätzung des Feuchtegehaltes.

Die Ergebnisse sind in nachfolgenden Diagrammen dargestellt:

- Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1): Diagramm C 1-B – Anlage 31;
- Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2): Diagramm C 2-B – Anlage 32;
- Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3): Diagramm D 3-B – Anlage 33;
- Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4): Diagramm C 4-B – Anlage 34.

Ob diese systematische Unterschätzung auf die grundsätzliche Ausführung der Elektroden – isoliert bzw. unisoliert und den unter Punkt 3.4.5. – SM-7 beschriebenen Auswirkungen (*Im direkten Vergleich (unter denselben Bedingungen) wird beim Einsatz isolierter Elektroden gegenüber unisolierten Elektroden ein geringerer Feuchtegehalt (geringere Leitfähigkeit) vermittelt.*) zurückzuführen ist, wurde im Rahmen des Experiments nicht untersucht, ist jedoch zu vermuten.

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die Art der Ausführung der Elektroden – isoliert bzw. unisoliert.

Eine weitere Ursache der systematischen und zunehmenden Unterschätzung oberhalb des Fasersättigungspunktes (25 % - 35 % Feuchtegehalt) kann darin vermutet werden, dass auf Grund der Tatsache, dass die Messwerte wie unter Punkt 3.4.4. (2) beschrieben, in Form einer „starke“ Exponentialfunktion sehr eng beieinanderliegen, die HMW „falsch anschlagen“ und dadurch einen zu geringen Feuchtegehalt vermitteln.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte ansatzweise eine Analyse der Auswirkungen der Einbauart der Elektroden – quer zur Faserrichtung bzw. in Faserrichtung. Dafür erfolgte die Ermittlung der Messabweichungen für die Prüfkörper mit Elektrodenanordnung quer zur Faserrichtung und für Prüfkörper mit Elektrodenanordnung in Faserrichtung – siehe Anlagen 2 - 6, 7 - 12, 14 - 16 bzw. 18 - 20, jeweils Spalten R, S, T, U. Während bei einem Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung die Messlinie durch Zellwände und eingeschlossene Zellhohlräume verläuft, entsteht bei einem Einbau längst zur Faserrichtung innerhalb Zellhohlräume eine freie Bahn, ähnlich einem Wasserschlauch in Längsrichtung.

Dahingehend war zu vermuten, dass bei Wassereinlagerung in den Zellhohlräumen (oberhalb des Fasersättigungspunktes) und den ungehinderten Transportweg (freie Bahn) eine höhere Leitfähigkeit entsteht, welche einen höheren Feuchtegehalt vermittelt. Unterhalb des Fasersättigungspunktes, d.h. ohne Wassereinlagerung in den Zellhohlräumen waren kein Einfluss bzw. Auswirkungen zu erwarten.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnten anhand der Messungen mit den Messgeräte 2 und 3 (HMW) o.g. Vermutungen grundsätzlich wie folgt bestätigt werden.

1. Im Zustand einer hohen Wassereinlagerung in den Zellhohlräumen (Messprotokolle D 3-1 und D 4-1) bewirkte ein Einbau der Elektroden in Faserrichtung jeweils in Bezug zum tatsächlichen Feuchtegehalt und zum Einbau der Elektroden quer zur Faserrichtung höhere Messwerte, d.h. eine höhere elektrische Leitfähigkeit (Prinzip Wasserschlauch).
2. Im Zustand unterhalb bzw. annähernd des Fasersättigungspunktes (alle weiteren Messungen außer Messprotokolle D 3-1 und D 4-1), d.h. im Zustand der Wassereinlagerung ausschließlich in den Zellwänden und evtl. in geringem, wirkfreien Umfang in den Zellhohlräumen war kein Einfluss bzw. Auswirkungen der Einbauart der Elektroden festzustellen.

Für handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte ist in der Regel die Einbauart der Elektroden – quer zur Faserrichtung bzw. in Faserrichtung festgelegt und dadurch ein Einfluss im Rahmen der Kalibrierung berücksichtigt.

5.7. Systematische Messabweichung SM-8 basierend auf Messabweichungen der elektrischen bzw. elektronischen Bauteile in den Messgeräten

Die Analyse der Messabweichungen der elektrischen bzw. elektronischen Bauteile in den Messgeräten war nicht Bestandteil der Untersuchungen und kann auch, sofern diese Bauteile ihre entsprechende, genormte Standardmessunsicherheit aufweisen, grundsätzlich vernachlässigt werden.

5.8. Zufällige Messabweichung ZM-1 basierend auf der Inhomogenität (Eigenschaftsstreuung) des Holzes – innerhalb der einzelnen Holzarten bzw. Holzunterarten bzw. innerhalb eines Baum selbst

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte keine Analyse der Messungen nach dem makroskopischen Merkmal Kern- bzw. Splintholz, da sich bei der, der Untersuchung zugrunde liegenden Holzart Fichte, Kern- und Splintholz farblich nicht voneinander unterscheiden und sich diesbezüglich die Zuordnung, insbesondere in der „Praxis“ äußerst schwierig und eigentlich nicht umsetzbar darstellt.

Für Holzarten mit Farbkernholz stellt sich die diesbezügliche Unterscheidung als einfacher dar.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Kernholz und Splintholz zueinander einen unterschiedlichen Aufbau mit daraus resultierend unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Wassereinlagerung und Wasserleitfähigkeit besitzen.

Ob, wie bereits unter o.g. Punkt 5.6. beschrieben, die systematische Unterschätzung durch die HMW, insbesondere im hohen Feuchtegehaltsbereich, darauf zurückzuführen ist, dass die Messlinie der Elektroden im Kernholzbereich und damit im, gegenüber dem Splintholz, niedrigen Feuchtegehalts-Bereich lag (Bild 41) bleibt offen (siehe auch nachfolgend Punkt 5.12.).

Derzeitig handelsübliche Holzfeuchtemessgeräte berücksichtigen nicht die makroskopische Unterteilung in Kernholz bzw. Splintholz, wobei dies zu überdenken ist.

Die Analyse von Eigenschaftsstreuungen infolge des mikroskopischen bzw. submikroskopischen Holz-Aufbau war und kann auch nicht Bestandteil von Untersuchungen und Kalibrierungen sein. Das würde „zu weit gehen“ und wäre im Rahmen der praktischen Anwendung auch nicht reproduzierbar. Mit einer entsprechenden Holzunterarten-Auswahl und ggf. Unterscheidung nach Kern- bzw. Splintholz ist die Berücksichtigung der Inhomogenität des Holzes erschöpft.

5.9. Zufällige Messabweichung ZM-2 basierend auf Strukturschädigungen des Holzes durch klimatische, biologische bzw. technische Einflüsse

Strukturschädigungen an den Prüfkörpern durch klimatische, biologische bzw. technische Einflüsse, zumindest in sichtbarer Form und dahingehende Messabweichungen konnten im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ausgeschlossen werden.

5.10. Zufällige Messabweichung ZM-3 basierend auf Vorbehandlungen, wie z.B. eingetragene Holzschutzmittel

Vorbehandlungen der Prüfkörper, wie z.B. eingetragene Holzschutzmittel konnten im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ausgeschlossen werden.

5.11. Zufällige Messabweichung ZM-4 basierend auf Temperaturabweichungen/-schwankungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte jeweils eine Justierung der HMW an die zum Zeitpunkt der Messung vorhandene Holztemperatur im Rahmen der Einstellmöglichkeiten der Geräte.

Das Messgerät 2 (GANN) bot dafür die Möglichkeit von -10 °C bis +40 °C in Abständen von 5 K und von +40 °C bis +90 °C in Abständen von 10 K an.

Das Messgerät 3 (BROOKHUIS) bot dafür die Möglichkeit von -20 °C bis +80 °C in Abständen von 1 K an.

Auf Grundlage des Diagramms „Einfluss von Feuchtegehalt und Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Holz (nach KEYLRWERTH & NOACK, 1956)“ (Bild 20) ist davon auszugehen, dass in einem praxisrelevanten Holz-Feuchtegehalts-Bereich zwischen 7 % und 30 % ein Temperatur-Unterschied von 10 K das Messergebnis um bis zu ca. 3 % Feuchtegehalt beeinflusst, d.h. bei einer Temperaturabweichung von max. 2,5 K bis zur nächst möglichen Geräteeinstellung (Messgerät 2 – Abstand 5 K) kann sich eine Abweichung im Messergebnis bis zu (rechnerisch) 0,75 % Feuchtegehalt ergeben.

Die Einstellmöglichkeit des Messgerätes 2 sollte dahingehend überdacht werden.

5.12. Zufällige Messabweichung ZM-5 basierend auf unterschiedliche Feuchteverteilung im Holz (Feuchtegradient)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen waren, wie bereits unter Punkt 4.6.2. beschrieben in den, mittels Wasser- bzw. Freiluftlagerung erzeugten Konditionierungszuständen Feuchteunterschiede in den Prüfkörpern, hervorgerufen durch sowohl Kernholz und Splintholz, als auch das Trocknungsverhalten an sich, nicht auszuschließen und teilweise sogar sichtbar (Bild 44).

Diesbezüglich ist von Messabweichungen auszugehen, d.h. die mittels Messgeräte 1, 2 und 3 in einer bestimmten Holztiefe gemessenen Werte konnten/können nicht eindeutig einem jeweils tatsächlich vorhandenen durchschnittlichen Feuchtegehalt (nach Darrverfahren) zugeordnet werden.

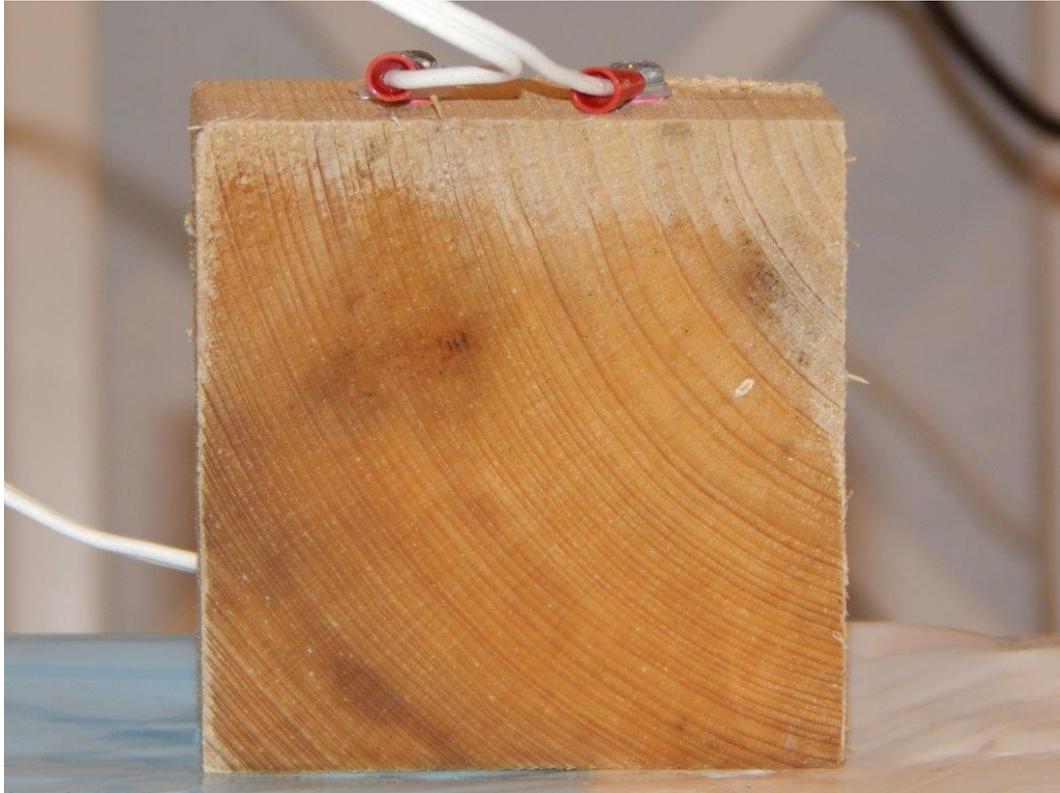


Bild 44: Prüfkörper mit unterschiedlicher Feuchteverteilung (Feuchtegradient) in der Phase der Trocknung

5.13. Zufällige Messabweichung ZM-6 basierend auf zeitlicher Instabilität der Messung und damit des Messergebnisses

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen war mit zunehmender Dauer der jeweiligen Einzelmessung ein Abfall des gemessenen Feuchtegehaltes zu verzeichnen.

Insbesondere bei hohen Feuchtegehalten war dieser Effekt deutlich sichtbar.

Die Messgeräte 1 und 3 verfügten dahingehend über eine interne „Messwert-Festschreibung“, d.h. der Messwert wurde „konserviert“ und konnte eindeutig und „in Ruhe“ abgelesen werden.

Das Messgerät 2 (HMW GANN) verfügte über keine „Messwert-Festschreibung“, so dass der Messwert gemäß DIN EN 13183-2 nach 2 bis 3 Sekunden, nachdem der Messkreis eingeschaltet wurde, abzulesen war.

Für Messgeräte ohne „Messwert-Festschreibung“ ist es von Bedeutung, dass der, der Kalibrierung zugrunde liegende Messzeitpunkt mit dem Ablese-Zeitpunkt im Rahmen der praktischen Messung übereinstimmt.

5.14. Zufällige Messabweichung ZM-7 basierend auf nicht erkennbare Abweichungen in der Messanordnung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen waren Messwert-Schwankungen erkennbar. Teilweise wurden diese als grobe Messabweichung analysiert und von der Wertung ausgeschlossen.

Für andere Messwertschwankungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese auf nicht erkennbare Abweichungen in der Messanordnung, z.B. schlechten Kontakt zwischen Holz und Elektroden oder eigene statische Aufladung des Messgeräte-Bedieners basieren.

5.15. Grobe Messabweichungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden einzelne Messergebnisse als grobe Messabweichung analysiert und von der Auswertung ausgeschlossen (siehe Messprotokolle C 2-5, D 3-2, D 3-3).

Als Ursachen wurden im Nachgang eine kurzzeitige Störung der Messanordnung (1) oder ein kurzzeitiger gravierend schlechter Kontakt zwischen Holz und Elektroden (Holz und freies Schraubengewinde) oder innerhalb des Leitungssystems (Schraube und Kabel Quetschkabelschuh) (2) vermutet.

(1) Mit dem im Rahmen der Thesis verwendeten Messgerätes 1 (direkten Messung des elektrischen Widerstandes) können winzige elektrische Ströme, die durch das Material fließen, gemessen werden. Dies sind zum Teil nur wenige pA (Pico-Ampere), d.h. lediglich 0,000000000001 Ampere.

Daher wird durch den Hersteller des Gerätes (SCANNTRONIK) in der Bedienungsanleitung darauf hingewiesen, dass das Messgerät während der Messung durch Bewegung in der Nähe (bis zu 2 m) bzw. andere Störquellen wie Stromleitungen, Maschinen, Elektronik o.ä. beeinflusst werden kann. [GM;S.14]

(2) Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen war es für die Phase der Desorption oftmals erforderlich, die Elektroden im Holz „nachzuschrauben“, um einen gleichmäßigen Übergangswiderstand zwischen Holz und Elektroden (freies Schraubengewinde) bzw. Schraube und Kabel Quetschkabelschuh) zu gewährleisten.

Alle als grobe Messabweichungen eingestuft Messungen erfolgten in der Phase der Desorption der Prüfkörper, so dass die Vermutung naheliegt, dass in diesen Fällen das „Nachschrauben“ nicht im erforderlichen Umfang erfolgte bzw. „schlichtweg vergessen“ wurde.

6. Thesen

Im Ergebnis dieser Master-Thesis werden folgende **Thesen** formuliert:

These 1:

Für die Messung des Feuchtegehaltes von Holz haben sich elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes etabliert.

Um die typischen bau-praktischen Einsatzbereiche für diese Geräte abzudecken und für Holz die Änderung bau-relevanter Eigenschaften bzw. Gefährdungen zu erkennen bzw. zu analysieren, sind Messungen und entsprechende Kalibrierungen der Geräte innerhalb eines Holz-Feuchtebereichs zwischen Übergang Chemosorption/Adsorption (ca. 6-7 %) und Fasersättigungspunkt (ca. 25-35 %) von Bedeutung und auch ausreichend.

These 2:

Innerhalb eines Holz-Feuchtebereichs zwischen Übergang Chemosorption/Adsorption (ca. 6-7 %) und Fasersättigungspunkt (ca. 25-35 %) ermöglicht eine ausreichende und ausschließliche Wassereinlagerung in den Wänden des Zellaufbaus des Holzes, auf Grund chemischer und physikalischer Gesetzmäßigkeiten die Ableitung eines Zusammenhanges zwischen dem Feuchtegehalt von Holz und dem diesbezüglichen messbaren elektrischen Widerstand und den dahingehenden Umkehrschluss mit einer für die praktische Anwendung hinzunehmenden Messunsicherheit.

Außerhalb des o.g. Holz-Feuchtebereichs sind diesbezügliche Messungen und Rückschlüsse grundsätzlich auch möglich, aber mit zusätzlichen Messunsicherheiten behaftet.

These 3:

Die Kalibrierung für elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes basiert auf einem „Normal“.

Bedingt durch die Inhomogenität des Holzes und der Komplexität der Wassereinlagerung gibt es für Holz jedoch kein anerkanntes, allgemein-gültiges „Normal“.

Jede Kalibrierung basiert auf, durch den jeweiligen Entwickler selbst ausgewähltes Referenzmaterial (Holz).

Insofern muss jede Kalibrierung zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz als relativ (bezogen auf das Referenzmaterial) betrachtet werden.

Die Kalibrierung an sich und die Übertragung auf andere Hölzer sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet.

These 4:

„Die Messung einer physikalischen Größe ist ohne die Angabe der Messunsicherheit wissenschaftlich wert- und sinnlos. Eine Messunsicherheit ist kein Negativkriterium oder Mangel, sondern beschreibt die tatsächliche Qualität bzw. Sicherheit eines erzielten Messergebnisses.“ [MÜ;S.12]

Auf Grund eines fehlenden „Normal“ ist für die Messungen des Feuchtegehaltes von Holz mittels elektronischer Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes die qualifizierte Angabe einer Standardmessunsicherheit nicht möglich.

Die dahingehende Beurteilung obliegt dem Messgeräte-Anwender.

These 5:

Im Rahmen der Master-These wurde für elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes für die Holzart Fichte und für einen Anwendungsbereich zwischen 7 und 30 % Feuchtegehalt mittels Korrelation und Interpolation folgende Kalibrierfunktion mit entsprechender Kalibrierkurve entwickelt:

$$\text{Feuchtegehalt von Holz [\%]} = 135,22e^{-0,025 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log(R) [Ohm]})} - 0,6.$$

Nur für den, der Entwicklung zugrunde liegenden Versuchsaufbau, dem genannten Anwendungsbereich und das verwendete Referenzmaterial kann mittels o.g. Kalibrierfunktion auf Grund eines gemessenen elektrischen Widerstandes ein mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhandener Feuchtegehalt mit einer möglichen, mittleren Messabweichung bis ca. 0,5 % gegenüber dem tatsächlichen Feuchtegehalt „vorhergesagt“ werden. Die genannte Messabweichung ist jedoch nicht einer Standardmessunsicherheit gleichzusetzen.

Bei Anwendung der Kalibrierfunktion für die Messung anderer Hölzer ist mit einer Zunahme der Messabweichung bzw. Messunsicherheit zu rechnen.

Die im Rahmen der Master-These gewählte Verfahrensweise zur Entwicklung einer Kalibrierkurve und Kalibrierfunktion kann als allgemein-gültig betrachtet werden.

These 6:

Losgelöst von einer baupraktischen Bedeutung wurde im Rahmen der Master-These für elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes für die Holzart Fichte und für einen Anwendungsbereich zwischen **7 und 80 %** Feuchtegehalt mittels Korrelation und Interpolation folgende Kalibrierfunktion mit entsprechender Kalibrierkurve entwickelt:

Feuchtegehalt von Holz [%] =

$$6 \cdot 10^6 \cdot (\text{Ohm'scher Widerstand in } 10 \cdot \text{Log(R) [Ohm]})^{-2,871} - 1,7.$$

Nur für den, der Entwicklung zugrunde liegenden Versuchsaufbau, dem genannten Anwendungsbereich und das verwendete Referenzmaterial kann mittels o.g. Kalibrierfunktion auf Grund eines gemessenen elektrischen Widerstandes ein mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhandener Feuchtegehalt mit einer möglichen, mittleren Messabweichung bis ca. 4 % gegenüber dem tatsächlichen Feuchtegehalt „vorhergesagt“ werden. Die genannte Messabweichung ist jedoch nicht einer Standardmessunsicherheit gleichzusetzen.

Bei Anwendung der Kalibrierfunktion für die Messung anderer Hölzer ist mit einer Zunahme der Messabweichung bzw. Messunsicherheit zu rechnen.

These 7:

Eine teilweise in der Fachliteratur pauschal beschriebene Messgenauigkeit bzw. Messunsicherheit von ca. +/-1 % für Messungen mittels elektronischer Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes ist auf Grund einer Vielzahl möglicher systematischer und zufälliger Messabweichungen unrealistisch.

Im Rahmen der Master-These wurde festgestellt, dass eine durch DU/GEISSEN/NOACK benannte systematische Messunsicherheit von bis zu +/-3,5 % Feuchtegehalt (im Anwendungsbereich zwischen 7 und 30 % Holz-Feuchtegehalt) als realistisch eingeschätzt werden kann, wobei auch diese nicht als Standardmessunsicherheit gelten kann (These 4).

These 8:

Die Funktionsweise der meisten handelsüblichen elektronischen Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes beruht ausschließlich auf der Messung des elektrischen Widerstandes in Verbindung mit einer, zumindest für „Oberklasse“-Geräte umfangreichen Holzarten-/Holzunterarten- und Temperatur-Einstellung und dahingehenden Kalibrierungen.

Das Entwicklungspotential für „Oberklasse“-Geräte in der jetzigen Funktionsweise muss als abgeschlossen betrachtet werden. Auch eine weitere Erhöhung der Holzunterarten-Auswahl wird nicht zu einer Verbesserung der Messergebnisse führen, sondern in der praktischen Anwendung eher Unsicherheiten und Fehler in der Geräteeinstellung auf Grund einer nicht möglichen Holzunterarten-Erkennung durch den Geräte-Anwender bewirken.

Eine Weiterentwicklung, d.h. Einschränkung der Messunsicherheit ist nur durch Hinzunahme weiterer Kennwerte mit dahingehender Kalibrierung möglich.

Folgende zusätzliche Einstellmöglichkeiten am Gerät bieten sich z.B. an:

- makroskopischer Messbereich (Kernholz / Splintholz);
- Art der Holz Trocknung (technisch / freiluft);
- Art des im zu messenden Holz eingelagerten bzw. eingedrungenen Wassers mit entsprechender spezifischer Leitfähigkeit (Regenwasser / Trink- bzw. Grundwasser);
- Art der verwendeten Elektroden (isoliert / unisoliert).

These 9:

Eine Prüfung und Zertifizierung der Messgenauigkeit für elektronische Holzfeuchte-Messgeräte auf Basis der Messung des elektrischen Widerstandes durch unabhängige Prüfstellen erfolgte bis dato nur ansatzweise und auf, für die Hersteller freiwilliger Basis für die Holzart Fichte.

Im Rahmen des Waldumbaus werden für das Bauwesen andere Holzarten an Bedeutung gewinnen.

Auch für diese Holzarten sollte eine Prüfung und Zertifizierung der Genauigkeit entsprechender Messgeräte angedacht werden.

7. Literatur

- [BR1] Internetauftritt der Firma Brookhuis;
<http://www.brookhuis.com/de/fmd6.html>; 27.06.15
- [BR2] Bedienungsanleitung/Holzsortentabelle für das HMW FMD
der Firma Brookhuis Applied Technologies WOOD
Institutenweg 15, 7521 PH Enschede, Niederlande;
Stand: 2003
- [DA] DAkkS - Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH:
Schrift DAkkS-DKD-3 – Angabe der Messunsicherheit bei
Kalibrierungen; 1. Neuauflage 2010
- [DI] Universität Stuttgart - Institut für Werkzeugmaschinen:
Holztechnologische Grundlagen und technische Grundregeln
zum Feuchteverhalten von Holz
http://www.dietz-wct.de/download/024_Trock_E01.pdf; 11.09.15
- [DIN844-4] DIN EN 844-4:1997-08 Rund- und Schnittholz – Terminologie
Teil 4: Begriffe zum Feuchtegehalt
- [DIN EN 1001-2] DIN EN 1001-2:2005-10: Dauerhaftigkeit von Holz und
Holzprodukten – Terminologie - Teil 2: Vokabular
- [DIN1319-1] DIN 1319-1:1995-01 Grundlagen der Meßtechnik –
Teil 1: Grundbegriffe
- [DIN13183-1] DIN EN 13183-1:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes
Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren
einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-1:2002-07:2003-12
- [DIN13183-2] DIN EN 13183-2:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes
Schnittholz, Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-
Messverfahren
einschl. Berichtigung 1 zu DIN EN 13183-2:2002-07:2003-12
- [DIN14298] DIN EN 14298:2005-02 Schnittholz – Ermittlung der
Trocknungsqualität
- [DIN52183] DIN 52183:1977-11 Prüfung von Holz, Bestimmung des
Feuchtigkeitsgehaltes – zurückgezogen, der Regelsetzer empfiehlt
die Anwendung von DIN EN 13183-1:2002-07
- [DIN68800-1] DIN 68800-1:2011-10 Holzschutz
Teil 1: Allgemeines
- [DIN68800-2] DIN 68800-2:2012-02 Holzschutz
Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau

- [DIN68800-3] DIN 68800-3:2012-02 Holzschutz
Teil 3: Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln
- [DU] Du, Q.P.; Geissen, A.; Noack, D.: Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip; Fachzeitschrift Holz als Roh- und Werkstoff 49 (1991) 1-6; Springer-Verlag; 1991
- [GA1] Produktkatalog „Elektronische Feuchtigkeitsmessgeräte“ der Firma GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, Gerlingen, Deutschland; Stand 11/2014
- [GA2] Holzsortentabelle für das HMW RTU 600 der Firma GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, Gerlingen, Deutschland; Stand 05/2012
- [GM] Materialfeuchte Gigamodul - Bedienungsanleitung der Firma Scanntronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Deutschland; undatiert (ca. 2015)
- [HA] Haroske, G.: Master-Fernstudiengang „Bautenschutz“ an der Hochschule Wismar; Skript zur Vorlesung „Bekämpfender Holzschutz“; 04.05.2014
- [IR1] Internetrecherche;
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/eichung/3681>; 22.07.15
- [IR2] Internetrecherche;
<http://www.biologie.uni-ulm.de/extern/waldbau/feldf.htm> 24.07.15
- [IR3] Internetrecherche;
http://www.hamm-chemie.de/j12/j12te/LF_Theorie.htm; 23.08.15
- [IW] Brinkmann, B.: Internationales Wörterbuch der Metrologie; 4. Auflage; Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012
- [KO1] Kollmann, F.: Technologie des Holzes; Erste Auflage; Berlin: Verlag von Julius Springer, 1936
- [KO2] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe – Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit; Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage; Berlin: Springer-Verlag, 1951
- [LE] Leschnik, W.: Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und Moderne; Feuchtetag ´99, 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin; DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, Vortrag H2

- [LI] Lißner, K.; Rug W.: Holzbausanierung –
Grundlagen und Praxis der sicheren Ausführung;
Berlin: Springer-Verlag, 2000
- [LO] Lohmann, U. (bearb.): Holzlexikon;
Hamburg: Nikol-Verlags-GmbH & Co. KG, 2015
- [MA] Marutzky, R. (Hrsg.): Holzschutz –
Praxiskommentar zu DIN 68800 Teile 1 bis 4;
Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013
- [ME] Gamper, A.; Dietsch, P.; Merk, M.: Schlussbericht für das
Forschungsvorhaben: Gebäudeklima – Langzeitmessung zur
Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in
Holzbauteilen;
Technische Universität München; 2012
- [MO] Moschig, G.: Bausanierung –
Grundlagen, Planung, Durchführung;
3. Auflage; Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- [MÜ] Müller, U.: Physikalisches Grundpraktikum –
Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung
experimenteller Ergebnisse in der Physik
Humboldt-Universität zu Berlin, 2007
- [NI1] Niemz; P.: Physik des Holzes;
Eidgenössische Hochschule Zürich; Januar 2005
- [NI2] Niemz; P.: IfB, Wood Physics;
Eidgenössische Hochschule Zürich; undatiert
- [NI3] Niemz; P.: Der Baustoff Holz;
Eidgenössische Hochschule Zürich; undatiert
- [TU] Technische Universität München: Holz und sonstige biogene
Rohstoffe, Mikroskopischer Holzaufbau in den anatomischen
Schnittrichtungen; undatiert
- [WA] Wagner, H.: Einfluss der Temperatur auf die
elektrische Leitfähigkeit verdünnter, wässriger Lösungen;
Sonderdruck, VGB Powertech, 92. Jahrgang, Heft 3/2012
- [WÜ] Wagenführ, R.: Anatomie des Holzes;
Leinfelden: DRW-Verlag; 5. Auflage, 1999

8. Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hinweise verwandt.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Werder, den 01. Oktober 2015

Unterschrift Dirk Schwedland

9. Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-0
Anlage 2: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-1
Anlage 3: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-2
Anlage 4: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-3
Anlage 5: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-4
Anlage 6: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Mess-Protokoll C 1-5
Anlage 7: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-0
Anlage 8: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-1
Anlage 9: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-2
Anlage 10: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-3
Anlage 11: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-4
Anlage 12: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Mess-Protokoll C 2-5
Anlage 13: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Mess-Protokoll D 3-0
Anlage 14: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Mess-Protokoll D 3-1
Anlage 15: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Mess-Protokoll D 3-2
Anlage 16: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Mess-Protokoll D 3-3
Anlage 17: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Mess-Protokoll D 4-0
Anlage 18: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Mess-Protokoll D 4-1
Anlage 19: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Mess-Protokoll D 4-2
Anlage 20: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Mess-Protokoll D 4-3
Anlage 21: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Diagramm C 1-A
Anlage 22: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Diagramm C 2-A
Anlage 23: Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-A
Anlage 24: Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-B
Anlage 25: Versuchsanordnung C (Rohlinge 1+2) - Diagramm C (1,2)-C
Anlage 26: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Diagramm D 3-A
Anlage 27: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Diagramm D 4-A
Anlage 28: Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-A
Anlage 29: Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-B
Anlage 30: Versuchsanordnung D (Rohlinge 3+4) - Diagramm D (3,4)-C
Anlage 31: Versuchsanordnung C 1 (Rohling 1) - Diagramm C 1-B
Anlage 32: Versuchsanordnung C 2 (Rohling 2) - Diagramm C 2-B
Anlage 33: Versuchsanordnung D 3 (Rohling 3) - Diagramm D 3-B
Anlage 34: Versuchsanordnung D 4 (Rohling 4) - Diagramm D 4-B
Anlage 35: Sorptionskurven und -werte für Rohling 1
Anlage 36: Sorptionskurven und -werte für Rohling 2
Anlage 37: Sorptionskurven und -werte für Rohling 3
Anlage 38: Sorptionskurven und -werte für Rohling 4