



16

Berichte aus dem TFZ

# Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit





## **Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzscheit**





# **Schnellbestimmung des Wasser- gehaltes im Holzscheit**

**Vergleich marktgängiger Messgeräte**

Klaus Reisinger  
Dr. Hans Hartmann  
Peter Turowski  
Karin Nürnberger

**Berichte aus dem TFZ 16**

Straubing, Februar 2009

**Titel:** Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit –  
Vergleich marktgängiger Messgeräte

**Bearbeitung:** Klaus Reisinger, Dr. Hans Hartmann, Karin Nürnberger

**Autoren:** Klaus Reisinger, Dr. Hans Hartmann, Peter Turowski

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Eigenmitteln des TFZ durchgeführt.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2009  
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.  
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form  
reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder  
archiviert werden.

**ISSN:** 1614-1008

**Hrsg.:** Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe  
Schulgasse 18, 94315 Straubing

**E-Mail:** [poststelle@tfz.bayern.de](mailto:poststelle@tfz.bayern.de)

**Internet:** [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)

**Redaktion:** K. Reisinger, H. Hartmann, P. Turowski

**Verlag:** Eigenverlag TFZ

**Erscheinungsort:** Straubing

**Erscheinungsjahr:** 2009

**Gestaltung:** Klaus Reisinger, Hans Hartmann

**Fotonachweis:** Karin Nürnberger, Klaus Reisinger

## **Danksagung**

Die Autoren möchten sich bei allen Herstellern der Messgeräte zur Bestimmung der Holzfeuchte bedanken, die ihre Geräte kostenfrei zu Versuchszwecken zur Verfügung gestellt haben. Der Dank gilt insbesondere den folgenden Firmen:

- BES Bollmann B.V., Plesmanweg 27, 7602 PD Almelo, Niederlande
- Doser Messtechnik GmbH & Co. KG, Kemptener Str. 73, 87629 Füssen
- Fuva GmbH, Richterstraße 37, 91052 Erlangen
- Gann Mess- und Regeltechnik GmbH, Schillerstraße 63, 70839 Gerlingen
- Greisinger electronic GmbH, Hans-Sachs-Straße 26, 93128 Regenstauf
- HEDÜ GmbH, Karstraße 19a, 41068 Mönchengladbach
- Lignomat GmbH, Gewerbegebiet Nord 3, 09456 Mildena
- PCE Deutschland GmbH & Co. KG, Im Langel 4, 59872 Meschede
- Schaller GmbH, Max-Schaller-Straße 99, 8181 St.Ruprecht an der Raab, Österreich
- Testo AG, Testo-Straße 1, 79853 Lenzkirch
- TROTEC GmbH & Co. KG, Grebbener Straße 7, 52525 Heinsberg
- Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, Schützenstraße 41, 33181 Bad Wünnenberg

Die Autoren





## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>		<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>		<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>		<b>13</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>		<b>15</b>
<b>2 Definitionen und Stand des Wissens .....</b>		<b>17</b>
<b>2.1 Definition des Wassergehalts und der Brennstofffeuchte .....</b>		<b>17</b>
<b>2.2 Wassergehaltsbestimmung in der Praxis .....</b>		<b>18</b>
<b>3 Übersicht zu den angebotenen Schnellbestimmungsgeräten .....</b>		<b>21</b>
<b>3.1 Leitfähigkeitsmessung .....</b>		<b>21</b>
<b>3.2 Kapazitive Messung.....</b>		<b>24</b>
<b>3.3 Mikrowellen-Messverfahren.....</b>		<b>26</b>
<b>3.4 Infrarotmessverfahren, chemisches Messverfahren,   Neutronenstreuverfahren .....</b>		<b>26</b>
<b>4 Vorgehen und Methodik .....</b>		<b>27</b>
<b>4.1 Auswahl der im Versuch verwendeten Messgeräte .....</b>		<b>27</b>
<b>4.2 Auswahl der Versuchsbrennstoffe .....</b>		<b>28</b>
<b>4.3 Versuchsplan und Versuchsdurchführung .....</b>		<b>29</b>
<b>4.4 Wiederholungen/Messpositionen .....</b>		<b>31</b>
<b>4.5 Vorversuche .....</b>		<b>31</b>
4.5.1 Abtrocknung während der Messung .....		31
4.5.2 Erforderliche Trocknungsdauer (Trockenschrank).....		33
4.5.3 Temperatureinfluss .....		34
<b>4.6 Versuchsdurchführung .....</b>		<b>36</b>
<b>4.7 Referenzmessung (Trockenschrankmethode).....</b>		<b>38</b>
<b>4.8 Auswertung .....</b>		<b>40</b>
<b>5 Ergebnisse und Diskussion.....</b>		<b>41</b>
<b>5.1 Einfluss der Holzart.....</b>		<b>41</b>
<b>5.2 Einfluss der Messpunkte am Holzscheit.....</b>		<b>44</b>
<b>5.3 Einfluss der Scheitvorbereitung .....</b>		<b>47</b>
<b>5.4 Beurteilung der einzelnen Messgeräte .....</b>		<b>50</b>
5.4.1 BES Bollmann EASY <i>comfort</i> .....		50
5.4.2 DOSER DM 4A.....		53
5.4.3 DOSER LWM 2 .....		56

5.4.4	Fuva S 06 .....	58
5.4.5	Gann Hydromette Compact S .....	60
5.4.6	Gann Hydromette HT 65 mit Elektrode M 18.....	62
5.4.7	Greisinger GMH 3830 mit Elektrode GHE 91 .....	65
5.4.8	Greisinger GMR 100 .....	68
5.4.9	HEDÜ 2 in 1 .....	70
5.4.10	Lignomat maxiLigno mit Elektrode E 12.....	74
5.4.11	Lignomat mini X .....	76
5.4.12	PCE FME mit Fühler NF 4-17 .....	78
5.4.13	PCE – 333 .....	80
5.4.14	Schaller humimeter BLW .....	82
5.4.15	testo 606-1 .....	85
5.4.16	TROTEC T 500 .....	88
5.4.17	TROTEC T 60 .....	90
5.4.18	Wetekom MD-018.....	92
5.4.19	Wöhler HBF 410 .....	94
<b>5.5</b>	<b>Gesamtübersicht und Gegenüberstellung .....</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>105</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich verschiedener Schnellbestimmungsgeräte für den Wassergehalt von Scheitholz. Abweichung zum Referenzverfahren (Trockenschrank 105 °C) für Scheitholz (Fichte, Buche) (Quelle: [13]) .....	19
Abbildung 2:	Beispiel einer Widerstands/Holzfeuchtemesskurve Fabrikat Trotec, Typ T2000; (verändert nach [38]) .....	22
Abbildung 3:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat BES Bollmann, Typ Easy-comfort, mit integrierten Nadeln (links) und Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat GANN, Typ Hydromette HT 65 mit Rammelektrode M 18 (rechts) .....	23
Abbildung 4:	Kapazitives Messgerät Fabrikat Wöhler, Typ HBF 410, mit Kondensatorplattenoberfläche (links) und kapazitives Messgerät Fabrikat Doser, Typ DM 4 A, mit Oberflächen-Federelektroden (rechts).....	25
Abbildung 5:	Gewählte Messpunkte für die Wassergehaltsbestimmung von Scheitholz.....	31
Abbildung 6:	Wasserverlust unterschiedlicher Holzscheite über eine Messdauer von zwei Stunden bezogen auf das Gesamtgewicht der Scheite (links) bzw. auf den Wasseranteil der Scheite (rechts).....	32
Abbildung 7:	Verlauf des Wassergehaltes von zwei Buchen- und zwei Fichtenholzproben (zerkleinert auf maximal 30 mm Spanstärke) im Trockenschrank bei 105 °C .....	34
Abbildung 8:	Änderung der Messgenauigkeit von drei im Vorversuch verwendeten Feuchte-Schnellbestimmungsgeräten, Fabrikat PCE, PCE-333, Fabrikat Gann, Hydromette HT 65, Fabrikat Wöhler, HBF 410 (Nadelmodus), in Abhängigkeit der Temperatur (d. h. Holz-, Messgeräte- und Umgebungstemperatur) .....	35
Abbildung 9:	Feuchteschnellbestimmung am Beispiel eines Fichten-Holzschaites mit dem Messgerät BES Bollmann, Easy-comfort, Nadelmodus, (links) und Spalten des Holzschaites mit der Axt, (rechts) .....	37
Abbildung 10:	Verbogene Messstifte (Nadeln) am Beispiel Fabrikat Doser, LWM 2, (links) sowie unebene Auflagefläche an einem Holzschait (hier Fabrikat HEDÜ, 2 in 1, Kontaktmodus), (rechts) .....	38
Abbildung 11:	Trockenblech mit Probe bei der Wägung im heißen Zustand, mit wärmedämmender Unterlage (links), sowie beladenes Trockenblech im Trockenschrank (rechts) .....	39
Abbildung 12:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat BES Bollmann, Typ Easy-comfort, mit integrierten Nadeln (links) bzw. mit Kontaktkappe (rechts) .....	50
Abbildung 13:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit von Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät BES Bollmann, EASY comfort, Messung mit Einstechnadeln .....	51
Abbildung 14:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt	

	(links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät BES Bollmann, EASY comfort, Messung mit Kontaktkappe .....	52
Abbildung 15:	Dielektrisches Messgerät Fabrikat Doser, Typ DM 4 A .....	53
Abbildung 16:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Doser, DM 4A .....	55
Abbildung 17:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Doser, Typ LWM 2 mit Einstechnadeln .....	56
Abbildung 18:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Doser, LWM 2.....	57
Abbildung 19:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Fuva, Typ S 06 mit Einstechnadeln .....	58
Abbildung 20:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Fuva, S 06.....	59
Abbildung 21	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Gann, Typ Hydromette Compact S mit Einstechnadeln .....	60
Abbildung 22:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Gann, Hydromette Compact S.....	61
Abbildung 23:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Gann, Typ HT 65 mit Einschlagelektrode M 18.....	62
Abbildung 24:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Gann, Hydromette HT 65 mit Elektrode M 18.....	64
Abbildung 25:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Greisinger, Typ GMH 3830 mit Einschlagelektrode GHE 91 .....	65
Abbildung 26:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Greisinger, GMH 3830 mit Elektrode GHE 91 .....	67
Abbildung 27:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Greisinger, Typ GMR 100 mit Einstechnadeln .....	68
Abbildung 28:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von	

	Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Greisinger, GMR 100 .....	69
Abbildung 29:	Feuchtigkeitsmessgerät Fabrikat HEDÜ, Typ 2 in 1, mit Einstechnadeln (links) bzw. mit Kondensatorplatte für Messung im Suchermodus (rechts) .....	70
Abbildung 30:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät HEDÜ, 2 in 1 Nadelmodus .....	71
Abbildung 31:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät HEDÜ, 2 in 1 Suchermodus.....	73
Abbildung 32:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Lignomat, Typ maxiLigno mit Einschlagelektrode E 12 .....	74
Abbildung 33:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Lignomat, maxiLigno mit Elektrode E 12.....	75
Abbildung 34:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Lignomat, Typ mini X mit Einstechnadeln .....	76
Abbildung 35:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Lignomat, mini X .....	77
Abbildung 36:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat PCE, Typ FME mit Fühler NF 4-17 .....	78
Abbildung 37:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät PCE, FME mit Fühler NF 4-17 .....	79
Abbildung 38:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat PCE, Typ PCE-333 mit Einstechnadeln .....	80
Abbildung 39:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät PCE, PCE-333 .....	81
Abbildung 40:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Schaller, Typ humimeter BLW mit Rammelektrode .....	82
Abbildung 41:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Schaller,	

	humimeter BLW (Interpretation der abgelesenen Messwerte als Wassergehalt w).....	84
Abbildung 42:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat testo, Typ 606-1 mit Einstechnadeln.....	85
Abbildung 43:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät testo, 606-1 (Interpretation der abgelesenen Messwerte als Wassergehalt w) .....	87
Abbildung 44:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat TROTEC, Typ T 500 mit Einstechnadeln.....	88
Abbildung 45:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät TROTEC, T 500 .....	89
Abbildung 46:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat TROTEC, Typ T 60 mit Einstechnadeln.....	90
Abbildung 47:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät TROTEC, T 60.....	91
Abbildung 48:	Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Wetekom, Typ MD-018 mit Einstechnadeln .....	92
Abbildung 49:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Wetekom, MD-018 .....	93
Abbildung 50:	Feuchtigkeitsmessgerät Fabrikat Wöhler, Typ HBF 410, mit Einstechnadeln .....	94
Abbildung 51:	Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Wöhler, HBF 410 Nadelmodus .....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gesamtübersicht der im Projekt untersuchten Feuchte-Messgeräte zur Schnellbestimmung der Brennstoff-Feuchte u bzw. des Wassergehaltes w.....	28
Tabelle 2:	Wassergehalte und Scheitanzahl der verwendeten Probenhölzer .....	29
Tabelle 3:	Versuchsplan und Anzahl Messungen pro Variante der jeweiligen Versuchsfrage .....	30
Tabelle 4:	Reihenfolge, in der die Feuchte-Schnellbestimmungsgeräte am jeweiligen Holzsplit eingesetzt wurden .....	36
Tabelle 5:	Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Buchenspliten in verschiedenen Wassergehaltsbereichen .....	41
Tabelle 6:	Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Fichtenspliten in verschiedenen Wassergehaltsbereichen.....	42
Tabelle 7:	Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen an beiden Stirnseiten des Holzsplites bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen.....	44
Tabelle 8:	Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen an der Längsseite des Holzsplites bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen.....	45
Tabelle 9:	Rel. Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen am Originalsplit (nicht frisch gespalten) bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen.....	47
Tabelle 10:	Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen am frisch gespaltenen Holzsplit bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen.....	48
Tabelle 11:	Übersicht über die mittlere relative Abweichung aus der Feuchteschnellbestimmung bezogen auf den Referenzwassergehalt in Prozent für alle untersuchten Messgeräte und Einflussparameter (Hier: Mittelwertbildung mit Berücksichtigung der Vorzeichen).....	97
Tabelle 12:	Übersicht über die mittlere Streuung der Werte aus der Schnellbestimmung im Vergleich zum Referenzwert über alle Messgeräte und alle untersuchten Einflussparameter (Hier: Streuung berechnet als mittlerer Betrag der Abweichungen ohne Berücksichtigung des Vorzeichens).....	98
Tabelle 13:	Adressenliste der Hersteller von Feuchte-Schnellbestimmungsgeräten .....	105
Tabelle 14:	Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Splitvorbereitung, über alle Holzarten, alle Wassergehalte und über alle Messpunkte .....	106
Tabelle 15:	Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Lage des Messpunktes, über alle Holzarten, alle Wassergehalte und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzsplit .....	107

Tabelle 16:	Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Holzart, über alle Messpunkte, alle Wassergehalte und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzschicht .....	108
Tabelle 17:	Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit des Wassergehaltes im Holzschicht, über alle Messpunkte, alle Holzarten und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzschicht .....	109



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Heizen mit Holz ist wieder interessant und mittlerweile heizt jeder fünfte Haushalt zumindest teilweise mit Holz. Vor allem diese Nachfrage aus den privaten Haushalten hat dazu geführt, dass der Holzverbrauch in den vergangenen Jahren stark angestiegen ist. Wurde der Holzverbrauch der privaten Haushalte vor wenigen Jahren noch mit etwa 12 Millionen Festmetern pro Jahr ausgewiesen, so ergeben neuere Untersuchungen der Universität Hamburg einen Holzverbrauch von aktuell über 20 Millionen Festmetern. Hierbei handelt es sich zu über 80 % um Scheitholz aus dem Wald, Garten und Landschaft. Es folgen – mit abnehmendem Mengenanteil – Altholz, Schnittholzreste, Holzbriketts, Hackschnitzel und Holzpellets. Etwa 82 % der mit Holz heizenden Haushalte nutzen Holz in Kaminöfen und Kachelöfen und 18 % verfügen über eine Holz-Zentralheizung [1].

Der Einsatz von Scheitholz als Brennstoff bringt jedoch auch einige Qualitäts-Anforderungen an den Brennstoff mit sich, die im Sinne einer wirtschaftlichen und emissionsarmen Verbrennung einzuhalten sind. Neben dem Einfluss der Holzauflagemenge speziell bei Einzelfeuerstätten spielt insbesondere die Größe der verwendeten Holzscheite und deren Wassergehalt eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund ist nach den Bestimmungen der ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) § 3 Abs. 3 [3] der Einsatz von Scheitholz in handbeschickten Feuerungsanlagen lediglich in lufttrockenem Zustand zulässig. Aktuelle (noch unveröffentlichte) Untersuchungen am Technologie und Förderzentrum (TFZ) in Straubing belegen, dass bei Verwendung von Scheitholz mit einem Wassergehalt von mehr als 20 % –je nach der verwendeten Feuerungsanlage – bereits deutlich höhere Emissionen an Staub und organischen Komponenten (angegeben als Ges.-C) entstehen können. So liegen beispielsweise die Gesamtstaubemissionen bei einem untersuchten Kaminofen mit einer Nennwärmeleistung von 7 kW und einem Brennstoffwassergehalt von 20 % bei 69 Milligramm pro Normkubikmeter ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) im verdünntem Abgas (bezogen auf 13 %  $\text{O}_2$ ), während sie bei einem Brennstoffwassergehalt von 30 % bereits bei 1 144  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , d. h. um mehr als das 16-fache höher liegen. Die Emissionen an organischen Komponenten erhöhen sich für den gleichen Beispielfall von 284 auf 3 299  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , was unter anderem auch zu einer stark vermehrten Geruchsbelästigung führt.

Im Rahmen der bevorstehenden Novellierung der 1. BImSchV soll zukünftig die Einhaltung einer maximalen Brennstofffeuchte von 25 % (dies entspricht einem Wassergehalt von 20 %) wiederkehrend durch den Schornsteinfeger überprüft werden. Bei Zentralheizungskesseln soll dies im Rahmen der wiederkehrenden Überwachung alle zwei Jahre und bei Einzelraumfeuerungsanlagen im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Feuerstättenschau alle fünf Jahre erfolgen. Diese Anforderung soll nicht bei automatisch beschickten Anlagen gelten, die nach Angaben des Herstellers für Brennstoffe mit höheren Wassergehalten geeignet sind [4].

Als Voraussetzung für die Überprüfung des Brennstoffs durch den Schornsteinfeger müssen geeignete Messgeräte für die Schnellbestimmung der Feuchte beziehungsweise des Wassergehaltes im Scheitholz beim Betreiber einer Feuerungsanlage vor Ort zur Verfügung stehen. Noch unklar ist allerdings, welche Messgeräte sich für eine solche Schnellbestimmung eignen und mit welcher Genauigkeit deren Messergebnisse zu erwarten sind bzw. wie die Messungen im Detail am sinnvollsten durchzuführen sind, um hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen.

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen sollten im vorliegenden Projekt marktgängige Holzfeuchtemessgeräte systematisch vergleichend untersucht und bewertet werden. Hierbei wurde die Forderung nach einer möglichst genauen, jedoch zeitlich wenig aufwändigen Messung, bei gleichzeitig einfacher Bedienbarkeit und geringen Anschaffungskosten erhoben. Zwischen diesen Forderungen ist ein stets praktikabler Kompromiss anzustreben. Infolge des bisher sehr geringen Erfahrungsstandes im Umgang mit derartigen Messgeräten waren hierzu entsprechende Versuche und Messungen durchzuführen. Im Einzelnen sind die folgenden Untersuchungsziele zu nennen:

- Bewertung der Messgenauigkeit unterschiedlicher Messgeräte zur Schnellbestimmung des Wassergehaltes in Holzscheiten in Abhängigkeit vom Wassergehalt
- Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Holzarten auf das Ergebnis der Messung an für den Waldbestand repräsentativen Holzarten
- Bewertung des Einflusses der Messpunktlage im Holzscheid auf das Messergebnis an ausgewählten Messpositionen am Scheit
- Bewertung des Einflusses vorbereitender Maßnahmen am Holzscheid hinsichtlich der zu erwartenden Messgenauigkeit; Vergleich der Messergebnisse am Originalscheid (nicht frisch gespalten) und am frisch gespaltenen Scheit
- Vergleich und Bewertung der derzeit auf dem Markt angebotenen Messgeräte zur Feuchteschnellbestimmung im Holzscheid und Erarbeitung von Vorschlägen für die Anpassung dieser Verfahren an zukünftige Messanforderungen
- Identifikation von Ursachen, die zu einer Fehlmessung führen

Die hierzu durchgeführten Arbeiten werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

## 2 Definitionen und Stand des Wissens

### 2.1 Definition des Wassergehalts und der Brennstofffeuchte

Der Gehalt an Wasser, der sich unter definierten Bedingungen aus dem Brennstoff entfernen lässt, wird als Wassergehalt  $w$  (zum Teil auch Feuchtegehalt) bezeichnet [8]. Er wird auf die Frischmasse (d. h. Nassbasis) bezogen und beschreibt damit das in der feuchten Biomasse befindliche Wasser, wobei sich diese feuchte Biomasse aus der trockenen Biomasse (d. h. Trockenmasse)  $m_B$  und der darin enthaltenen Wassermasse  $m_W$  zusammensetzt (Gleichung G-1).

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} \quad (\text{G-1})$$

Im Bereich der Forstwirtschaft wird häufig anstelle des Wassergehaltes der Begriff der Brennstoff-Feuchte  $u$  (zum Teil auch „Holzfeuchte“ oder „Feuchtegehalt“) verwendet. Anders als der Wassergehalt wird die Brennstoff-Feuchte auf die Trockenmasse (d. h. Trockenbasis) bezogen. Sie ist definiert als die im Brennstoff gebundene Wassermasse  $m_W$  bezogen auf die trockene Biomasse  $m_B$  nach Gleichung G-2. Die Feuchte kann damit in den Wassergehalt umgerechnet bzw. aus ihm berechnet werden. Demnach entspricht z. B. ein Wassergehalt von 50 % einer Brennstoff-Feuchte von 100 %. Bei den Feuchte-Angaben sind somit auch Werte von über 100 % möglich.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1-w} \quad (\text{G-2})$$

Im Bereich der energetischen Biomassenutzung hat sich international der Begriff Wassergehalt durchgesetzt [8] [11], allerdings kommt es häufig zu Missverständnissen, weil der Wassergehalt in englischsprachigen Quellen (z. B. EN-Normen) mit „Moisture“ bezeichnet wird, welche in der deutschen Übersetzung wiederum meist irrtümlich zur „Feuchte“ wird. Der Wassergehalt wird bestimmt, indem eine Probe in einem Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz, d. h. bis keine weitere Gewichtsabnahme mehr eintritt, trocknet [7].

Bei der Anwendung des Begriffs Wassergehalt ist zu beachten, dass unbehandelte Biomasse-Brennstoffe oft geringe Mengen an flüchtigen energiereichen Verbindungen (Extraktstoffen) enthalten können, die bei der Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung entweichen können. Am häufigsten handelt es sich bei diesen entweichenden organischen Verbindungen um  $\alpha$ -Pinene, die beispielsweise gegenüber einer Trocknung bei 80 °C vermehrt freigesetzt werden, wenn bei der üblichen Temperatur von 105 °C getrocknet wird. Allerdings macht der auf diese Weise gemessene, vermeintliche Wassergehaltsunterschied fast durchweg deutlich weniger als 1 Prozentpunkt aus; lediglich bei harzreichen Materialien (z. B. Fichtennadeln) sind etwas höhere Abweichungen möglich [2]. Bei den üblichen festen Brennstoffen kann im Allgemeinen jedoch der Fehler, der sich daraus bei der energetischen Bewertung eines Festbrennstoffs (d. h. Heizwertberechnung) ergeben könnte, vernachlässigt werden.

## 2.2 Wassergehaltsbestimmung in der Praxis

Der Wassergehalt  $w$  ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale biogener Festbrennstoffe. Energieausbeute, Lagerfähigkeit und Lieferpreise hängen von einer korrekten Bestimmung dieses Parameters ab. Die Bestimmung nach der Trockenschrankmethode (CEN/TS 14774-1 [7]) ist zwar weit verbreitet, aber für viele Praxisanwendungen zu zeitaufwändig. Holzartige Brennstoffe müssen bis zur Gewichtskonstanz mindestens 24 Stunden trocknen und bei Scheitholz muss die Probe erst mit einem geeigneten Werkzeug (beispielsweise Axt oder Spaltnmesser) auf eine Teilchendicke von höchstens 30 mm (CEN/TS 14780 [9]) zerkleinert werden. Daher werden in der Praxis für eine schnellere Bestimmung des Wassergehaltes im Holzscheit häufig sogenannte Holzfeuchtemessgeräte eingesetzt, mit denen meist die Brennstofffeuchte  $u$  ermittelt wird, die dann auf den Wassergehalt  $w$  umgerechnet werden kann (vgl. Kapitel 2.1).

Vergleichsmessungen oder Praxistests mit Messgeräten für die Schnellbestimmung des Wassergehaltes bzw. der Holzfeuchte sind bislang vornehmlich für Anwendungen bei Schüttgutbrennstoffen (Holzhackschnitzel, Holzpellets) durchgeführt worden (vgl. [6], [13]). Zu Messverfahren für Scheitholzbrennstoffe ist lediglich eine Untersuchung der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik bekannt geworden (vgl. [5], [13]). Darin wird von Messungen mit fünf Messgeräten zur Schnellbestimmung des Wassergehaltes von Scheitholz berichtet. Im Rahmen der Untersuchung wird festgestellt, dass der Einsatz solcher Geräte sehr begrenzt ist, da deren Messbereich häufig nicht über den Fasersättigungsbereich (ca. 18 bis 26 % Wassergehalt, vgl. [25]) hinaus reichen, weil oberhalb dieses Bereiches kaum noch ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der elektrischen Leitfähigkeit des Holzes besteht. Bei allen Messgeräten wurden mit zunehmendem Wassergehalt (bereits ab ca. 20 %) erhebliche Abweichungen zur Referenzmessung (Trockenschrankmethode) beobachtet.

Im Vergleich zu Messungen bei Schüttgütern (z. B. Holzhackschnitzeln) ist die Schnellbestimmung des Wassergehaltes von Scheitholz zudem auch mit wesentlich größeren Messwertschwankungen verbunden. In der genannten Untersuchung wird auch festgestellt, dass in diesen Messungen offenbar tendenziell eine Unterschätzung des tatsächlichen Wassergehaltes eintritt. Hinsichtlich der Einsatztauglichkeit bzw. der Genauigkeit der Kalibrierung sind somit Zweifel angebracht. Dies spiegelt sich auch in den veröffentlichten Messergebnissen wider (vgl. Abbildung 1).

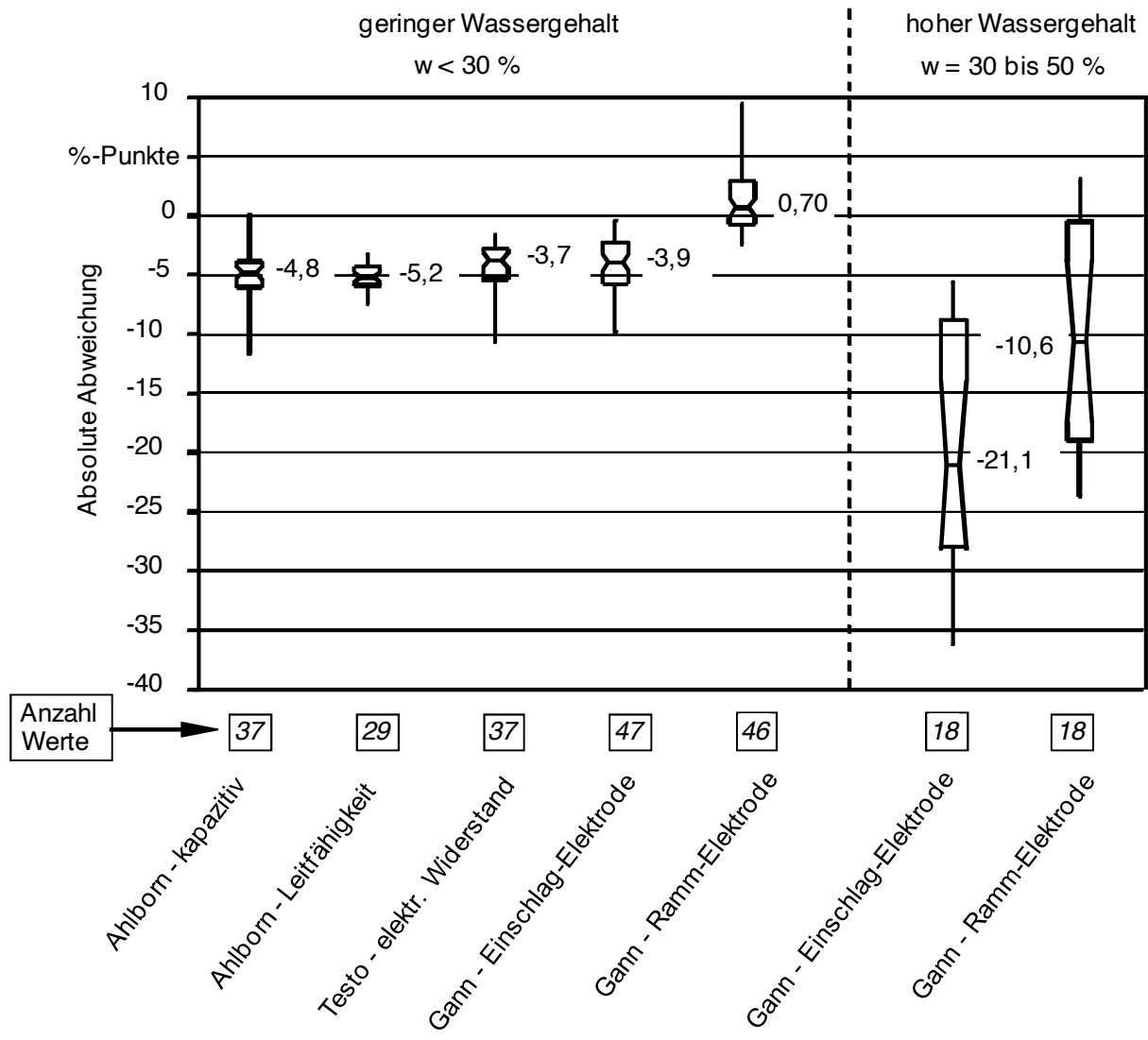


Abbildung 1: Vergleich verschiedener Schnellbestimmungsgeräte für den Wassergehalt von Scheitholz. Abweichung zum Referenzverfahren (Trockenschrank 105 °C) für Scheitholz (Fichte, Buche) (Quelle: [13])



### 3 Übersicht zu den angebotenen Schnellbestimmungsgeräten

Zur Schnellbestimmung der Holzfeuchte im Holzscheit kommen mehrere Verfahren zum Einsatz. Bei manchen erfolgt die Messung „zerstörungsfrei“, bei anderen wiederum müssen Einstiche in das Holz erfolgen. Beim zerstörungsfreien Messen ist eine Angabe zur Rohdichte im absolut trockenen Zustand der zu untersuchenden Probe erforderlich. Das Gerät wird auf das Material aufgesetzt und mit einem Sensor wird die absolute Feuchtigkeit ermittelt. Andere Geräte verwenden zwei Einstechnadeln, die als Messelektroden in das Holz eingetrieben werden, wobei sofort danach der ermittelte Messwert vom Gerät angezeigt wird. Gemessen wird dabei die elektrische Leitfähigkeit, die sich im Holz bei einer bestimmten Feuchte und Holztemperatur einstellt. Nachfolgend werden die einzelnen bei der Scheitholzmessung üblicherweise verwendeten Messverfahren im Detail beschrieben [12].

#### 3.1 Leitfähigkeitsmessung

Bei der Leitfähigkeitsmessung (in Anlehnung an die Messung von Schnittholz nach DIN EN 13183-2 [15]) als klassische Holzfeuchtemessung von stückigen Brennstoffen (Scheitholz) handelt es sich um eine Widerstands- bzw. Leitfähigkeitsmessung zwischen zwei Elektroden, wobei die Brennstofffeuchte  $u$  näherungsweise bestimmt werden kann [12]. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass der elektrische Widerstand von Holz mit steigendem Wassergehalt vom Darrzustand (0 % Wassergehalt) bis zum Fasersättigungsbereich (ca. 19 bis 25 % Wassergehalt) etwa um den Faktor  $10^6$  sinkt [10]. Darrtrockenes Holz setzt einem elektrischen Stromfluss also einen sehr hohen Widerstand entgegen. Das Vorhandensein von Wasser im Holz verändert das Verhalten gegenüber elektrischen Strom, je mehr Wasser sich im Holz befindet, desto geringer wird sein Widerstand und desto mehr Strom kann in dem betreffenden Holz fließen [14]. Dieser rechnerische Zusammenhang, der anhand eines Beispiels in Abbildung 2 dargestellt ist, wird anhand von holzartspezifischen Widerstandskennlinien in einen Feuchte- bzw. Wassergehaltswert umgerechnet.

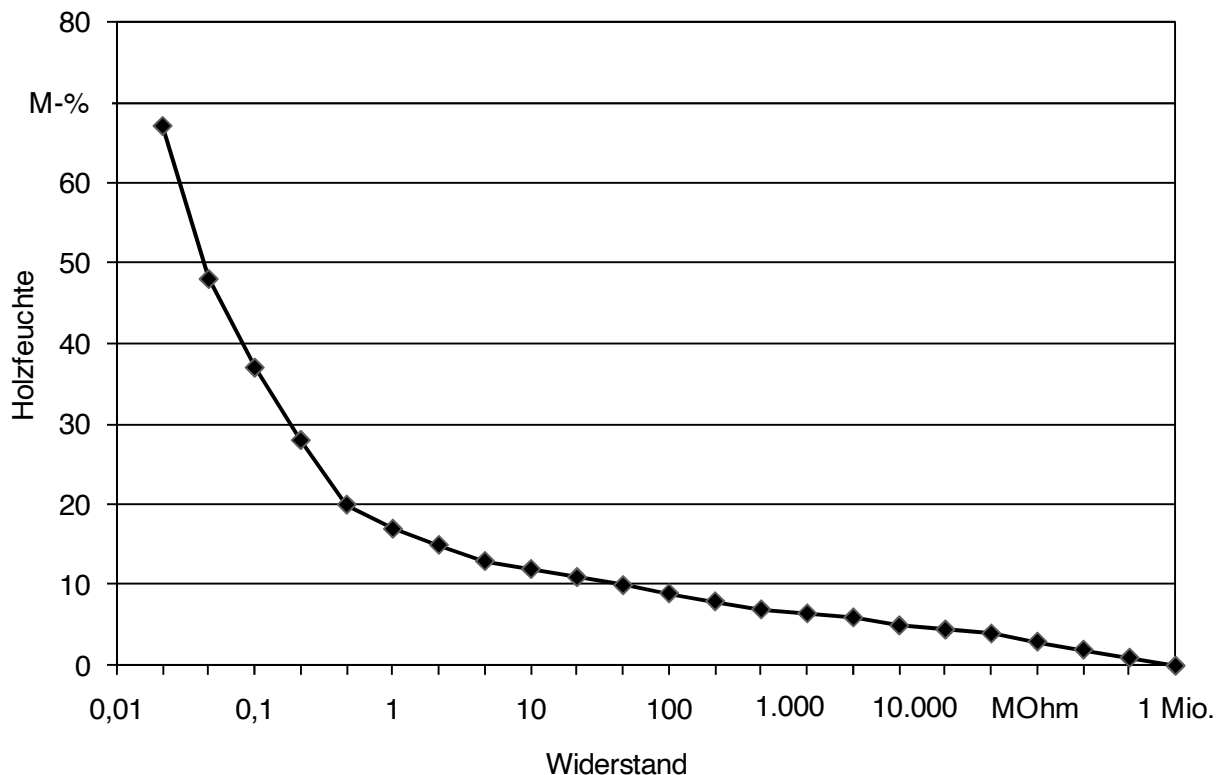


Abbildung 2: Beispiel einer Widerstands/Holzfeuchtemesskurve Fabrikat Trotec, Typ T2000; (verändert nach [38])

Der Leitfähigkeitsmessung sind durch die Beschaffenheit des Holzes bestimmte Grenzen gesetzt, wobei besonders der Fasersättigungspunkt eine entscheidende Rolle spielt. Unterhalb des Fasersättigungspunktes ist das im Holz vorhandene Wasser in den Zellen gebunden und den hygroskopischen Ausgleichsgesetzen mit der umgebenden Luft unterworfen. Hierbei können zwei Zustände auftreten: Entweder ein völliges Gleichgewicht, bei dem auch die Wasserverteilung im Holz völlig gleichmäßig ist, oder ein Gefälle, bei dem aber wiederum letztlich eine gewisse Regelmäßigkeit in der Wasserverteilung vorhanden ist. Oberhalb des Fasersättigungspunktes, also im übersättigten Zustand, wird das Wasser nicht mehr im Zellverband gebunden, sondern es lagert sich in freier Form in den Zellhohlräumen ab. Dieses sogenannte freie Wasser ist keiner Gesetzmäßigkeit unterworfen, d. h. ein Ausgleich innerhalb des Holzes findet kaum mehr statt, so dass Zonen mit höherer und niedriger Holzfeuchte direkt aneinandergrenzen können. Betrachtet man die Änderung des elektrischen Widerstandes bei zunehmender Holzfeuchte, so zeigt sich eine sehr starke Abnahme des Widerstandes bis zum Fasersättigungspunkt. Nach Überschreiten des Fasersättigungspunktes wird diese Abnahme immer geringer und bei sehr hohen Feuchtigkeitswerten ist diese Änderung kaum noch feststellbar. Die Messfehler werden aber umso größer, je geringer die Änderung des elektrischen Widerstandes je Prozentpunkt Feuchtigkeit ist. Dies bedeutet für die Praxis, dass eine Brennstofffeuchte ( $u$ ) von z. B. 60 bis 80 % (d. h.  $w = 38$  bis 44 %) weit weniger genau erfasst werden kann als unterhalb des Fasersättigungspunktes, also z. B. im Feuchtigkeitsbereich zwischen 10 und 20 % (d. h. Wassergehalt  $w = 9$  bis 17 %) [14]. Nach DIN EN 13183-2 [15] (Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz) liegen die Grenzen der Anwendbarkeit dieses Verfahrens bei einem Feuchtegehalt ( $u$ ) zwischen 7 und 30 % (d. h.  $w = 7$  bis 23 %). Damit



ist es aber bei Brennholz kaum anwendbar, da die für die Anwendung interessante Grenze zwischen trockenem und noch nicht trockenem Holz etwa bei einer Feuchte von 25 % liegt (d. h.  $w = 20\%$ ).

Ein wichtiger Punkt der Leitfähigkeitsmessung ist die richtige Ausrichtung der Elektroden bei der Messung. In Abweichung zu DIN EN 13183-2 [15] (gilt für Schnittholz) wird die Messstrecke (die Strecke zwischen den beiden Elektroden) bei der Feuchtemessung von Scheitholz meist quer zur Faserrichtung vorgeschrieben, d. h. die Verbindungslinie zwischen den beiden Kontakten der Elektroden soll die Faser kreuzen. Diese Ausrichtung der Elektroden ist laut Angabe der Hersteller mit den geringsten Streuungen verbunden, das gilt sowohl bei Tiefen- als auch bei Oberflächenelektroden. Setzt man eine vollkommen homogene Feuchteverteilung im Holz voraus, so werden die zu einem Messgerät gehörenden, aufeinander abgestimmten Oberflächen- und Tiefenelektroden die gleichen Messergebnisse bringen. Dieser Idealfall liegt jedoch in der Praxis – insbesondere bei Brennholz – sehr selten vor. Meist ist ein mehr oder weniger großes Feuchtigkeitsgefälle vorhanden, das vor allem von innen nach außen besteht. Misst man dieses Holz mit einer Oberflächenelektrode (Abbildung 3, links), so wird man lediglich die trockene obere Schicht erfassen, die wie eine isolierende Haut wirkt. Verwendet man für dieselbe Probe eine Tiefenelektrode (Abbildung 3, rechts), die bis in die Holzmitte oder darüber hinaus eingetrieben wird, so wird der feuchtere Kern, der dem elektrischen Strom den geringsten Widerstand entgegensetzt, das Messergebnis bestimmen. In beiden Fällen entspricht das Ergebnis nicht dem tatsächlichen Wassergehalt, der durch eine Darrprobe nach CEN/TS 14774-1 [7] bestimmt werden könnte, sondern gibt eher den Zustand an der Oberfläche oder im Inneren wieder. Wird die Tiefenelektrode bei etwa einem Drittel der Holzdicke eingesetzt, so wird das Resultat voraussichtlich mit besserer Annäherung den Wassergehalt der Probe ausweisen [14] [15].

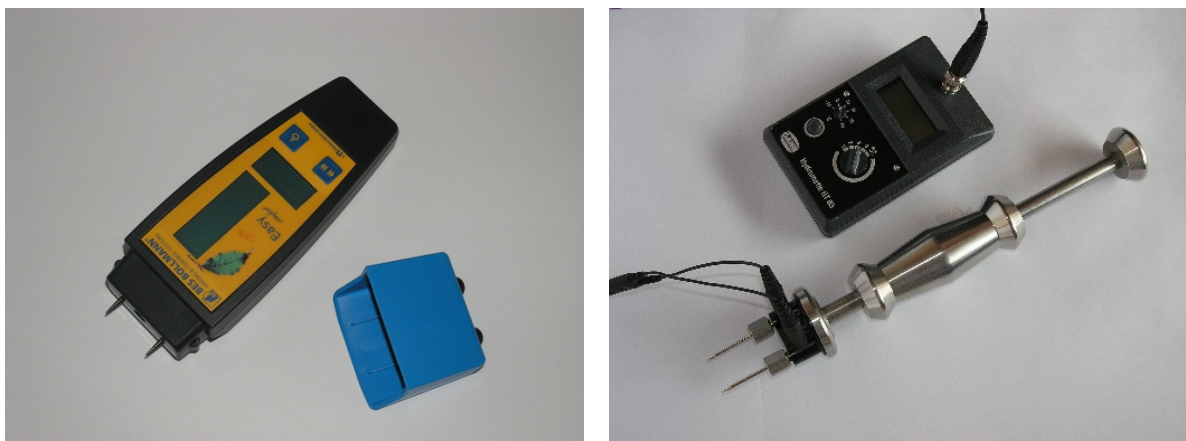


Abbildung 3: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat BES Bollmann, Typ Easy-comfort, mit integrierten Nadeln (links) und Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat GANN, Typ Hydromette HT 65 mit Rammelektrode M 18 (rechts)

Ein Feuchtigkeitsgefälle von außen nach innen hat bei unisolierten Elektrodenspitzen einen gewissen Messfehler zur Folge, da sowohl Oberflächen-, als auch Tiefenelektroden den Wert der feuchteren Außenzone anzeigen. Durch den Einsatz von am Schaft isolierten Spitzen kann der

Feuchteverlauf beim Eindringen in tiefere Schichten gemessen werden. In diesem Fall wird nur direkt an der Oberfläche ein hoher Wert angezeigt, während beim Eindringen in tiefere Schichten die dann dort vorliegende Feuchte angezeigt wird [14].

Von großem Einfluss auf die Leitfähigkeitsmessung ist die Temperatur des zu messenden Holzes. Der elektrische Widerstand des Holzes ändert sich nicht nur mit dem Wassergehalt, sondern auch mit der Temperatur. Setzt man einen gleichbleibenden Wassergehalt voraus, so nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur ab, fallende Temperaturen haben dagegen eine Zunahme zur Folge. Diese Temperaturabhängigkeit ist nicht gleichbleibend, sondern vergrößert sich mit steigender Holzfeuchte [14].

Einfache Holzfeuchte-Messgeräte sind im Allgemeinen auf eine Holztemperatur von +20 °C ausgelegt, so dass bei Abweichung von diesem Temperaturwert die Anzeige nicht mehr der tatsächlichen Brennstofffeuchte entspricht. Bei Temperaturen < 20 °C werden zu niedrige, bei Temperaturen > 20 °C zu hohe Feuchtwerte angezeigt. Eine Korrektur der Anzeigewerte mit Hilfe einer entsprechenden Korrekturtabelle ist daher sinnvoll. Bei verschiedenen Holzfeuchte-Messgeräten ist bereits eine entsprechende Temperaturkompensation vorgesehen, d. h. die Holztemperatur kann direkt am Messgerät eingestellt werden bzw. wird automatisch vom Messgerät erfasst und bei der Anzeige des Messwertes automatisch berücksichtigt [14].

Neben der Temperatur spielt auch die Holzart bei der Leitfähigkeitsmessung eine gewisse Rolle. Höherwertige Messgeräte besitzen deshalb einen Holzartenwahlschalter, mit dem verschiedene Holzarten eingestellt werden können. Die Zuordnung der Holzart kann dabei einer Tabelle (Herstellerangabe) entnommen werden. Durch eine solche Holzartenumschaltung wird je nach Holzart eine weitere automatische Messwertkorrektur und damit eine Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht [14].

### **3.2 Kapazitive Messung**

Bei der kapazitiven Messung (in Anlehnung an die Messung von Schnittholz nach DIN EN 13183-3 [16]) wird die Holzfeuchte mit elektromagnetischen Wellen zerstörungsfrei (ohne Messspitzen oder Rammelektrode) gemessen. Man spricht vom dielektrischen Messverfahren [12]. Durch dieses Messprinzip werden die speziellen dielektrischen Eigenschaften von Wasser ausgenutzt. Dessen Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_r = 78,2$ ) ist, verglichen mit Konstanten anderer Materialien wie Holz ( $\epsilon_r = 1,5 - 3,0$ ), sehr hoch. Trockenes Holz hat somit eine sehr niedrige, nasses Holz dagegen eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante. Wassergehaltsunterschiede im Holz werden durch Kapazitätsänderungen an einem Kondensator bestimmt. Sender und Empfänger (hier: die Kondensatorplatten) sind dabei derart ausgerichtet, dass sich ein elektrisches Feld im Probenmaterial ausbreiten kann. Die Messgrößen können durch Reflexion oder Transmission bestimmt werden und die Messelektronik wandelt die Messdaten in einen ablesbaren %-Wert (Brennstofffeuchte) um. Dabei muss sowohl die Rohdichte als auch die chemische Zusammensetzung des zu messenden Materials bekannt sein, um eine genaue Messung zu erhalten [13]. Der eigentliche Messvorgang gestaltet sich sehr einfach. Die Messung erfolgt, indem die Messsonde, entweder als Kondensatorplatte wie in Abbildung 4 (links) dargestellt, oder als Oberflächen-Federelektrode

wie in Abbildung 4 (rechts) dargestellt, plan auf das zu messende Material gedrückt wird, damit das hochfrequente elektrische Feld das Material durchdringen kann. Der Feuchtwert wird sofort angezeigt. Nach DIN EN 13183-3 [16] (Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz) liegen die Grenzen der Anwendbarkeit von diesem Verfahren bei einem Feuchtegehalt ( $u$ ) zwischen 7 und 30 % (d. h. Wassergehalt  $w = 7$  bis 23 %), was aber, wie bereits bei der Leitfähigkeitsmessung beschrieben, bei Brennholz kaum anwendbar ist, da die für die Anwendung interessante Grenze zwischen trockenem und noch nicht trockenem Holz bei einer Feuchte von ca. 25 % liegt (d. h.  $w = 20$  %).



Abbildung 4: Kapazitives Messgerät Fabrikat Wöhler, Typ HBF 410, mit Kondensatorplattenoberfläche (links) und kapazitives Messgerät Fabrikat Doser, Typ DM 4 A, mit Oberflächen-Federelektroden (rechts)

Die nach dem dielektrischen Messverfahren arbeitenden Geräte besitzen einen Korrekturschalter für die Einstellung der Rohdichte. Diese sind in mehrere Skalen unterteilt, denen die verschiedenen Holzarten nach ihrer mittleren Rohdichte zugeteilt sind. Die Tiefenwirkung des elektrischen Feldes verläuft von der Außenzone in Richtung Holzmitte nicht linear, sondern nimmt logarithmisch ab. Dadurch gehen tiefere, feuchte Schichten nur zu einem Bruchteil in die Messung ein. Bei vollkommen homogener Feuchteverteilung im Holz ist das Dielektrizitätskonstanten-Messverfahren mit guter Messgenauigkeit anwendbar, da die das Messergebnis entscheidend beeinflussende Außenzone in ihrem Feuchtigkeitsgehalt der Kernzone entspricht. Andererseits ist bei der Messung von z. B. 100 Millimeter dicken Holzscheiten mit höherer Kernfeuchte zu berücksichtigen, dass das Messergebnis teilweise von der höheren Feuchtigkeit der Holzmitte beeinflusst wird, d. h. es wird ein Mischwert zur Anzeige gebracht, der sich primär aus der Feuchtigkeit der äußeren Holzonen bildet. Höhere Feuchtigkeitswerte in der Holzmitte werden jedoch nur teilweise berücksichtigt [14].

Auch die Art der Oberfläche kann das Messergebnis beeinflussen, da bei einer rauen oder – wie bei Holzscheiten üblich – unebenen Oberfläche unvermeidbare Luftzwischenräume unter den Messelektroden (Kondensatorplatten) entstehen, die eine genaue Feuchtigkeitsmessung verhindern. Eine Aussage über eventuell starke Feuchtigkeitsunterschiede zwischen Kern und Außenzone ist bei Verwendung von dielektrischen Messgeräten nicht möglich [14].

### 3.3 Mikrowellen-Messverfahren

Das Mikrowellen-Messverfahren ist ein besonders vielseitiges Messverfahren. Es basiert auf der Anwendung elektromagnetischer Wellen. Die erzeugte elektromagnetische Strahlung wird von der Probe entweder absorbiert oder reflektiert, wobei unter anderem Abhängigkeiten zum Wassergehalt bestehen. Im Ergebnis verändern sich Leitungs- und Ausbreitungsgrößen der Wellen, welche anhand von Transmissions- oder Reflexionsfaktoren gemessen werden. Infolge der hohen Wellenfrequenz (0,3 – 20 GHz) wird der Einfluss anderer elektrisch leitfähiger Bestandteile (v. a. Salze) minimiert [13]. Da die angebotenen Geräte, die dieses relativ kostenintensive Messprinzip anwenden, bislang nicht zur Schnellbestimmung der Scheitholzfeuchte vorgesehen sind, blieb dieses Messprinzip in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt.

### 3.4 Infrarotmessverfahren, chemisches Messverfahren, Neutronenstreuverfahren

Wie das Mikrowellen-Messverfahren ist auch das Infrarot-Reflektometrische(IR)-Messverfahren ein sehr vielseitiges Messverfahren, mit dem neben der Feuchte auch Fette und Proteine in einer Vielzahl von Schüttgütern gemessen werden können. Die aus den optischen Verfahren für die Versuche ausgewählte infrarot-reflektometrische Methode nutzt den Effekt, dass die Probe beim Auftreffen von Licht elektromagnetische Energie absorbiert. Für Messzwecke muss dieses Licht aus einzelnen, klar definierten Wellenlängen bestehen (monochromatisches Licht). Dabei gibt es zwei Arten von Strahlen: Mess- und Referenzstrahlen mit jeweils unterschiedlichen Wellenlängen. Als Messstrahlen werden Wellenlängen bevorzugt, bei denen freies Wasser ein Absorptionsmaximum (z. B. bei 1 450 oder 1 940 nm) besitzt. Als Referenzstrahlen werden dagegen Wellenlängen benutzt, welche vom Wasser oder anderen Probenbestandteilen kaum aufgenommen werden. Anhand der Energiegehalte der zwei reflektierten Strahlen errechnet das Messinstrument einen Quotienten, wodurch wechselnde Einflussfaktoren auf die Messbedingungen eliminiert oder zumindest reduziert werden können (wie z. B. Entfernung der Probe zur Lichtquelle, Trübungen im Strahlengang oder Farbveränderungen der Probe). [37]. Da auch hier die angebotenen Geräte, die dieses relativ kostenintensive Messprinzip anwenden, bislang nicht zur Schnellbestimmung der Scheitholzfeuchte vorgesehen sind, blieb dieses Messprinzip in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt.

## 4 Vorgehen und Methodik

### 4.1 Auswahl der im Versuch verwendeten Messgeräte

Bei der Vielfalt der angebotenen Messgeräte zur Schnellbestimmung der Holzfeuchte ist die Auswahl eines für die jeweiligen Anforderungen geeigneten Produktes schwierig. Auch bei den Anschaffungskosten ist die Bandbreite groß. Einfache, preiswerte Geräte sind schon ab etwa 10 € erhältlich, während die sogenannten Präzisionsmessgeräte bei 800 € liegen. Neben den Kosten unterscheiden sich die Geräte auch im vorgesehenen Einsatzfeld sowie im zulässigen Messbereich. Der maximal mögliche zu messende Wassergehalt schwankt je – nach Hersteller und Produkt – zwischen 23 und 60 %, wobei der Messbereich der meisten angebotenen Geräte bis zu einem Wassergehalt von 30 bis 40 % reicht. Darüber hinaus ist es für den Endnutzer im Vorfeld meist nicht abschätzbar, mit welcher Genauigkeit die angebotenen Geräte beim jeweiligen Brennstoff-Wassergehalt messen und wie sie zu bedienen sind, bzw. ob sie überhaupt für die ihnen zugedachte Messaufgabe geeignet sind. Die durchgeführte Untersuchung ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt einer Entscheidungshilfe bei der Geräteanschaffung in der Praxis zu verstehen. Hierbei wurden sowohl Geräte nach dem Prinzip der elektrischen Widerstandsmessung auch nach dem dielektrischen Messprinzip einbezogen, wobei auch sehr einfache Messgeräte mit untersucht wurden.

Zur Identifikation geeigneter Messverfahren und Geräte wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Hierzu wurden insgesamt 13 Unternehmen ausgewählt und kontaktiert. Ihre Aktivität im Bereich der Wassergehaltsbestimmung wurde durch Internetrecherchen, Informationen des Landesinnungsverbandes des bayerischen Schornsteinfegerhandwerks oder Produktunterlagen bekannt. Dank der Kooperationsbereitschaft aller Firmen wurden für die Erprobung insgesamt 19 verschiedene Messgeräte von 13 Herstellern zur Verfügung gestellt. Da 2 Messgeräte laut Herstellerangabe bei der Messung von Scheitholz in zwei verschiedenen Betriebsarten eingesetzt werden konnten, erhöhte sich die Anzahl der Anwendungen auf insgesamt 21, d. h. die unterschiedlichen Betriebsarten dieser 2 Geräte werden im Folgenden wie eigenständige Messgeräte behandelt. Die Herstellerfirmen leisteten bei der Versuchsplanung auch beratende Unterstützung. Tabelle 1 zeigt die im Projekt verwendeten Messgeräte, eingesetzte Messprinzipien, Messbereiche der Geräte sowie deren Preise gemäß Herstellerangabe. Eine Gesamtübersicht aller Adressen und Kontaktmöglichkeiten der Messgerätehersteller findet sich im Anhang (Tabelle 13). Einige der Schnellbestimmungssysteme waren sofort einsetzbar, während andere erst auf die jeweiligen Brennstoffe und Temperaturen eingestellt werden mussten.

Tabelle 1: Gesamtübersicht der im Projekt untersuchten Feuchte-Messgeräte zur Schnellbestimmung der Brennstoff-Feuchte  $u$  bzw. des Wassergehaltes  $w$

Fabrikat	Typ	Messverfahren	Anzeige- parameter	Mess- bereich $w$	Preis (inkl. MwSt.)
BES Bollmann	EASY <i>comfort</i>	Widerstandsmessung (2 Betriebsarten)	$u^\circ$	5 – 32 %	189 €
Doser	LWM 2	Widerstandsmessung	$u^\circ$	5 – 23 %	307 €
	DM 4A	Dielektrische Messung	$u^{(\circ)}$	0 – 50 %	486 €
Fuva	S 06	Widerstandsmessung	$u$	6 – 50 %	96 €
Gann	Hydromette Compact S	Widerstandsmessung	$u^\circ$	9 – 33 %	137 €
	HT 65 mit M18	Widerstandsmessung	$u^{(\circ)}$	4 – 38 %	518 €
Greisinger	GMR 100	Widerstandsmessung	$w$ bzw. $u$	0 – 50 %	118 €
	GMH 3830 mit GHE 91	Widerstandsmessung	$w$ bzw. $u$	5 – 46 %	352 €
HEDÜ	2 in 1 (Kombigerät)	Widerstandsmessung	$u^\circ$	0 – 44 %	237 €
		Dielektrische Messung	$u^\circ$		
Lignomat	mini X	Widerstandsmessung	$u^\circ$	6 – 43 %	180 €
	maxiLigno mit E12	Widerstandsmessung	$u^\circ$	6 – 43 %	356 €
PCE	PCE-333	Widerstandsmessung	$u^\circ$	6 – 31 %	46 €
	FME mit NF 4-17	Widerstandsmessung	$u^\circ$	5 – 50 %	653 €
Schaller*	humimeter BLW	Widerstandsmessung	$w^{(\circ)}$	10 – 60 %	790 €
Testo*	testo 606-1	Widerstandsmessung	$w^\circ$	8 – 48 %	99 €
TROTEC	T 60	Widerstandsmessung	$u^\circ$	6 – 31 %	46 €
	T 500	Widerstandsmessung	$u^\circ$	5 – 33 %	155 €
Wetekom	MD-018	Widerstandsmessung	$u^\circ$	0 – 38 %	10 €
Wöhler	HBF 410 (Kombigerät)	Widerstandsmessung	$u^{(\circ)}$	0 – 44 %	117 €

\* Bei den Anzeigewerten dieser Geräte handelt es sich entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht um die „Brennstoff-Feuchte“ sondern um den „Wassergehalt“ (Herstellerrückfrage) (vgl. Kap. 2.1).

$^\circ$  Der Unterschied Wassergehalt ( $w$ ) zu Brennstoff-Feuchte ( $u$ ) ist in der Bedienungsanleitung nicht definiert.

$(\circ)$  Der Bezugswert der Brennstoff-Feuchte ( $u$ ) ist in der Bedienungsanleitung zwar definiert, der Unterschied zum Wassergehalt ( $w$ ) wird jedoch nicht erklärt.

## 4.2 Auswahl der Versuchsbrennstoffe

Die Geräte wurden an 12 Holzscheiten, vier Buchen-, drei Birken- und fünf Fichtenscheiten erprobt, wobei jeweils im Originalscheit und im frisch gespaltenen Scheit gemessen wurde. Die Scheite wurden jeweils für die drei Wassergehaltsstufen lufttrocken, angetrocknet und erntefrisch ausgewählt und lagen mit einem Wassergehalt von 11 %, 26 %, 30 % sowie 44 % (Buchscheite), 11 %, 21 %, 26 %, 41 % sowie 58 % (Fichtenscheite) und 19 %, 24 % und 43 % (Birkenscheite) vor. Die verwendeten Holzscheite waren zwischen 30 und 34 cm lang und der mittlere Umfang lag bei 32,3 cm im Originalscheit und bei 25,3 cm im frisch gespaltenen Scheit. Die oben genannten Wassergehaltsabstufungen der eingesetzten Brennstoffe wurden bei der Auswertung den in Tabelle 2 dargestellten Wassergehaltsklassen zugeordnet.

Tabelle 2: Wassergehalte und Scheitanzahl der verwendeten Probenhölzer

Holzart	Anzahl Scheite	Wassergehalt		
		lufttrocken w < 20 %	angetrocknet w = 20 – 30 %	feucht w > 30 %
Buche	1	X		
Buche	2		X	
Buche	1			X
Birke	1	X		
Birke	1		X	
Birke	1			X
Fichte	1	X		
Fichte	2		X	
Fichte	2			X

### 4.3 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Die Feuchtebestimmung erfolgte bei den Fichten- und Buchenscheiten mit allen 21 im Projekt getesteten Geräten am gleichen Holzscheid, wobei zunächst am Originalscheid und anschließend am frisch gespaltenen Holzscheid gemessen wurde. Der Einsatz der Messgeräte geschah immer in der gleichen Reihenfolge, zuerst die zerstörungsfrei arbeitenden Messgeräte (d. h. ohne Einstiche), dann die Messgeräte mit kleinen Messnadeln (geringe Materialzerstörung) und zum Schluss die Messgeräte mit Einschlagelektroden (größere Materialzerstörung). Die Messungen konnten somit an nahezu identischem Probenmaterial durchgeführt werden. Analog zur Vorgehensweise bei den Buchen- und Fichtenscheiten wurden auch die Birkenscheite gemessen, allerdings erfolgte hier die Messungen nur mit einem Messgerät (Fabrikat BES Bollmann); hier musste die Buche durch Birke ersetzt werden, da für Buche im Gerät keine Materialkennlinie hinterlegt war.

Das Holz lag in insgesamt drei bis fünf Wassergehaltsstufen vor, außerdem wurden fünf verschiedene Messvarianten (d. h. Messpunkte am Scheit) erprobt und jede Messung wurde noch einmal wiederholt, so dass sich hieraus eine Gesamtanzahl von 3.120 Messungen (ohne Referenzmessungen im Trockenschrank) ergibt. In Tabelle 3 sind die durchgeführten Versuche zusammengefasst.

Alle durchgeführten Messungen wurden zuerst an den Originalscheiten vorgenommen und dann in gleichbleibender Abfolge an frisch gespaltenen Holzscheiten durchgeführt. Hierzu wurden die Holzscheite nach Abschluss der ersten Messreihe gespalten, die frisch gespalte Fläche wurde markiert und dann wurde die komplette Messreihe an den jetzt frisch gespaltenen Scheiten wiederholt. Unmittelbar nach Durchführung aller Schnellbestimmungsmessungen wurde der Wassergehalt mit einer Referenzmethode (Trockenschrankmethode nach CEN/TS 14774-1 [7]) bestimmt.

Tabelle 3: *Versuchsplan und Anzahl Messungen pro Variante der jeweiligen Versuchsfrage*

Versuchsfrage	Hauptvarianten/Bezeichnung	Anzahl Messungen (inkl. Wdhg.)
Vergleich Messgeräte	BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadelmodus	192
	BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontaktmodus	192
	- Doser LWM 2	144
	- Doser DM 4A	144
	- Fuva S 06	144
	Gann Hydromette Compact S	144
	Gann Hydromette HT 65 mit Elektrode M18	144
	Greisinger GMR 100	144
	Greisinger GMH 3830 mit Elektrode GHE 91	144
	HEDÜ2 in 1 im Nadelmodus	144
	HEDÜ2 in 1 im Suchermodus	144
	Lignomat mini X	144
	Lignomat maxiLigno mit Elektrode E12	144
	PCE PCE-333	144
	PCE FME mit Fühler NF 4-17	144
	Schaller humimeter BLW	144
	Testo testo 606-1	144
	TROTEC T 60	144
	TROTEC T 500	144
	Wetekom MD-018	144
Wöhler HBF 410 im Nadelmodus	144	
Trockenschrank (Referenzverfahren)	12	
Holzart	Buche	1344
	Fichte	1680
	Birke	96
Wassergehalt	lufttrocken, w < 20 %	704
	angetrocknet, w = 20 – 30 %	1376
	feucht, w > 30 %	1040
Lage Messpunkt	Stirnseite vorne	390
	Stirnseite hinten	390
	Längsseite, 1/4 der Scheitlänge	780
	Längsseite, Scheitmitte	780
	Längsseite, 3/4 der Scheitlänge	780
Holzvorbereitung	Originalscheit	1950
	Scheit frisch gespalten	1170



#### 4.4 Wiederholungen/Messpositionen

An jedem Scheit wurden Messungen an fünf verschiedenen Punkten durchgeführt, wobei der Anzeigewert an jedem Messpunkt nochmalig durch eine zweite Messung, die direkt neben der ersten Messung erfolgte, überprüft wurde. Aus diesen beiden Messungen wurde anschließend der Mittelwert gebildet. In Abbildung 5 ist die Lage der gewählten Messpunkte am Holzscheid schematisch dargestellt. Es wurden sowohl beide Stirnseiten als auch drei Messpunkte über die Scheitlänge (Seite ohne Rinde) verteilt gemessen, wobei diese bei einem Viertel der Scheitlänge, in der Scheitmitte sowie bei drei Viertel der Scheitlänge lagen. Alle Messungen (inkl. der Wiederholungsmessungen) wurden sowohl an den Originalscheiden als auch an frisch gespaltenen Holzscheidflächen vorgenommen.

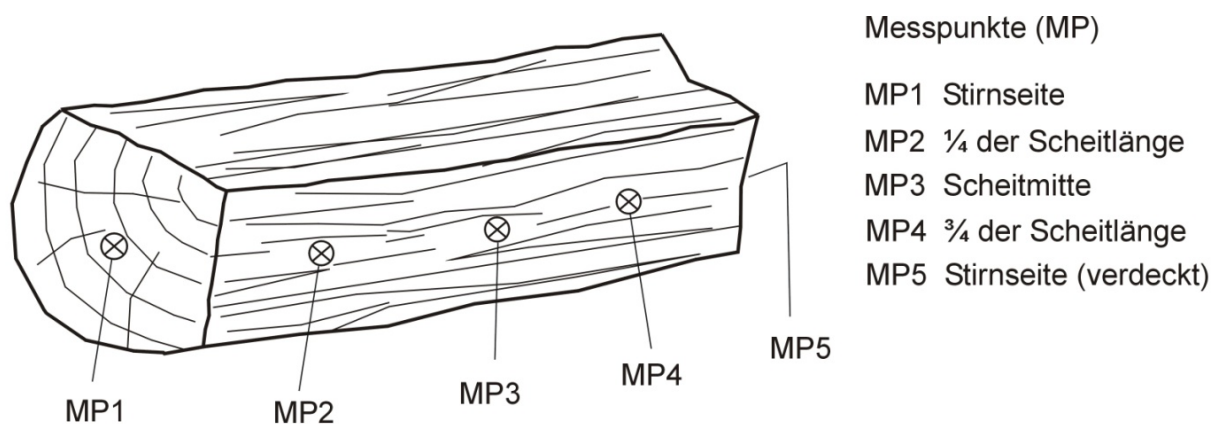


Abbildung 5: Gewählte Messpunkte für die Wassergehaltsbestimmung von Scheitholz

#### 4.5 Vorversuche

Um Fehlergrößen und Störeinflüsse quantitativ abschätzen zu können, wurde eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt. Insbesondere die Möglichkeit der fortschreitenden Holz Trocknung zwischen den einzelnen Messungen (vor allem bei frischem Holz) wurde untersucht. Außerdem musste die Dauer der Trockenschranktrocknung für eine sichere Bestimmung des Referenzwassergehaltes ermittelt werden. Hinzu kommt, dass für die Schnellbestimmungsgeräte ein Temperatureinfluss bekannt ist, dessen Auswirkungen hier quantifiziert werden sollten. Nachfolgend werden die hierzu durchgeführten Vorversuche und deren Ergebnisse dargestellt.

##### 4.5.1 Abtrocknung während der Messung

Aufgrund der großen Anzahl der im Projekt verglichenen Feuchtemessgeräte war ein nahezu zeitgleicher Einsatz an ein und demselben Scheit nicht möglich. Stattdessen war ein Zeitaufwand von bis zu 2 Stunden für die Durchführung einer vollständigen Messreihe an einem einzigen Scheit (mit allen 21 Schnellbestimmungs-Geräten) zu veranschlagen. In einem Vorversuch wurde daher untersucht, ob und in welchem Maß die ggf. fortschreitende Abtrocknung der Probe in der Zeitspanne, in der die Messgeräte hintereinander eingesetzt wurden, das Messergebnis beeinflussen kann.

Als Ausgangsmaterial für die Überprüfung wurden vier unterschiedliche Scheite, jeweils ein Buchen- und ein Fichtenscheite mit jeweils zwei unterschiedlichen Wassergehalten ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Scheite aus der gleichen Charge genommen wurden, die auch zur Bestimmung der Brennstofffeuchte mit den Schnellbestimmungsgeräten verwendet werden sollte. Im Vorversuch wurde wie folgt vorgegangen.

Die Holzscheite wurden in flache Aluminiumschalen gelegt und sofort gewogen. Diese Proben wurden dann im gleichen Raum, in der auch die Feuchtemessungen durchgeführt worden sind, unter weitgehend identischen Umgebungsbedingungen (21 °C, rel. Luftfeuchte 31,5 %) gelagert. Da die maximale Versuchsdauer einer Messreihe bekannt war, wurden die Holzscheite im Abstand von 15 Minuten insgesamt über zwei Stunden wiederholt gewogen und der Gewichtsverlust protokolliert. Anschließend wurde der tatsächliche Wassergehalt der Scheite im Trockenschrank bei 105 °C bestimmt. Dabei zeigte sich, dass der tatsächliche Wassergehalt der beiden untersuchten Fichtenholzscheite bei 12 bzw. 19 % und der beiden untersuchten Buchenholzscheite bei 11 bzw. 28 % lag.

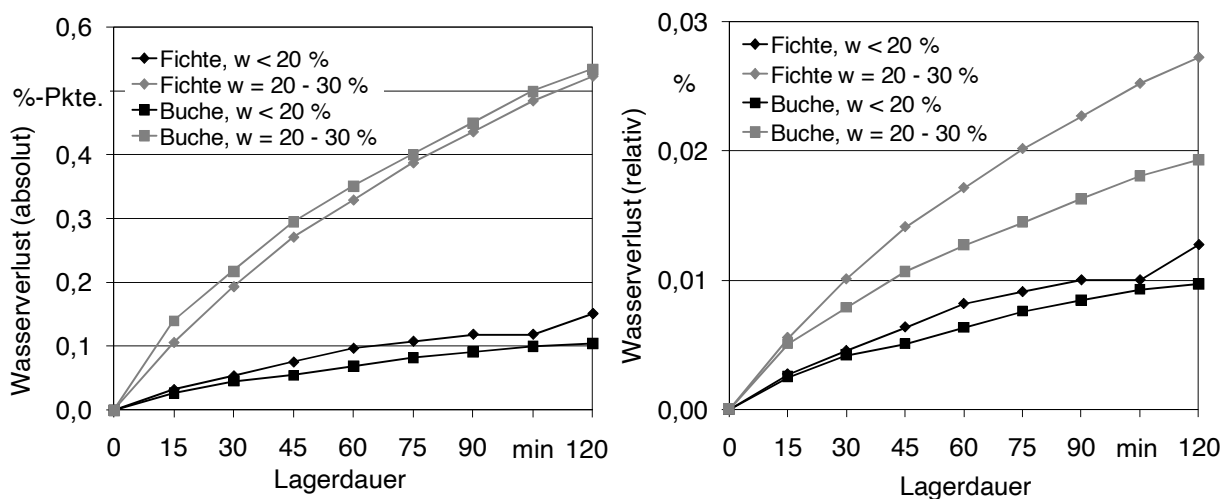


Abbildung 6: Wasserverlust unterschiedlicher Holzscheite über eine Messdauer von zwei Stunden bezogen auf das Gesamtgewicht der Scheite (links) bzw. auf den Wasseranteil der Scheite (rechts)

Bei feuchterem Holz war der Wasserverlust über den Betrachtungszeitraum höher als bei trockenem Holz. Allerdings war der Trocknungseffekt insgesamt sehr gering. Der absolute Wasserverlust innerhalb von zwei Stunden Versuchsdauer lag bei trockenem Holz bei 0,11 %-Punkten (Buche) bzw. bei 0,15 %-Punkten (Fichte) und bei angetrocknetem Holz bei 0,53 (Buche) bzw. 0,52 %-Punkten (Fichte) (Abbildung 6, links). Bezieht man den Wasserverlust während der Lagerdauer von zwei Stunden auf den Referenzwassergehalt, so beträgt dieser bei trockenem Buchen- und auch Fichtenholz 0,01 %, während er bei angetrocknetem Holz bei 0,02 % (Buche) bzw. 0,03 % (Fichte) liegt. Aufgrund der ermittelten Daten ist die Schlussfolgerung zu treffen, dass die (relativ kurze) Messdauer der Holzscheite während der Versuchsdurchführung nicht zu einem wesentli-

chen Fehler bei der Wassergehaltsbestimmung führt. Die Durchführung von Korrekturrechnungen konnte daher bei der Auswertung unterbleiben.

Zur weiteren Fehlerabschätzung durch Abtrocknung auch bei frisch gespaltenen Scheiten wurde ein zusätzlicher Vorversuch mit einem frisch gespaltenen, waldfrischen Fichtenscheit durchgeführt. Eine Hälfte des gespaltenen Scheits wurde in einen luftdichten Kunststoffbeutel verpackt. Durch anschließende Prüfung des Gewichtsverlaufs sollte ausgeschlossen werden, dass die Scheithälfte, die gerade nicht bei Versuchsdurchführung verwendet wurde, weitertrocknet. Die über eine Zeitdauer von zwei Stunden alle 15 Minuten durchgeführte Zwischenwiegung der verpackten Scheithälfte zeigt, dass es in diesem Fall zu keinerlei Gewichtsabnahme kommt. Als Verdunstungsschutz wurde daher die jeweils „zweite Hälfte“ des frisch gespaltenen Scheits bis zur eigentlichen Messdurchführung im luftdichten Kunststoffbeutel gelagert, bevor sie dann nach den Messungen im Trockenschrank gemeinsam mit der „ersten Hälfte“ darrgetrocknet wurde.

#### **4.5.2 Erforderliche Trocknungsdauer (Trockenschrank)**

Bei der hier vorliegenden Versuchsfrage kam es auf eine möglichst genaue und zuverlässige Bestimmung der Anfangs- und Endwassergehalte der untersuchten Holzscheite an. Daher musste zunächst die bei Holzscheiten erforderliche Mindesttrocknungsdauer ermittelt werden.

In einem entsprechenden Vorversuch wurden jeweils zwei frische Buchen- und Fichtenholzscheite verwendet und gemäß den Anforderungen nach CEN/TS 14780 [9] mit der Axt auf eine Dicke von höchstens 30 Millimeter zerkleinert. Die zerkleinerten Holzscheite wurden gemäß CEN/TS 14774-1 [7] auf flachen Aluminiumschalen bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet, wobei die Proben in regelmäßigen Zeitabständen gewogen wurden. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen, dass alle Proben über ca. 40 Stunden im Trockenschrank bei 105 °C verweilen müssen, bis keine Gewichtsveränderung mehr eintritt und die Proben somit als absolut trocken gelten konnten. Als Konsequenz dieser Erkenntnis wurde die Trocknungszeit für sämtliche Proben auf 48 Stunden festgelegt.

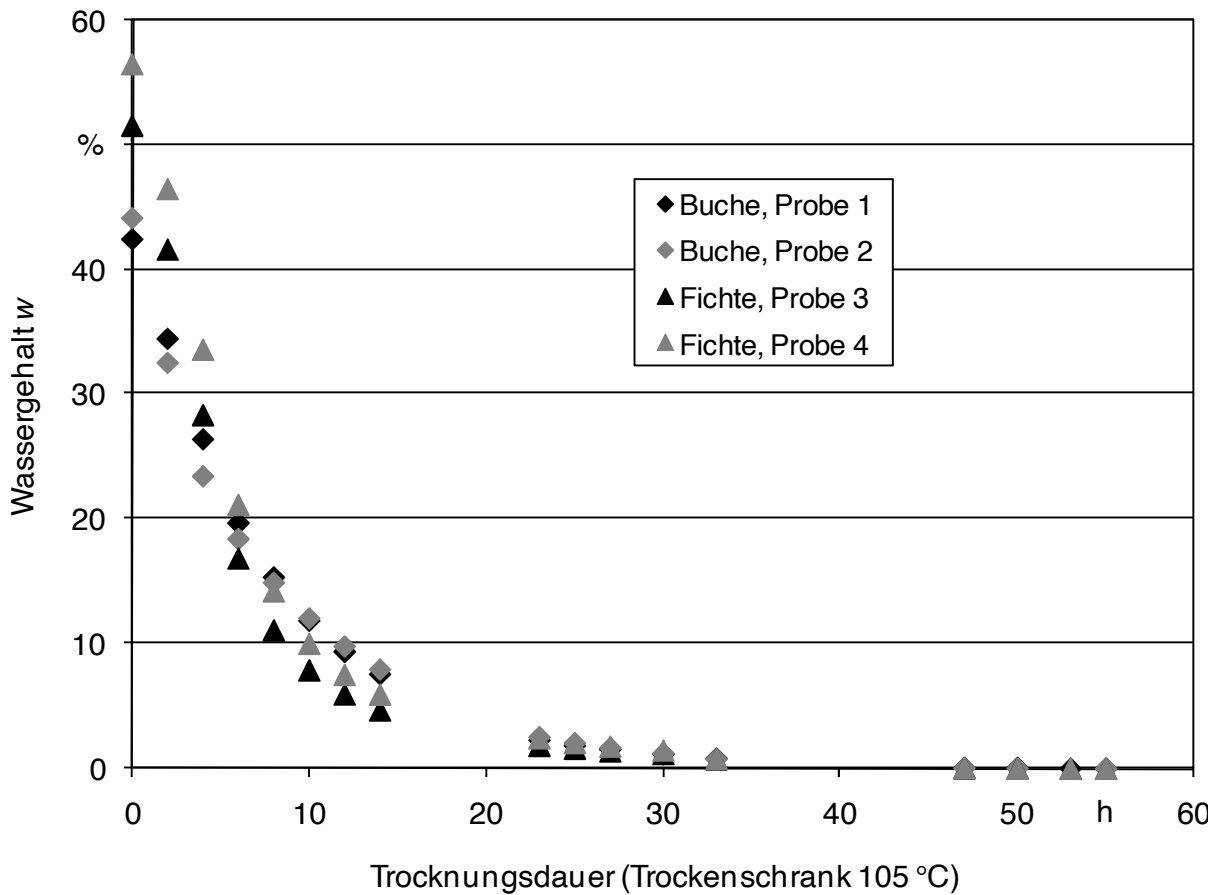


Abbildung 7: Verlauf des Wassergehaltes von zwei Buchen- und zwei Fichtenholzproben (zerkleinert auf maximal 30 mm Spanstärke) im Trockenschrank bei 105 °C

#### 4.5.3 Temperatureinfluss

Da im Projekt sowohl einfache Feuchtemessgeräte verwendet werden sollten, die im allgemeinen für die Messung bei einer Holztemperatur von 20 °C kalibriert sind, als auch aufwändigere Feuchtemessgeräte, bei denen eine entsprechende automatische oder per Hand einstellbare Temperaturkompensation vorgesehen ist, wurde in einem Vorversuch untersucht, inwieweit die Temperatur in der zu messenden Probe das Messergebnis beeinflussen kann.

Als Ausgangsmaterial für die Überprüfung wurden vier unterschiedliche Scheithölzer verwendet, ein Buchen- und ein Fichtenscheit mit jeweils einem geringen ( $w < 20\%$ ) und einem mittleren ( $w = 20$  bis  $30\%$ ) Wassergehalt. Die Holzscheite wurden auch für diesen Versuch aus der gleichen Charge genommen, die auch zur Bestimmung der Brennstofffeuchte mit den Schnellbestimmungsgeräten verwendet werden sollte. Im Vorversuch wurde wie folgt vorgegangen.

Die Holzscheite wurden jeweils in einen luftdichten Kunststoffbeutel verpackt und über zwei Tage in dem gleichen 20 °C warmen Raum gelagert, in dem später auch die Feuchtemessgeräte untersucht werden sollten. Zusammen mit den verpackten Holzscheiten wurden auch drei willkürlich ausgewählte Feuchtemessgeräte, Fabrikat PCE (PCE-333), Fabrikat Wöhler (HBF 410) und Fabrikat Gann (Hydromette HT 65), gelagert, um auch deren Betriebstemperatur anzupassen. Anschließend wurden die Holzscheite aus den Kunststoffbeuteln entnommen und eine Feuchte-

Schnellbestimmung wurde mit allen drei Geräten durchgeführt, wobei jeweils zweimal in der Scheitmitte gemessen und das Messergebnis gemittelt wurde. Nach Abschluss dieser Messungen wurden die Scheite frisch gespalten, die frisch gespaltenen Flächen markiert und die Messreihe an der frisch gespaltenen Fläche mit gleicher Vorgehensweise wiederholt.

Die jetzt gespaltenen Holzscheite wurden anschließend wieder luftdicht in Kunststoffbeutel verpackt und gemeinsam mit den Messgeräten über zwei Tage in einen Kühlraum (Lufttemperatur 5 °C) gelagert. Anschließend wurden die oben beschriebenen Messungen im Kühlraum erneut durchgeführt, wobei die Brennstofffeuchte mit den drei Messgeräten jeweils an einer „Originalscheitfläche“ und an einer frisch gespaltenen Fläche gemessen wurde.

Anschließend wurde der tatsächliche Wassergehalt der Scheite im Trockenschrank bei 105 °C bestimmt. Dabei stellte sich heraus, dass der tatsächliche Wassergehalt der beiden untersuchten Fichtenholzscheite bei 12 bzw. 25 % und der beiden untersuchten Buchenholzscheite bei 11 bzw. 31 % lag. Der für diese Untersuchung gewünschte „Sollwassergehalt“ war damit gut erreicht.

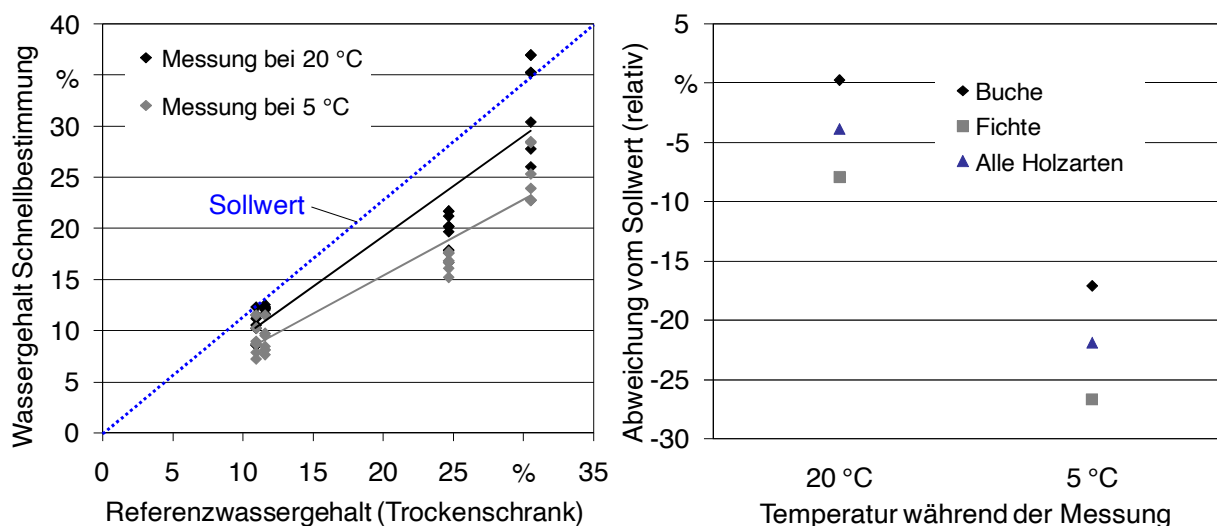


Abbildung 8: Änderung der Messgenauigkeit von drei im Vorversuch verwendeten Feuchte-Schnellbestimmungsgeräten, Fabrikat PCE, PCE-333, Fabrikat Gann, Hydromette HT 65, Fabrikat Wöhler, HBF 410 (Nadelmodus), in Abhängigkeit der Temperatur (d. h. Holz-, Messgeräte- und Umgebungstemperatur)

Bei der Bestimmung des Einflusses der Temperatur auf die Messgenauigkeit konnten die Herstellerangaben bestätigt werden, wonach eine Messung bei einer Holztemperatur von 20 °C (vor allem bei den einfachen Messgeräten) ein genaueres Ergebnis liefert. Die über alle Holzarten, Feuchtestufen und Messgeräte gemittelte relative Abweichung vom Referenzwassergehalt betrug bei Temperaturen von 20 °C -4 % und bei Temperaturen von 5 °C -22 %. Dabei war jedoch auffallend, dass Buchenscheite mit relativen Abweichungen von 0 % bei 20 °C und -17 % bei 5 °C deutlich genauere Werte lieferten, als Fichtenscheitholz mit Abweichungen von -8 % bzw. -27 %. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurden die vergleichenden Untersuchungen der Feuchtemessgeräte bei konstanten Temperaturen von 20 °C durchgeführt.

#### 4.6 Versuchsdurchführung

Alle 21 verschiedenen Messgeräte wurden gemeinsam mit den 12 zu messenden Holzscheiten über die gesamte Versuchsdauer bei einer konstanten Temperatur von 20 °C gelagert. Dabei waren die Holzscheite in luftdichte Kunststoffbeutel verpackt. Umgehend bei Messbeginn wurde das jeweils zu messende Holzschicht aus der Verpackung entnommen und auf einen Tisch gelegt, um die Messreihe am unveränderten Holzschicht durchzuführen. Dabei wurden die Messgeräten immer in der gleichen Reihenfolge eingesetzt, zuerst die zerstörungsfrei arbeitenden Messgeräte, dann die Messgeräte mit kleinen Messnadeln (geringe Materialzerstörung) und zum Schluss erst die Messgeräte mit Einschlagelektroden (Rammelektroden, größere Materialzerstörung). Durch die geringe zerstörerische Wirkung der als erstes verwendeten Messgeräte konnten die Messungen an nahezu identischem Probenmaterial durchgeführt werden. Die Reihenfolge, in der die Messgeräte eingesetzt wurden, ist in Tabelle 4 dargestellt.

*Tabelle 4: Reihenfolge, in der die Feuchte-Schnellbestimmungsgeräte am jeweiligen Holzschicht eingesetzt wurden*

Reihenfolge:	Fabrikat:	Typ:	Messverfahren:
1	HEDÜ	2 in 1	Dielektrisch
2	BES Bollmann	EASY <i>comfort</i>	Widerstand (Kontaktkappe)
3	Doser	DM 4A	Dielektrisch
4	Wetekom	MD-018	Widerstand (Einstech-Elektrode)
5	Lignomat	mini X	Widerstand (Einstech-Elektrode)
6	TROTEC	T 60	Widerstand (Einstech-Elektrode)
7	PCE	PCE-333	Widerstand (Einstech-Elektrode)
8	Testo	testo 606-1	Widerstand (Einstech-Elektrode)
9	Fuva	S 06	Widerstand (Einstech-Elektrode)
10	TROTEC	T 500	Widerstand (Einstech-Elektrode)
11	Gann	Hydromette Compact S	Widerstand (Einstech-Elektrode)
12	Wöhler	HBF 410	Widerstand (Einstech-Elektrode)
13	Doser	LWM 2	Widerstand (Einstech-Elektrode)
14	HEDÜ	2 in 1	Widerstand (Einstech-Elektrode)
15	BES Bollmann	EASY <i>comfort</i>	Widerstand (Einstech-Elektrode)
16	Greisinger	GMR 100	Widerstand (Einstech-Elektrode)
17	PCE	FME mit NF 4-17	Widerstand (Nadelfühler)
18	Schaller	humimeter BLW	Widerstand (Ramm-Elektrode)
19	Lignomat	maxiLigno mit E12	Widerstand (Ramm-Elektrode)
20	Greisinger	GMH 3830 mit GHE 91	Widerstand (Ramm-Elektrode)
21	Gann	Hydromette HT 65 mit M18	Widerstand (Ramm-Elektrode)

Nachdem alle Messgeräte zum Einsatz kamen (Beispiel Abbildung 9, links), wurde das gemessene Holzscheit mit einer Axt in der Mitte gespalten (Abbildung 9, rechts), und die Messreihe (je fünf Messpunkte pro Scheit, eine Wiederholungsmessung) wurde am nun frisch gespaltenen Holzscheit auf einer frisch gespaltenen Fläche wiederholt. Die zweite frisch gespaltene Hälfte des Probescheites wurde während dieser Messungen in einen luftdichten Kunststoffbeutel verpackt.



Abbildung 9: Feuchteschnellbestimmung am Beispiel eines Fichten-Holzschaites mit dem Messgerät BES Bollmann, Easy-comfort, Nadelmodus, (links) und Spalten des Holzschaites mit der Axt, (rechts)

Die Messungen wurden aufgrund der leichteren Handhabung an den weicheren Fichtenholzschaiten begonnen, wobei sämtliche Messungen quer zur Faserrichtung durchgeführt wurden (Verbindungsline der beiden Messfühler im rechten Winkel zur Faserrichtung). Die Zeitdauer für eine komplette Messreihe mit allen Geräten an einem Scheit betrug anfangs etwa zwei Stunden. Zwar konnte mit zunehmender Messroutine die benötigte Zeit für vorbereitende Maßnahmen (z. B. Funktionstests der Geräte, Umstellen der Holzart) verringert werden, jedoch war bei den später gemessenen Buchenschaiten ein wesentlich größerer Kraftaufwand erforderlich, wodurch mehr Zeit für den eigentlichen Messvorgang benötigt wurde. Dadurch wich der benötigte Zeitaufwand der Messungen an je einem Scheit kaum von zwei Stunden ab. Sofort nach Abschluss der Messungen wurden die untersuchten Schaiten im Trockenschrank 48 Stunden bei 105 °C getrocknet.

Die Durchführung der Messungen stellte sich bei manchen Geräten als schwierig heraus. So sind die Messelektroden bei einigen Geräten mit Leitfähigkeitsmessung teilweise zu dick ausgeführt, so dass die Elektroden vor allem bei Hartholz nur mit erheblichem Kraftaufwand in das Holz eingestochen werden konnten. Bei anderen Geräten sind die Elektroden zu schwach bemessen, so dass sich diese bei der Messung verbogen (Abbildung 10, links) oder im Fall einer Ramm-Elektrode teilweise abbrechen. In einem Fall verklemmte sich der Gleithammer als Bestandteil der Ramm-Elektrode während der Messungen mehr und mehr, so dass ein Einschlagen der Elektroden nur mehr unter großen Anstrengungen möglich war. Auch wurde bei diesen Gerätetypen das Kabel zwischen Messgerät und Rammeelektrode generell als eher störend empfunden. Neben der Ausführung der Elektroden war auch die Form der Messgeräte beim Messvorgang von Bedeutung. So ließen sich die Elektroden eines Messgerätes mit ergonomisch geformten, abgerundeten

Kanten wesentlich leichter in das zu messende Holzscheit drücken, als bei einem kantigen Gerät. Bei den Geräten, die nach dem dielektrischen Messprinzip arbeiten, erwies es sich als Problem, dass die für die kapazitive Messung mittels elektrischer Wellen erforderliche glatte Auflagefläche für die Kondensatorplatten am Probenscheit weder in Längsrichtung noch quer zur Faser gegeben war (Abbildung 10, rechts), und eine ordnungsgemäße Messung somit nicht möglich war.



Abbildung 10: *Verbogene Messstifte (Nadeln) am Beispiel Fabrikat Doser, LWM 2, (links) sowie unebene Auflagefläche an einem Holzscheit (hier Fabrikat HEDÜ, 2 in 1, Kontaktmodus), (rechts)*

Neben den Problemen an der „Hardware“ der Feuchtemessgeräte stellte sich bei manchen Anbietern auch die Ablesung des Messwertes als sehr schwierig heraus. Vor allem im feuchten Holz, welches zwar teilweise außerhalb des vom Hersteller zulässigen Messbereichs lag, veränderte sich der Anzeigewert oft so rasch (abwärts), dass eine reproduzierbare Ablesung kaum möglich war. Entsprechend der Herstellerangaben wurde versucht, den Messwert sofort abzulesen, nachdem der Anzeigewert (einigermaßen) konstant war, bzw. wurde versucht, die Zeitspanne vom Einstechen bis zum Ablesen so gut wie möglich konstant zu halten. Je trockener das gemessene Holz jedoch war, desto stabiler und besser ablesbar war der Anzeigewert.

#### 4.7 Referenzmessung (Trockenschrankmethode)

Wenn eine genaue Wassergehaltsbestimmung gefordert ist, wird in der Regel die Trockenschrankmethode gewählt. Sie dient bei vielen Verfahrensvergleichen als Referenzmethode und wird auch für die Anwendung an fester Biomasse in verschiedenen Normen beschrieben. Für die vorliegende Messreihe wurde die Wassergehaltsbestimmung nach CEN/TS 14774-1/[7] als Referenzmethode gewählt. Es wird dabei die Masse einer Probe vor und nach der Trocknung ermittelt und anschließend der Wassergehalt anhand von Gleichung (G-3) errechnet [7].

$$w = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5) + m_6}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (\text{G-3})$$



Dabei ist:

- w: Wassergehalt in Masse-Prozent;
- $m_1$ : Masse des leeren Trockenbleches, in Gramm;
- $m_2$ : Masse von Trockenblech und Probe vor dem Trocknen, in Gramm;
- $m_3$ : Masse von Trockenblech und Probe nach dem Trocknen, in Gramm;
- $m_4$ : Masse des Referenz-Trockenbleches vor dem Trocknen (Raumtemperatur); in Gramm;
- $m_5$ : Masse des Referenz-Trockenbleches nach dem Trocknen (heiß gewogen), in Gramm;
- $m_6$ : Masse des ggf. mit der Verpackung verbundenen Wassers, in Gramm.

Ein leeres sauberes Trockenblech ist auf 0,1 Gramm zu wägen (Masse  $m_1$ ), danach wird das Holz-scheit gemäß den Anforderungen nach CEN/TS 14780 [9] mit der Axt auf eine Dicke von höchstens 30 mm gespalten, auf das Blech gelegt und gleichmäßig verteilt (Abbildung 11, links). Anhand der Vorversuche war die erforderliche Trocknungsdauer festgestellt worden (Kapitel 4.5.2), so dass die Forderung nach 1 cm<sup>2</sup> Blechoberfläche je 1 g Probe nicht erfüllt werden musste. Ein identisches leeres sauberes Trockenblech (Referenz-Trockenblech) wird ebenfalls auf 0,1 Gramm gewogen (Masse  $m_4$ ). Das mit dem gespaltenen Holz-scheit beladene Trockenblech (Masse  $m_2$ ) ist gemeinsam mit dem Referenz-Trockenblech in den auf  $(105 \pm 2)$  °C eingestellten Ofen zu stellen (Abbildung 11, rechts). Da keine Wasserrückstände an den Innenflächen der luftdichten Kunststoffbeutel, in dem die Holz-scheite verpackt wurden, erkennbar waren, wurde auf eine Wägung der Beutel vor und nach dem Trocknen verzichtet, d. h. die Masse  $m_6$  ist gleich Null. Bei einer Temperatur von  $(105 \pm 2)$  °C ist die Trocknung im Trockenschrank beendet, sobald der Masseverlust innerhalb von 60 Minuten geringer ist als 0,2 % des Gesamtmasseverlustes (vgl. Vorversuch in Kapitel 4.5.2). Nach erfolgter Trocknung ist das beladene Trockenblech (Masse  $m_3$ ) und das Referenz-Trockenblech (Masse  $m_5$ ) noch im heißen Zustand innerhalb von 10 s bis 15 s erneut auf 0,1 g zu wägen. Zum Schutz vor unmittelbarem Kontakt mit dem heißen Trockenblech ist die Waagenplattform dabei mit wärmedämmendem Material zu versehen. Hierzu wurde eine Holzplatte verwendet (Abbildung 11, links).



Abbildung 11: Trockenblech mit Probe bei der Wägung im heißen Zustand, mit wärmedämmender Unterlage (links), sowie beladenes Trockenblech im Trockenschrank (rechts)

## 4.8 Auswertung

Zu jedem Schnellbestimmungsmesswert wurde die mittlere relative Abweichung vom Referenzwert berechnet, das heißt, dass die prozentuale Abweichung vom ebenfalls in Prozent angegebenen Wassergehaltswert bestimmt wurde. Dabei wurde das Vorzeichen der Abweichung zunächst mit berücksichtigt, um auch die Richtung der Abweichung zu erkennen. Außerdem wurde der Mittelwert der betragsmäßigen Abweichung (d. h. ohne Vorzeichen) errechnet, um auch einen statistischen Messwert über das Maß der „Ungenauigkeit“ zu erhalten. Dieser Wert wird im Folgenden als Streuung bezeichnet. Die weitere Vorgehensweise bei der Auswertung wird im Folgenden beschrieben.

**Holzart.** Bei einfachen Messgeräten, die keine Unterscheidung zwischen den Holzarten vornehmen, erfolgte auch die Auswertung ohne Holzarten-Differenzierung. Dies war jedoch der Fall, wenn es sich um ein aufwändigeres Messgerät handelte, welches für die jeweiligen Holzarten unterschiedliche Kennlinien anbietet (Holzartenschalter).

**Wassergehalt.** Für eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Messgeräte wurden Messungen im Wassergehaltsbereich bis 30 % verwendet. Das liegt daran, dass die verwendeten Messverfahren bekanntermaßen bei hohen Wassergehalten sehr ungenau sind und nur noch bedingt angewendet werden können (vgl. Kapitel 3.). Höhere Wassergehalte wurden lediglich in der für jedes Messgerät durchgeführten individuellen Auswertung betrachtet, sofern der vom Hersteller angegebene zulässige Wassergehaltsbereich nicht überschritten war.

**Lage Messpunkt.** Da von den Geräteherstellern zumeist keine detaillierten Angaben über die Soll-Lage der Messpunkte am Holzsplit gemacht worden waren, wurden die hierbei möglichen Varianten speziell untersucht. Die Messungen an den beiden Stirnseiten sowie an jeweils drei Messpunkten über die Splitlänge (vgl. Abbildung 5) wurden separat ausgewertet und mit dem Referenzwert (Trockenschrankmessung) verglichen.

**Splitvorbereitung.** Aufgrund der ungleichen Verteilung der Feuchte im Holzsplit wurde auch der Einfluss eventuell sinnvoller vorbereitender Maßnahmen der Holzsplitte vor einer Schnellbestimmung der Feuchte im Holzsplit untersucht. Hierbei war besonders der Einfluss des „frischen Spaltens“ auf die Genauigkeit des erzielbaren Messergebnisses interessant. Auch diese vergleichenden Messungen wurden separat ausgewertet und mit dem Referenzwert (Trockenschrankmessung) verglichen.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Einfluss der Holzart

Die in Kapitel 4 beschriebenen Messungen wurden differenziert für die Holzarten Buche und Fichte sowie für verschiedene Wassergehaltsbereiche ausgewertet, die Ergebnisse sind in Tabelle 5 (Buche) bzw. Tabelle 6 (Fichte) dargestellt.

Tabelle 5: *Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Buchenscheiten in verschiedenen Wassergehaltsbereichen*

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	Mittelwert <sup>b</sup>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-7,9	5,5	21,3	-1,2
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	-5,2	-13,8	-26,3	-9,5
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-15,5	0,3	-16,9	-7,6
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-11,6	-15,8	-29,5	-13,7
<i>Mittelwert</i>	-	-10,0	-6,0	-12,9	-8,0
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-7,3	-6,3	-28,7	-6,8
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-25,0	-32,5	-39,2	-28,7
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-0,3	-11,5	-29,4	-5,9
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-19,4	-25,0	-	-22,2
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-27,0	-46,6	-58,3	-36,8
Doser LWM 2	5 – 23 %	-24,4	-36,4 <sup>a</sup>	-45,4	-30,4
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	3,6	-16,9	-31,6	-6,7
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-14,1	-20,4	-21,0	-17,2
Trotec T 500	5 – 33 %	-16,4	-24,1	-37,8	-20,3
Fuva S 06	6 – 50 %	-12,0	-27,6	-25,7	-19,8
testo 606-1*	8 – 48 %	6,8	5,7	-10,2	6,2
PCE – 333	6 – 31 %	5,5	-17,3	-	-5,9
Trotec T 60	6 – 31 %	-0,8	-13,4	-	-7,1
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-99,3	-15,8	-21,5	-57,6
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-27,2	-38,1	-40,7	-32,7
<i>Mittelwert</i>	-	-17,2	-21,8	-32,5	-19,5
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-3,3	-1,5	-21,7	-2,4
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-33,1	-37,1	-61,7	-35,1
<i>Mittelwert</i>	-	-8,2	-19,3	-41,7	-18,7
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-15,9	-18,5	-29,1	-17,2

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig.

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Tabelle 6: *Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Fichtenscheiten in verschiedenen Wassergehaltsbereichen*

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	Mittelwert <sup>b</sup>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-11,9	2,6	-21,6	-4,6
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	1,0	-5,5	-42,1	-2,3
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-5,4	-14,2	-33,1	-9,8
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-3,4	-9,8	-45,3	-6,6
<i>Mittelwert</i>	-	-4,9	-6,7	-35,5	-5,8
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-11,4	-5,1	-36,7	-8,2
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-14,8	-22,4	-56,6	-18,6
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-13,9	-10,1	-47,6	-12,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-18,3	-23,7	-45,7	-21,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-22,2	-36,0	-60,8	-29,1
Doser LWM 2	5 – 23 %	-32,7	-30,3 <sup>a</sup>	-58,4	-31,5
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	-10,5	-15,6	-51,6	-13,0
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-23,9	-20,0	-46,6	-21,9
Trotec T 500	5 – 33 %	-11,4	-24,8	-54,6	-18,1
Fuva S 06	6 – 50 %	-24,0	-26,7	-57,9	-25,3
testo 606-1*	8 – 48 %	0,9	3,8	-36,6	2,3
PCE – 333	6 – 31 %	-1,4	-26,9	-47,0	-14,2
Trotec T 60	6 – 31 %	-4,7	-26,5	-48,5	-15,6
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-100,0	-22,7	-50,7	-61,4
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-30,6	-26,2	-58,2	-28,4
<i>Mittelwert</i>	-	-21,3	-20,9	-50,5	-21,1
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-29,7	-36,9	-51,9	-33,3
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-31,1	-61,8	-55,5	-46,4
<i>Mittelwert</i>	-	-30,4	-49,4	-53,7	-39,9
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-19,0	-22,9	-47,9	-20,0

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig.

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Bei den Auswertungen zu Tabelle 5 und Tabelle 6 wurden alle Messpunkte berücksichtigt, d. h. die Messungen an den beiden Stirnseiten und die drei Messpunkte über die Scheitlänge. Außerdem gehen die Messungen am Originalscheit wie auch am frisch gespaltenen Holzscheit sowie die ebenfalls durchgeführte Wiederholungsmessung in die Mittelwertbildung mit ein (vgl. Kapitel 4.4). Um eine eindeutige Aussage zum Einfluss der Holzart geben zu können, wurde ein Mittelwert über alle verwendeten Messgeräte und Wassergehaltsbereiche gebildet, wobei die Mess-

ergebnisse im feuchten Holz mit einem Wassergehalt von mehr als 30 % unberücksichtigt blieben, da dieser Bereich meist außerhalb des vom Hersteller zulässigen Messbereichs liegt und zudem eine ausreichend genaue Messung nicht mehr zu erwarten war (vgl. hierzu Kapitel 3.1 bzw. Kapitel 3.2). Um eine Aussage hinsichtlich der Richtung der Messabweichung (negatives Vorzeichen – Wassergehalt wird unterschätzt; ohne (positives) Vorzeichen – Wassergehalt wird überschätzt) geben zu können, blieben die Vorzeichen bei der Mittelwertbildung erhalten.

Die Ergebnisse in Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen, dass die Schnellbestimmung je nach eingesetztem Messprinzip und je nach Messgerät oft sehr ungenau sein kann und sich teilweise deutliche Abweichungen zum Sollwert ergeben. Hierbei handelt es sich nahezu durchweg um zu niedrige Messwerte, was durch das meist negative Vorzeichen der Messabweichung angezeigt wird.

Im Durchschnitt über alle untersuchten Geräte liefert Buchenscheitholz im Vergleich zu Fichtenscheitholz mit einer mittleren relativen Abweichung von -17,2 % ein etwas besseres Ergebnis als Fichtenscheitholz mit einer mittleren relativen Abweichung von -20,0 %. Ohne Berücksichtigung der Vorzeichen liegt die mittlere relative Abweichung (Streuung) bei Buchenscheitholz bei 18,5 % und bei Fichtenscheitholz bei 20,4 %. Betrachtet man die Messergebnisse differenziert nach Wassergehaltsbereichen im Brennstoff, so bestätigt sich diese Beobachtung und es ist zudem ein klarer Trend erkennbar: Je trockener das Holz, desto genauer ist das Messergebnis. So beträgt die mittlere Abweichung zum Sollwert über alle Messgeräte im trockenen ( $w < 20$  %) Buchenholzscheit -15,9 % (17,4 % Streuung) und im Fichtenholzscheit -19,0 % (19,2 % Streuung), während diese im vorgetrockneten Holz ( $w = 20 - 30$  %) bei Buche bereits -18,5 % (19,6 % Streuung) und bei Fichte -20,9 % (21,5 % Streuung) beträgt. Die Feuchteschnellbestimmung bei noch feuchtem Holz liefert sowohl bei Buche (-29,1 %) als auch bei Fichte (-47,9 %) durchweg sehr ungenaue Messergebnisse, die jedoch in der Auswertung nicht mehr berücksichtigt wurden.

Differenziert man nach der Art der Messgeräte, so weisen die Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode mit Abweichungen von durchschnittlich -8,0 % (Buche) (9,4 % Streuung) bzw. -5,8 % (Fichte) (6,7 % Streuung) die mit Abstand genauesten Ergebnisse aus, während die Abweichungen bei Leitfähigkeitsmessgeräten mit Einstechnadeln bei durchschnittlich -19,5 % (Buche) (20,9 % Streuung) bzw. bei -21,1 % (Fichte) (21,4 % Streuung) und bei dielektrischen Messgeräten bei durchschnittlich -18,7 % (Buche) (18,7 % Streuung) bzw. -39,9 % (Fichte) (39,9 % Streuung) liegen. Die im Vergleich zu Fichtenscheitholz geringere Messwertabweichung der dielektrischen Geräte bei Buchenscheiten kann evtl. durch die glattere Oberfläche derselben und die damit verbundene bessere Auflagefläche für die Kondensatorplatten begründet sein.

Generell ist feststellbar, dass die Schnellbestimmung des Wassergehaltes bei Scheithölzern offenbar tendenziell sowohl bei Buchen- als auch noch verstärkt bei Fichtenscheitholz zu einer Unterschätzung dieses Parameters führt, so dass hinsichtlich der Einsatztauglichkeit bzw. der Genauigkeit der Kalibrierung mancher Geräte zur Feuchteschnellbestimmung, insbesondere bei Leitfähigkeitsmessgeräten mit Einstechnadeln und bei dielektrischen Messgeräten, Zweifel angebracht sind. Dies trifft auch auf den Grenzbereich zwischen trockenem oder noch nicht trockenem Holz zu, der bei einem Wassergehalt von 20 % (= 25 % Holzfeuchte) liegt. Eine Übersicht über die ermittelten Variationskoeffizienten der Messwerte (vergleiche Kapitel, 4.4, Seite 31) der einzelnen Messgeräte kann Tabelle 16 im Anhang entnommen werden.

## 5.2 Einfluss der Messpunkte am Holzseit

Die in Kapitel 4 dargestellten Messungen wurden hinsichtlich der Lage der Messpunkte am Holzseit sowie für verschiedene Wassergehaltsbereiche ausgewertet, die Ergebnisse werden in Tabelle 7 (Mittelwert aus beiden Stirnseiten) bzw. Tabelle 8 (Mittelwert aus drei Messpunkten über die Scheitlänge verteilt) dargestellt.

Tabelle 7: *Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen an beiden Stirnseiten des Holzseit bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen*

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	Mittelwert <sup>b</sup>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-19,7	11,7	-15,7	-4,0
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	-7,1	-5,4	-38,7	-6,3
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-16,0	-1,3	-33,5	-8,7
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-10,6	-8,9	-42,0	-9,7
<i>Mittelwert</i>	-	-13,4	-1,0	-32,5	-7,2
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-15,3	0,4	-34,6	-7,5
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-23,4	-21,7	-52,2	-22,5
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-16,6	-7,6	-41,6	-12,1
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-22,0	-26,9	-42,5	-24,5
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-29,5	-42,9	-60,1	-36,2
Doser LWM 2	5 – 23 %	-33,2	-31,0 <sup>a</sup>	-52,5	-32,1
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	-12,6	-15,7	-45,4	-14,2
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-25,3	-12,2	-38,8	-18,8
Trotec T 500	5 – 33 %	-17,8	-21,3	-51,2	-19,6
Fuva S 06	6 – 50 %	-23,0	-22,6	-47,2	-22,8
testo 606-1*	8 – 48 %	-1,1	12,5	-30,8	5,7
PCE – 333	6 – 31 %	-6,2	-27,0	-48,4	-16,6
Trotec T 60	6 – 31 %	-7,1	-22,1	-47,0	-14,6
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-100,0	-14,8	-40,9	-57,4
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-36,9	-29,6	-50,5	-33,2
<i>Mittelwert</i>	-	-24,7	-18,8	-45,6	-21,7
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-1,4	5,6	-24,8	2,1
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-0,7	-27,0	-37,4	-13,8
<i>Mittelwert</i>	-	-1,0	-10,7	-31,1	-5,9
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-20,3	-14,7	-41,7	-17,5

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Tabelle 8: *Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen an der Längsseite des Holzscheites bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen*

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	Mittelwert <sup>b</sup>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-6,6	1,5	-4,5	-2,5
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	-0,4	-11,1	-36,2	-5,7
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-8,6	-8,8	-30,5	-8,7
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-6,4	-14,1	-39,4	-10,3
<i>Mittelwert</i>	-	-5,5	-8,1	-27,6	-6,8
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-7,3	-7,7	-33,9	-7,5
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-18,7	-29,4	-50,3	-24,1
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-4,0	-11,9	-41,5	-7,9
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-17,3	-21,6	-41,5	-19,5
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-23,8	-39,6	-58,9	-31,7
Doser LWM 2	5 – 23 %	-27,0	-34,2 <sup>a</sup>	-54,7	-30,6
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	-0,4	-16,4	-44,8	-8,4
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-16,9	-22,8	-37,8	-19,9
Trotec T 500	5 – 33 %	-12,6	-25,5	-48,2	-19,0
Fuva S 06	6 – 50 %	-16,4	-28,7	-47,1	-22,5
testo 606-1*	8 – 48 %	5,4	2,2	-26,7	3,8
PCE – 333	6 – 31 %	4,8	-20,5	-46,5	-7,9
Trotec T 60	6 – 31 %	-1,3	-19,1	-49,0	-10,2
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-99,6	-20,8	-41,0	-60,2
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-26,2	-33,0	-52,6	-29,6
<i>Mittelwert</i>	-	-17,4	-21,9	-45,0	-19,7
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-21,5	-27,5	-47,5	-24,5
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-42,5	-56,9	-64,3	-49,7
<i>Mittelwert</i>	-	-32,0	-42,2	-55,9	-37,1
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-16,5	-21,2	-42,7	-18,9

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Bei den Auswertungen zur Bestimmung des Einflusses der Lage des Messpunktes am Holzseit auf das Messergebnis wurden die Messungen an allen verwendeten Holzarten (Buchen-, Fichten- und Birkenholz) ebenso mit einbezogen, wie die Messungen an unterschiedlichen Messpunkten am Originalseit bzw. am frisch gespaltenen Holzseit, wobei gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.4 der gemittelte Anzeigewert aus den beiden Messungen (eine Wiederholungsmessung) Verwendung fand. Da die einzelnen Messpunkte an der Scheitlängsseite (jeweils drei Messpunkte

über die Länge verteilt) und auch an den beiden Stirnseiten ein sehr ähnliches Anzeigergebnis lieferten, wurden diese, um eine größere Datenmenge zu bekommen, für die Auswertung in die Messwert-Gruppen „Längsseite“ bzw. „Stirnseite“ zusammengefasst. Um eine eindeutige Aussage zum Einfluss der Lage des Messpunktes am Holzscheid treffen zu können, wurde außerdem ein Mittelwert über alle verwendeten Messgeräte und Wassergehaltsbereiche gebildet, wobei die Messergebnisse im feuchten Holz mit einem Wassergehalt von mehr als 30 % hierbei unberücksichtigt blieben, da dieser Bereich meist außerhalb des vom Hersteller zulässigen Messbereiches liegt und zudem eine ausreichend genau Messung nicht mehr zu erwarten war (vgl. auch Kapitel 3.1, bzw. Kapitel 3.2). Um eine Aussage hinsichtlich der Richtung der Messabweichung (negatives Vorzeichen – Wassergehalt wird unterschätzt; ohne (positives) Vorzeichen – Wassergehalt wird überschätzt) geben zu können, blieben die Vorzeichen bei der Mittelwertbildung erhalten. Der tatsächliche Streuungswert (d. h. mittlerer Betrag der relativen Abweichung) liegt aber oftmals etwas höher, da in diesem Fall die meist negativen Messwertabweichungen nicht von den gelegentlich positiven Abweichungen bei der Mittelwertbildung teilweise kompensiert werden können.

Die Ergebnisse in Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen, dass das Ergebnis der Schnellbestimmung auch von der Lage des Messpunktes am Holzscheid abhängig sein kann. Am Gesamtdurchschnittswert aller Messungen ist dies zwar nicht erkennbar. Betrachtet man jedoch die Art der eingesetzten Messgeräte, so wird erkennbar, dass nur bei dielektrischen Messgeräten eindeutige Vorteile für die Messungen an der Stirnseite feststellbar sind. Hier liegt die relative Abweichung vom Sollwert nur bei -5,9 % (8,7 % Streuung) und bei Messungen an der Längsseite dagegen bei -37,1 % (37,1 % Streuung). Hierbei wirkt sich aus, dass die Längsseiten der Holzseite nicht – wie die gerade geschnittenen Stirnseiten – die für dielektrische Messgeräte notwendige gerade Auflagefläche bieten. Dagegen liefern sowohl Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektroden als auch Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln bei Messungen an der Scheitlängsseite meist ein etwas besseres Ergebnis als bei Messungen an den Stirnseiten. Bei Messungen an der Scheitlängsseite liegt die mittlere relative Abweichung bei Geräten mit Rammelektrode bei -6,8 % (7,2 % Streuung) und bei Messungen an den Stirnseiten bei -7,2 % (10,1 % Streuung). Geräte mit Einstechnadeln liefern dagegen mit Abweichungen von -21,7 % (22,6 % Streuung) bei Messungen an den Stirnseiten und -19,7 % (20,5 % Streuung) bei Messungen an der Längsseite im Mittel ein etwas schlechteres Ergebnis.

Betrachtet man die Ergebnisse differenziert nach dem Wassergehalt im Brennstoff so zeigt sich erneut, dass Messungen im Wassergehaltsbereich von weniger als 30 % deutlich genauer sind als im sehr feuchten Holz. Sowohl bei Messungen an den Stirnseiten als auch an den Längsseiten kommt es fast durchweg zu einer deutlichen Unterschätzung des tatsächlichen Wassergehaltes. Somit sind hinsichtlich der Einsatztauglichkeit bzw. der Genauigkeit der Kalibrierung gerade bei Leitfähigkeitsmessgeräten mit Einstechnadeln und auch bei Messungen an der Längsseite des Holzes mit dielektrischen Messgeräten vielfach Zweifel angebracht, vor allem wenn es sich um den Grenzbereich zwischen trockenem und noch nicht ausreichend trockenem Holz (ca. 20 % Wassergehalt bzw. 25 % Holzfeuchte) handelt.

Eine Übersicht über die ermittelten Variationskoeffizienten der Messwerte der einzelnen Messgeräte (vgl. Kapitel, 4.4, Seite 31) kann Tabelle 15 im Anhang entnommen werden.



### 5.3 Einfluss der Scheitvorbereitung

Die in Kap. 4 dargestellten Messungen wurden hinsichtlich gewisser vorbereitender Maßnahmen der Holzscheite sowie für verschiedene Wassergehaltsbereiche ausgewertet. Diesbezüglich wurden die Messergebnisse im Originalscheit (d. h. ohne zweite Spaltung) mit den Messergebnissen im direkt vor Messbeginn frisch gespaltenen Scheit verglichen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 9 (Originalscheit, nicht frisch gespalten) bzw. Tabelle 10 (Holzscheit frisch gespalten) dargestellt.

Tabelle 9: Rel. Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen am Originalscheit (nicht frisch gespalten) bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	Mittelwert <sup>b</sup>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-1,1	3,7	-5,1	1,3
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	2,6	-11,7	-37,7	-4,6
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-6,3	-10,1	-34,3	-8,2
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-5,2	-16,0	-40,9	-10,6
<i>Mittelwert</i>	-	-2,5	-8,5	-29,5	-5,5
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-5,4	-11,5	-37,1	-8,4
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-17,3	-29,3	-52,8	-23,3
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-0,9	-16,7	-43,0	-8,8
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-19,3	-25,2	-52,2	-22,3
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-23,8	-47,4	-63,2	-35,6
Doser LWM 2	5 – 23 %	-25,3	-37,6 <sup>a</sup>	-56,4	-31,5
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	1,4	-19,0	-46,9	-8,8
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-15,7	-25,6	-41,0	-20,7
Trotec T 500	5 – 33 %	-10,5	-26,5	-50,3	-18,5
Fuva S 06	6 – 50 %	-17,6	-31,8	-49,6	-24,7
testo 606-1*	8 – 48 %	7,5	0,1	-31,4	3,8
PCE – 333	6 – 31 %	5,7	-23,7	-53,6	-9,0
Trotec T 60	6 – 31 %	1,5	-20,3	-52,0	-9,4
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-100,0	-22,2	-43,7	-61,1
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-26,1	-35,7	-55,5	-30,9
<i>Mittelwert</i>	-	-16,4	-24,8	-48,6	-20,6
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-20,7	-30,8	-52,8	-25,7
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-46,9	-56,0	-68,9	-51,5
<i>Mittelwert</i>	-	-33,8	-43,4	-60,9	-38,6
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-15,4	-23,5	-46,1	-19,5

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

*Tabelle 10: Relative Abweichung des angezeigten Wassergehalts vom Sollwert bei Messungen am frisch gespaltenen Holzsplit bei verschiedenen Wassergehaltsbereichen*

Messgerät	Messbereich (w)	relative Abweichung bei Wassergehalt (%)			Mittelwert <sup>b</sup>
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %	
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 60 %	-12,0	-0,6	-3,9	-6,3
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	-3,3	-10,5	-34,7	-6,9
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	-10,8	-7,5	-27,2	-9,2
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	-7,7	-12,2	-37,9	-9,9
<i>Mittelwert</i>	-	-8,5	-7,7	-25,9	-8,1
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	-9,3	-4,0	-30,7	-6,6
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	-20,1	-29,4	-47,7	-24,8
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	-7,0	-7,1	-40,0	-7,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	-15,3	-18,0	-34,3	-16,7
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	-23,9	-31,8	-54,5	-27,9
Doser LWM 2	5 – 23 %	-28,7	-30,7 <sup>a</sup>	-52,9	-29,7
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	-2,1	-13,9	-42,7	-8,0
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	-18,0	-20,1	-34,6	-19,1
Trotec T 500	5 – 33 %	-14,8	-24,5	-46,2	-19,6
Fuva S 06	6 – 50 %	-15,1	-25,6	-44,7	-20,4
testo 606-1*	8 – 48 %	3,4	4,3	-22,1	3,8
PCE – 333	6 – 31 %	3,8	-17,3	-39,5	-6,7
Trotec T 60	6 – 31 %	-4,0	-17,9	-46,0	-11,0
Wetekom MD-018	0 – 38 %	-99,1	-19,3	-38,2	-59,2
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	-26,4	-30,3	-50,1	-28,3
<i>Mittelwert</i>	-	-18,4	-19,0	-41,6	-18,7
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	0 – 50 %	-22,4	-24,2	-42,1	-23,3
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	-38,2	-57,8	-59,8	-48,0
<i>Mittelwert</i>	-	-30,3	-41,0	-50,9	-35,6
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-17,7	-19,0	-39,5	-18,3

<sup>a</sup> Laut Hersteller ist der Einsatz nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % (=30 % Holzfeuchte) zulässig

<sup>b</sup> Relative Messwert-Abweichung im feuchten Holz (w > 30 %) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Bei den Auswertungen zur Bestimmung des Einflusses eventuell vorgenommener vorbereitender Maßnahmen am Holzsplit auf das Messergebnis wurden sowohl die Ergebnisse für alle Holzarten, d. h. Buche, Fichte und in einem Fall auch Birke, ebenso verwendet wie die Ergebnisse zu den Messpunkten an den Längsseiten der Holzsplit, wobei gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.4 der gemittelte Anzeigewert aus den beiden Messungen (eine Wiederholungsmessung) Ver-

wendung fand. Da die Messpunkte an den Stirnseiten am frisch gespaltenen Scheit und am Originalscheit identisch sind, wurden diese bei der Auswertung hier nicht berücksichtigt. Um eine eindeutige Aussage zum Einfluss von vorbereitenden Maßnahmen am Holzscheit geben zu können, wurde ein Mittelwert über alle verwendeten Messgeräte und Wassergehaltsbereiche gebildet, wobei die Messergebnisse im feuchten Holz mit einem Wassergehalt von mehr als 30 % unberücksichtigt blieben, da dieser Bereich meist außerhalb des vom Hersteller zulässigen Messbereiches liegt und zudem eine ausreichend genau Messung nicht mehr zu erwarten war (vgl. Ausführungen in Kap. 3.1, bzw. Kap. 3.2.). Um eine Aussage hinsichtlich der Richtung der Messabweichung (negatives Vorzeichen – Wassergehalt wird unterschätzt; ohne (positives) Vorzeichen – Wassergehalt wird überschätzt) geben zu können, wurden die Vorzeichen bei der Auswertung nicht bereinigt. Dadurch kann der in Tabelle 9 bzw. Tabelle 10 angegebene Mittelwert etwas geschönt erscheinen, da sich positive und negative Messabweichungen gegenseitig neutralisieren.

Die Ergebnisse in Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen auch bei dieser Auswertung, dass die Feuchte-schnellbestimmung auch bei veränderten probenvorbereitenden Maßnahmen oft sehr ungenau sein kann und sich teilweise deutliche Abweichungen zum Sollwert ergeben. Betrachtet man jedoch die Art der eingesetzten Messgeräte, so führen die Geräte mit Rammelektroden mit Abweichungen von durchschnittlich -5,5 % (7,1 % Streuung) bei Messungen am Originalscheit bzw. -8,1 % (8,1 % Streuung) bei Messungen am frisch gespaltenen Scheit mit Abstand zu den genauesten Ergebnissen. Am wenigsten genau sind die Messergebnisse mit dielektrischen Messgeräten. Hier liegen die Abweichungen mit durchschnittlich -38,6 % (38,6 % Streuung) bei Messungen im Originalscheit bzw. -35,6 % (Betrag 35,6 % Streuung) bei Messungen am frisch gespaltenen Scheit deutlich am höchsten, was auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass hier lediglich an den Längsseiten der Holzscheite gemessen wurde und diese keine gerade Auflagefläche besitzen.

Betrachtet man die Messergebnisse differenziert nach dem Wassergehalt im Brennstoff zeigt sich, dass ein Wassergehaltsbereich im Holzscheit von kleiner 30 % ein deutlich besseres Messergebnis liefert als sehr feuchter Brennstoff. Allerdings kann bei einer mittleren relativen Abweichung bei der Messung am Originalscheit kein direkter Vor- oder Nachteil gegenüber der Messung am frisch gespaltenen Scheit ausgemacht werden. Feststellbar ist jedoch, dass ein Wassergehalt unter 20 % offenbar ein (wenig) besseres Messergebnis liefert als ein Wassergehalt, der zwischen 20 und 30 % liegt. Der hohe Feuchtigkeitsbereich und die dort festgestellten sehr hohen relativen Abweichungen der Messergebnisse von -46,1 % (Messung am Originalscheit) bzw. -39,5 % (Messung am frisch gespaltenen Scheit) wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Generell ist auch bei dieser Auswertung feststellbar, dass die Schnellbestimmung des Wassergehaltes bei Scheithölzern offenbar tendenziell sowohl bei Messungen am Originalscheit als auch am frisch gespaltenen Holzscheit zu einer Unterschätzung dieses Parameters führt, so dass hinsichtlich der Einsatztauglichkeit bzw. der Genauigkeit der Kalibrierung gerade bei Leitfähigkeitsmessgeräten mit Einstechnadeln und bei dielektrischen Messgeräten Zweifel angebracht sind, vor allem wenn es sich um den Grenzbereich von trockenem oder noch nicht trockenem Holz handelt, der bei einem Wassergehalt von 20 % (= 25 % Holzfeuchte) anzusiedeln ist.

Eine Übersicht über die ermittelten Variationskoeffizienten der Messwerte (vergleiche Kapitel, 4.4, Seite 31) der einzelnen Messgeräte kann Tabelle 14 im Anhang entnommen werden.

## 5.4 Beurteilung der einzelnen Messgeräte

### 5.4.1 BES Bollmann EASY *comfort*

Das EASY *comfort* ist ein Materialfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz, Baustoffen und weiteren Materialien. Die Messung erfolgt entweder durch die 9 mm langen gehärteten Spezialelektroden (Einstechelektrode) oder, für eine zerstörungsfreie Oberflächenmessung, durch Anlegen der Kontaktkappe an das Holzscheit [17]. Beide Vorgehensweisen wurden hier untersucht, sie werden nachfolgend näher beschrieben.

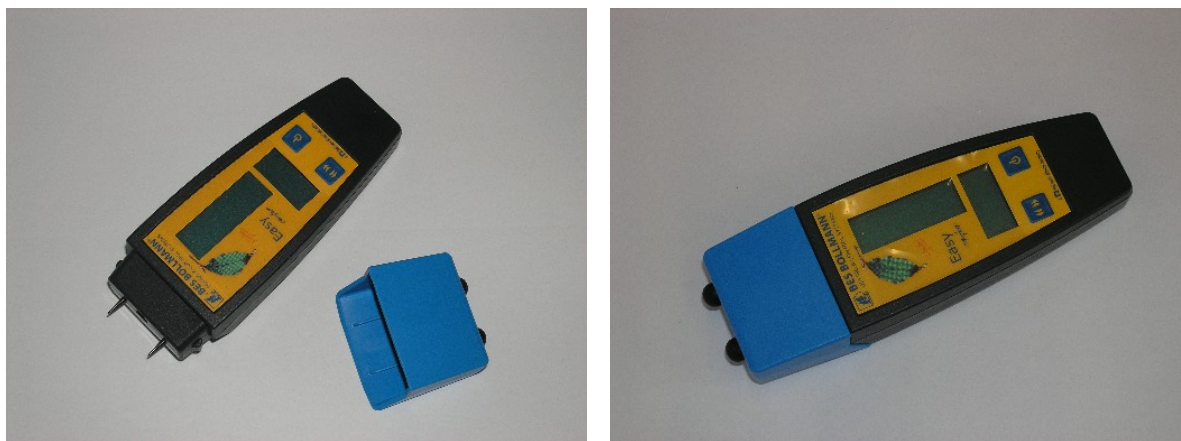


Abbildung 12: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat BES Bollmann, Typ Easy-comfort, mit integrierten Nadeln (links) bzw. mit Kontaktkappe (rechts)

Das Gerät ist in der Standardversion für vier Materialgruppen (Holzgruppe 3 und 4, Zementputz sowie Gipsputz) vorprogrammiert. Weiterhin ist eine Infrarottemperaturmessung zur Bestimmung der aktuellen Messguttemperatur integriert, womit eine automatische Temperaturkompensation bei Holzfeuchtemessungen möglich ist. Das Gerät ist zusätzlich mit einer DATA-HOLD Funktion ausgerüstet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen. Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 5 und 48 % Holzfeuchte (Wassergehalt 5 bis 32 %) und Umgebungstemperaturen von  $-10\text{ °C}$  bis  $+60\text{ °C}$ , wobei eine automatische Temperaturkompensation im Temperaturbereich von  $0\text{ °C}$  bis  $80\text{ °C}$  erfolgt [17].

Für die Messung an Fichtenscheitholz muss laut Herstellerangabe die Holzgruppe „h4“ eingestellt werden. Dies entspricht in der Anzeige dem Symbol „Wald“ mit dem Zusatz „B“. Bei den Messungen in Buchenholz konnte jedoch die laut Herstellerangabe zu verwendende „Holzgruppe h2“ nicht eingestellt werden, da diese im Standardgerät nicht verfügbar war (unvollständige Programmierung). Daher wurde die Feuchteschnellbestimmung bei Hartholz neben der Holzart Buche auch noch zusätzlich mit der Holzart Birke durchgeführt. Mit der Einstellung der Holzgruppe „h3“ als für die Holzart Birke richtige Einstellung (Anzeige Symbol „Wald“ mit dem Zusatz „A“) mussten auch die Messungen an Buchenholz erfolgen, obwohl dies nicht den Herstellervorgaben für diese Holzart entspricht. Die DATA-HOLD Funktion wurde nicht angewandt, da bei der Versuchsdurchführung die Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Beim Messen mit Einstechelektroden wurden diese quer zur Faser mit großem Druck so weit wie möglich in das Holz eingedrückt und durch langen Tastendruck (> 2 Sekunden) auf die Auswahl-taste eine automatische Temperaturkompensation vorgenommen (die gemessene Objekttemperatur wird kurz angezeigt), daraufhin konnte der Anzeigewert abgelesen werden. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Einstechelektroden wurden auch in hartem Holz nicht verbogen. Auch war die Ablesung durch die übersichtliche Skalenanzeige (analoge Darstellung in Balkenform) sehr einfach durchzuführen, wobei der Anzeigewert neben der Skalenanzeige digital ebenfalls mit angezeigt wird, was als positiv empfunden wurde. Vorteilhaft wäre jedoch, wenn die gerade gemessene Holzart anstelle der verschlüsselten Kurzanzeige (Symbol + Buchstabe) als Klartextanzeige im Display mit angezeigt würde.

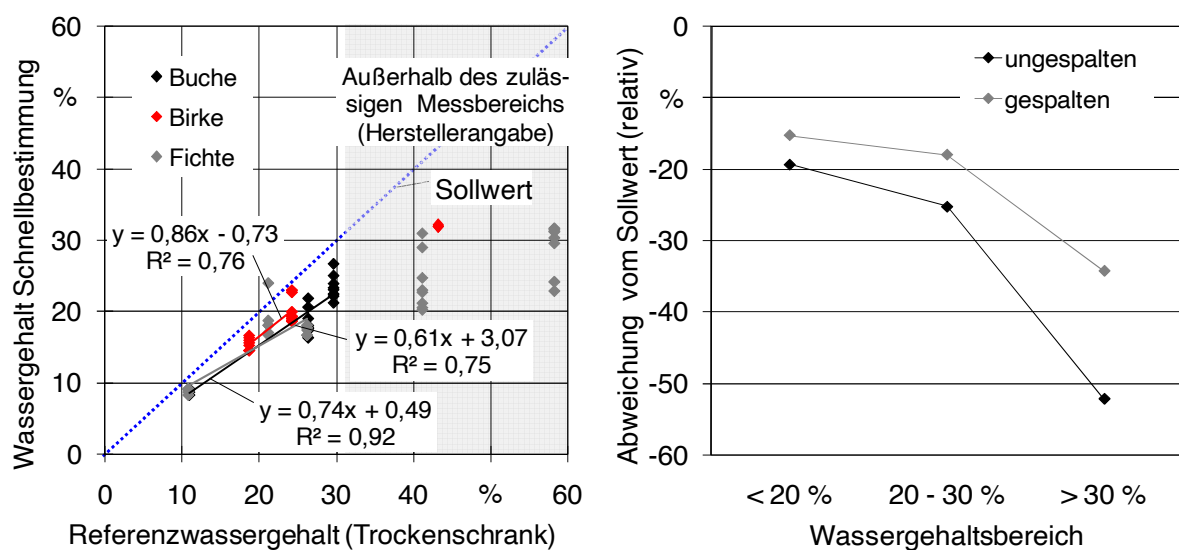


Abbildung 13: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit von Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abwei-chung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät BES Bollmann, EASY comfort, Messung mit Einstechnadeln

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dies deckt sich in etwa mit der Angabe des Herstellers, wonach das Gerät bis zu einem Wassergehalt von 32 % (Holzfeuchte 48 %) eingesetzt werden kann. Trotzdem ist der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -21,0 % bei der Messung in Fichtenholz und -17,4 % bei der Messung in Birkenholz deutlich zu niedrig, wobei auch die Messung in Buchenholz trotz „falscher“ Einstellung der Holzgruppe mit einer relativen Abweichung von -22,2 % kein deutlich schlechteres Ergebnis bringt. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung fast immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich auf etwa gleichbleibendem Niveau bewegt. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Ab-bildung 13, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw.

im frisch gespaltenen Holzsplit (Abbildung 13, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzsplit -24,5 %, an der Längsseite -19,5 %, am Originalsplit -22,3 % und am frisch gespaltenen Split -16,7 %. Hierin sind auch die Messergebnisse für Buchensplit enthalten.

Beim Messen im Kontaktmodus und bei den Auswertungen wurde in gleicher Weise wie oben beschrieben vorgegangen, nur dass die Kontaktkappe bei den Messungen auf das Messgerät aufgesteckt war. Die Ergebnisse zeigen, dass der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -29,1 % bei der Messung in Fichtenholz und -31,8 % bei der Messung in Birkenholz, noch deutlich ungenauer ist als bei der Messung mit Einstechnadeln. Das Gleiche gilt auch für die Messung in Buchenholz (mittlere relativen Abweichung von -36,8 %), wobei hier die Holzgruppe „h3“ an Stelle der Holzgruppe „h2“ eingestellt war.

Wie bei der Messung mit Einstechelektroden wird auch hier das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzsplit immer ungenauer. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 14, links, dargestellt. Ein ähnliches, ebenfalls viel zu niedriges, Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalsplit bzw. im frisch gespaltenen Holzsplit (Abbildung 14, rechts) erzielt. Hier beträgt die mittlere relative Abweichung zum Sollwert (d. h. der Messfehler) bei Messungen an den Stirnseiten der Holzsplit -36,2 %, an der Längsseite -31,7 %, am Originalsplit -35,6 % und am frisch gespaltenen Split -27,9 %. Eine Sollwertabweichung in der Größenordnung von -30 % ist als deutlich zu ungenau und nicht mehr sinnvoll anwendbar anzusehen.

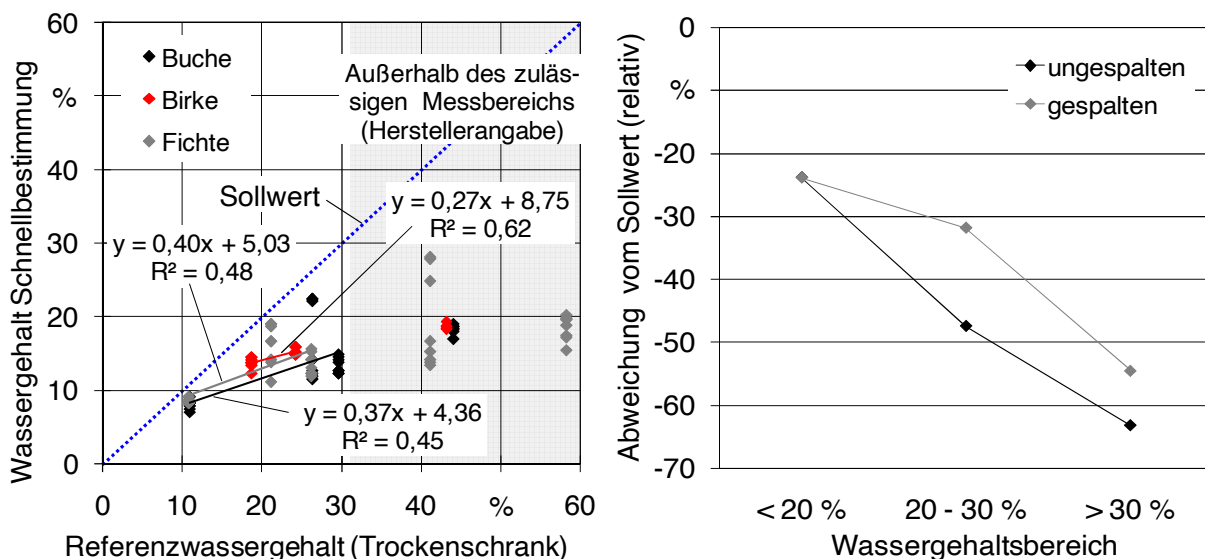


Abbildung 14: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät BES Bollmann, EASY comfort, Messung mit Kontaktkappe

### 5.4.2 DOSER DM 4A

Das Feuchtigkeitsmessgerät DM 4A arbeitet nach dem kapazitiven Messprinzip und ist laut Herstellerangabe zur sekundenschnellen Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz, mineralischen Baustoffen sowie Papier und Pappe bis zu einer Tiefe von ca. 3 cm bestimmt. Die Beschreibung in der Bedienungsanleitung hierzu ist jedoch verwirrend, da sowohl von der Feuchtigkeit als auch vom Wassergehalt gesprochen wird, und auf die unterschiedliche Definition dieser beiden Begriffe (vgl. Kapitel 2.1) nicht hingewiesen wird.

Das Gerät ist in der Standardversion mit fünf Materialgruppen (code 30: kundenspezifische Materialkurven, code 31: Holz, code 32: Papier und Pappe, code 33: Holz (umschaltbar zu Baustoffe) und code 34: Baustoffe), die wiederum in verschiedene Gruppen unterteilt sind, vorprogrammiert. Weiterhin ist eine Nullpunktmessung und -korrektur integriert. Darüber hinaus ist das Gerät mit einer automatischen Maximalwerterfassung (automax) sowie einer Speichermöglichkeit für bis zu 100 Messwerte ausgerüstet, die auch an einen PC übertragen werden können. Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 0 und 99,9 % Holzfeuchte (Wassergehalt 0 bis 50 %) und Umgebungstemperaturen von +5 °C bis +40 °C [18].



Abbildung 15: Dielektrisches Messgerät Fabrikat Dosser, Typ DM 4 A

Da für den Werkstoff Holz zwei unterschiedliche Materialgruppen in der Beschreibung angegeben sind (code 31 und code 33), wurde die richtige Einstellung zur Messung von Scheitholz (Brennholz) beim Hersteller nachgefragt. Zur Messung wurde als geeignete Einstellung genannte Materialgruppe „code 31“ mit der Kennung „H“ für Holz gewählt, wobei nochmals zwischen den Holzarten Fichte (Holzart H 3) und Buche (Holzart H 5) unterschieden wurde. Bei einem Feuchtegehalt im Fichtenholz von 11 % entspricht dies in der Displayanzeige beispielsweise H 3 = 11,0 %. Eine Nullpunktmessung und -korrektur erfolgte vor jedem Messvorgang, die automatische Maximalwerterfassung wurde dagegen nicht verwendet, da die Anzeige gut einsehbar war. Vorteilhaft wäre jedoch, wenn die gerade gemessene Holzart anstelle der verschlüsselten Kurzanzeige als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde.

Beim Messen wurden die verwendeten Holzscheite frei in die Luft gehalten, bevor die Messelektroden (aufgeklappter Plattenkondensator) auf das zu messende Holzscheid gedrückt wurden. Dabei wurde angestrebt, dass die Auflagefläche, wie vom Hersteller vorgegeben, möglichst eben und glatt war, wobei dies durch die vorgegebenen Messpunkte insbesondere an den unebenen Spaltflächen meist nicht gegeben war. Dadurch lag der aufgeklappte Plattenkondensator am Scheitholz oft nicht vollständig auf, wodurch – angesichts des verwendeten Messprinzips – von einer Verfälschung des Messergebnisses ausgegangen werden kann. Der Messwert selbst wurde als stabiler Anzeigewert angezeigt und konnte sehr einfach abgelesen werden. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten gegenüber dem Sollwert könnte jedoch auf die Anzeige der Nachkommastelle verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 50 % (Holzfeuchte 100 %) erstreckt. Trotz dieser Beschränkung ist der angezeigte Messwert bei der Messung an Fichtenholz mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -33,3 % deutlich zu niedrig. Dagegen liefert die Messung an Buchenscheitholz mit einer mittleren relativen Abweichung von nur -2,4 % ein deutlich genaueres Ergebnis. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheid fast immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich (außer bei Fichtenholz) nur unwesentlich verändert, sondern tendenziell eher erhöht. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 16, links dargestellt. Ein ähnliches Ergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten erzielt. Da sich positive und negative Messabweichungen teilweise aufheben, liegt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite mit +2,1 % lediglich bei einem Bruchteil der Abweichung gegenüber Messungen an der Längsseite mit -24,5 %. Ohne Beachtung der Vorzeichen liegt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten bei 3,5 %. Dagegen liefert die Messung am Originalscheid mit Abweichungen von -25,7 % ein ähnlich (schlechtes) Ergebnis wie am (dünneren) frisch gespaltenen Scheit (-23,3 %). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 16 (rechts) dargestellt. Augenscheinlich ist hier festzustellen, dass, die Messergebnisse sich verbessern, wenn eine glatte Oberfläche gewählt wird (z. B. geschnittene Stirnseite gegenüber gespaltene Längsseite oder relativ glatte Buchenscheidfläche gegenüber unebene Fichtenscheidfläche). Im höheren Wassergehaltsbereich zeigt sich eine zunehmende Ungenauigkeit der Messung (Abbildung 16). Hier liefert die Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10), dieser Bereich blieb daher beim Gerätevergleich unberücksichtigt.



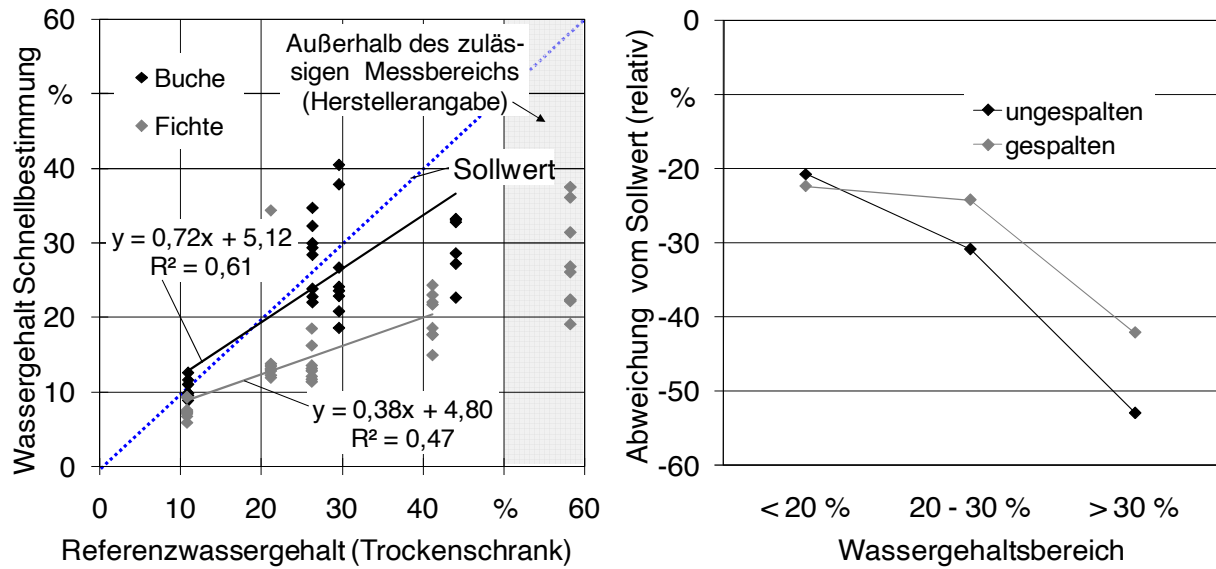


Abbildung 16: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Doser, DM 4A

### 5.4.3 DOSER LWM 2

Das digitale Feuchtigkeitsmessgerät LWM 2 dient laut Herstellerangabe der sekundenschnellen Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von verschiedenen Holzarten. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei auswechselbaren Elektroden (Nägel). Der zulässige Messbereich liegt zwischen 5 und 30 % Holzfeuchte (Wassergehalt 5 bis 23 %), was für die Feuchtebestimmung von Brennholz zu gering ist, da ein Feuchtegehalt von 25 % (Wassergehalt 20 %) die Grenze zwischen trockenen und noch nicht trockenen Holz darstellt und genau dies überprüft werden soll. Das Gerät ist auf eine Umgebungstemperatur von +20 °C kalibriert, wobei bei anderen Temperaturen im Bereich von +10 °C bis +80 °C eine Temperaturkorrektur mittels Diagrammablesung erfolgen kann. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen [19].



Abbildung 17: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Dosser, Typ LWM 2 mit Einstechnadeln

Beim Messen wurden die Elektroden (Nägel) quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Eine Temperaturkorrektur war nicht erforderlich, da die Messungen bei einer Temperatur (sowohl Holz als auch Umgebungstemperatur) von +20 °C durchgeführt wurden. Beim Messen erwies sich die scharfkantige Bauform des Gerätes als nicht optimal, da das (kraftaufwändige) Hineindrücken der Elektroden ins Holz (insbesondere Hartholz) schmerzhaft Druckstellen verursachte. Auch erwiesen sich die Einstechelektroden als zu lang und zu wenig stabil, da sich diese insbesondere bei der Messung in Hartholz mit Fortschreiten der Messungen zunehmend verbogen (bis zu 90 °). Ein mehrmaliges Geradebiegen der Elektroden war, auch während der Messungen, erforderlich, zumal im Lieferumfang auch keine Ersatzelektroden enthalten waren. Positiv hervorzuheben ist die gut sichtbare und leicht ablesbare Anzeige des Messwertes in digitaler Form. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit sollte jedoch auf die Anzeige der Nachkommastelle verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dieser geht zwar über den vom Hersteller zugelassenen Messbereich hinaus, der sich lediglich bis zu einem Wassergehalt von 23 % (Holzfeuchte 30 %) erstreckt, allerdings ist dies in der Praxis auch erforderlich, um Scheitholz hinsichtlich des Trocknungszustandes hinreichend

beurteilen zu können. Nicht nur wegen des „vergrößerten“ Messbereichs ist der gemittelte Anzeigewert über alle untersuchten Holzarten, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren Abweichung von -31 % deutlich zu niedrig, wobei auch bei den Messergebnissen zwischen den einzelnen Holzarten keine signifikanten Vor- oder Nachteile erkennbar sind. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich auf etwa gleichbleibendem Niveau bewegt. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 18, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen am Originalscheit bzw. am frisch gespaltenen Scheit (Abbildung 18, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -32,1 %, an der Längsseite -30,6 %, am Originalscheit -31,5 % und am (dünnere) frisch gespaltenen Scheit -29,7 %. Es soll hier nochmals erwähnt werden, dass die Messergebnisse auf einem Wassergehalt im Holzscheit bis maximal 30 % basieren, der zulässige Messbereich vom Hersteller jedoch nur bis zu einem Wassergehalt von 23 % reicht. Trotzdem wird eine Sollwertabweichung aus der Schnellbestimmung in der Größenordnung von -30 % als deutlich zu ungenau und nicht mehr anwendbar angesehen.

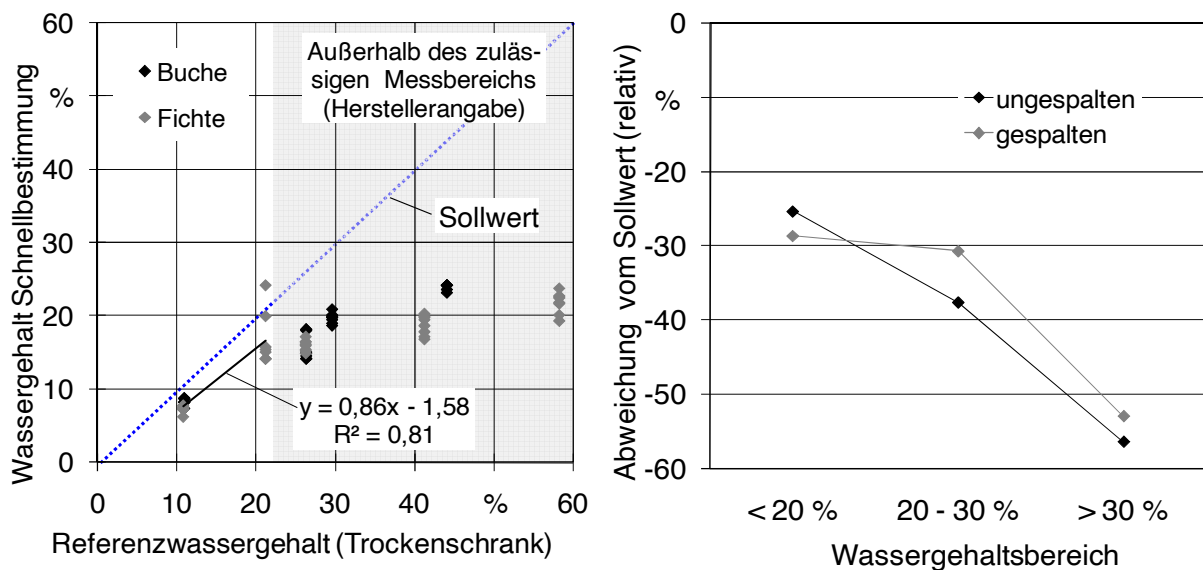


Abbildung 18: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Dosser, LWM 2

#### 5.4.4 Fuva S 06

Das Feuchtigkeitsmessgerät S 06 ist laut Herstellerangabe ein genaues Gerät für Präzisionsmessungen der Holzfeuchte  $u$ , mit dem alle Brennholzarten mit großer Genauigkeit gemessen werden. Speziell wurde das besonders für Privatanwender geeignete Gerät zur Messung der Restfeuchte in Brennholz, Kaminholz sowie Holz für Boots- und Modellbau entwickelt. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei auswechselbaren Elektroden (Stahlstiften).

Der zulässige Messbereich liegt zwischen 6 und 100 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 50 %), und Umgebungstemperaturen von  $-15\text{ °C}$  bis  $+45\text{ °C}$ , wobei eine automatische Temperaturkompensation über einen eingebauten Sensor erfolgt. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen [20].



Abbildung 19: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Fuva, Typ S 06 mit Einstechnadeln

Obwohl sowohl das zu messende Holzscheit als auch das Messgerät selbst zum Messzeitpunkt eine Temperatur von  $+20\text{ °C}$  hatten, wurde vor Beginn der Messung die Temperaturkompensation durchgeführt, indem der Temperatursensor an der Rückseite des Messgerätes für etwa 20 Sekunden auf eine möglichst glatte Fläche des Holzscheites gedrückt wurde. Anschließend wurden die Elektroden (Stahlstifte) quer zur Faser mit großem Druck so weit wie möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert wurde abgelesen. Trotz relativ kurzer Elektroden erwies sich das eckige Gerät beim Messen als nicht ganz optimal, da die eckigen Kanten beim (kraftaufwändigen) Hineindrücken der Elektroden ins Holz (insbesondere Hartholz) mit der Zeit Druckstellen verursachten und zudem das Gehäuse des Messgerätes als wenig stabil empfunden wurde. Auch war, bedingt durch die sehr kurzen Elektroden und deren relativ großen Abstand, ein Einstechen speziell bei einer sehr unebenen Holzoberfläche manchmal nur schwierig zu realisieren, da das Gehäuse zwischen den Nadeln gelegentlich am zu messenden Holzscheit aufliegt. Die Elektroden sind jedoch sehr stabil und auch für Hartholz gut geeignet. Weiterhin positiv ist die gut sichtbare Anzeige des Messwertes in digitaler Form, die ein einfaches Ablesen erlaubt. Aufgrund der gegebenen Messgenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte jedoch auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 50 % (Holzfeuchte 100 %) erstreckt. Trotzdem ist das über alle Holzarten gemittelte Messergebnis, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung von -22,6 %, deutlich zu niedrig, wobei bei Messungen in Buchenholz bei Abweichungen von -19,8 % ein etwas besseres Ergebnis als bei Messungen in Fichtenholz mit Abweichungen von -25,3 % erreicht wird. Auffallend ist, dass der Wassergehalt bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert mit steigendem Wassergehalt im Holz scheinbar teilweise deutlich erhöht. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 20, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalschieit bzw. im frisch gespaltenen Holz schieit (Abbildung 20, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holz schieite -22,8 %, an der Längsseite -22,5 %, am Originalschieit -24,7 % und am (dünnen) frisch gespaltenen schieit -20,4 %. Im höheren Wassergehaltsbereich über 30 %, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 50 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt noch ungenauer wird (Abbildung 20). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

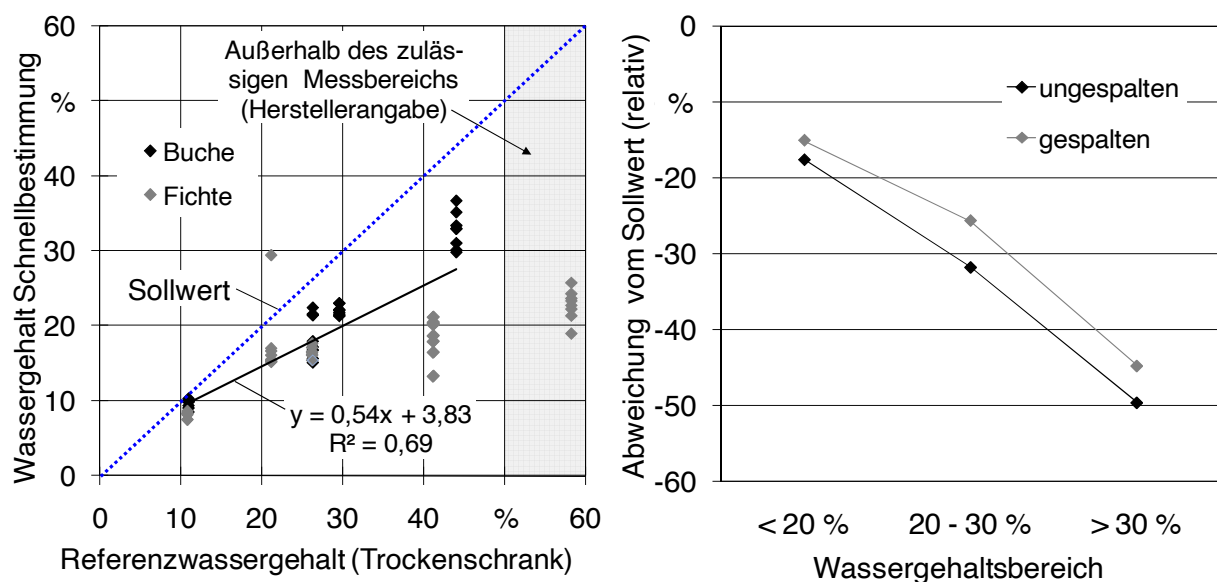


Abbildung 20: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Fuva, S 06

### 5.4.5 Gann Hydromette Compact S

Das HYDROMETTE COMPACT S ist ein elektronisches Holzfeuchtemessgerät, welches speziell zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holzbrennstoffen konzipiert wurde. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei auswechselbaren Elektroden (Messspitzen). Der zulässige Messbereich liegt zwischen 10 und 50 % Holzfeuchte (Wassergehalt 9 bis 33 %) und Umgebungstemperaturen von +15 °C bis +25 °C, wobei das Gerät auf eine Umgebungstemperatur von +20 °C kalibriert ist. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen, sondern das Gerät besitzt eine Mittelwert-Kalibrierung für Weich- und Harthölzer [21].

Beim Messen wurden die Elektroden (Messspitzen) quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Eine Temperaturkorrektur war nicht erforderlich, da die Messungen bei einer Temperatur (sowohl Holz- als auch Umgebungstemperatur) von +20 °C durchgeführt wurden. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Einstechelektroden hielten auch in hartem Holz stand und verbogen sich nicht. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige gut möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung, da dadurch Ablesefehler ausgeschlossen werden. Aufgrund der abfallenden Messwertanzeige sowie der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.



Abbildung 21 Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Gann, Typ Hydromette Compact S mit Einstechnadeln

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dies deckt sich in etwa mit der Angabe des Herstellers, wonach das Gerät bis zu einem Wassergehalt von 33 % (Holzfeuchte 50 %) eingesetzt werden kann. Trotzdem ist der angezeigte Messwert über alle untersuchten Holzarten, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer

mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -19,6 % deutlich zu niedrig, wobei bei Messungen in Buchenholz bei Abweichungen von -17,2 % ein etwas besseres Ergebnis als bei Messungen in Fichtenholz mit Abweichungen von -21,9 % erreicht wird. Auffallend ist, dass der Wassergehalt bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich auf etwa gleichbleibendem Niveau bewegt. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 22, links, dargestellt. Ein ähnliches (zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalschieit bzw. im frisch gespaltenen Holzschicht (Abbildung 22, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten des Holzes -18,8 %, an der Längsseite -19,9 %, am Originalschieit -20,7 % und am (dünneren) frisch gespaltenen Schicht -19,1 %.

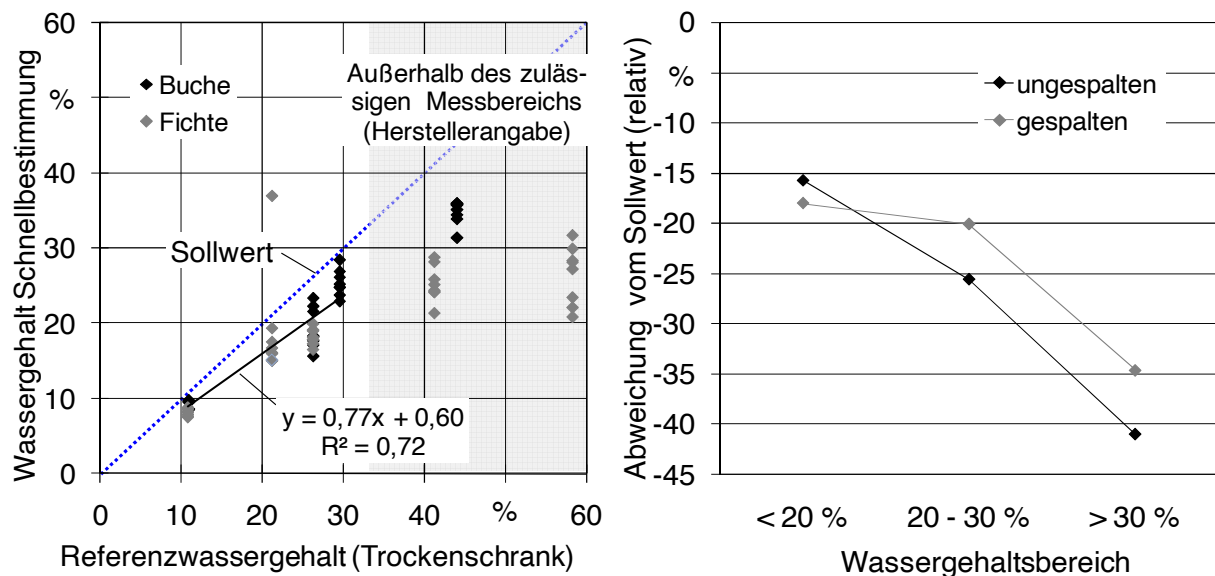


Abbildung 22: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Gann, Hydromette Compact S

#### 5.4.6 Gann Hydromette HT 65 mit Elektrode M 18

Das HYDROMETTE HT 65 ist ein elektronisches Holzfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz, insbesondere Schnittholz bis 180 mm Stärke, Spanplatten und Furnieren. Um auch Tiefenmessungen in starken und harten Hölzern bis 180 mm Dicke, wie bei Scheitholz üblich, durchführen zu können, wurde das Messgerät in Verbindung mit einer Ramm-Elektrode M 18 verwendet, bei der jeweils 10 Elektrodenspitzen (ohne Isolierung) mit 40 bzw. 60 mm Länge mitgeliefert wurden. Die Messungen nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei Elektroden erfolgten dabei mit den 40 mm langen Elektrodenspitzen.

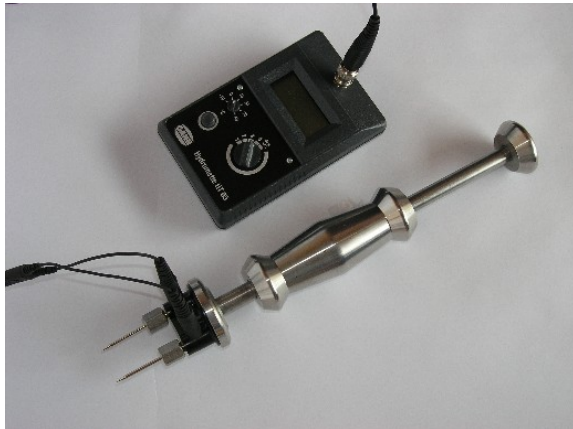


Abbildung 23: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Gann, Typ HT 65 mit Einschlagelektrode M 18

Das Gerät ist in der Standardversion auf vier Holzgruppen mit über 300 Holzarten vorprogrammiert und für eine Holztemperatur von +20 °C kalibriert, bei der auch die Messungen durchgeführt wurden. Bei anderen Temperaturen im Holz kann im Bereich von 0 °C bis +50 °C (dauerhaft) bzw. -10 °C bis +60 °C (kurzzeitig) gemessen werden, wobei dann eine Temperaturkorrektur erfolgen muss. Die tatsächliche, mit einem separaten Thermometer zu ermittelnde Holztemperatur, lässt sich dabei einfach mittels Drehschalter einstellen. Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 4 und 60 % Holzfeuchte, was einem Wassergehalt von 4 bis 38 % entspricht [22].

Für die Messungen in Fichtenholz muss laut Herstellerangabe am Wahlschalter die Holzgruppe „Position 3“ und bei Buchenscheitholz die „Position 2“ eingestellt werden, wobei vor den Messungen jeweils eine Batteriekontrolle durchgeführt wurde. Nachdem das Gerät mit der Ramm-Elektrode verbunden war, wurden die beiden Nadeln der Ramm-Elektrode M 18 mit dem Gleithammer quer zur Faser so eingeschlagen, dass die Elektrodenspitzen etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der gesamten Holzstärke eingedrungen waren. Nach Drücken der Messtaste konnte der Anzeigewert sofort abgelesen werden. Obwohl sich die Einschlagelektrode als relativ leichtgängig herausstellte, ist dieses Gerät im Vergleich zu Messgeräten mit Einstechnadeln aufwändiger zu bedienen, da sich die Kabelverbindung zwischen Gerät und Rammelektrode beim Einschlagen der Elektroden als hinderlich erweist und sich zudem manchmal gerade im Bereich der Rammelektrode lockert. Die Elektrodenspitzen erwiesen sich als stabil und auch für Hartholz geeignet, da sie sich während der Messungen nur leicht verbogen. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale An-



zeige gut möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung, da dadurch Ablesefehler vermieden werden. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der abfallenden Messwertanzeige sowie der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 38 % (Holzfeuchte 60 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -9,8 % bzw. -7,6 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sowohl bei Fichten- als auch bei Buchenholz relativ genaue Messwerte.

Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzsplit bei der Schnellbestimmung fast immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich auf etwa gleichbleibendem Niveau bewegt bzw. keine eindeutigen Tendenzen erkennbar sind. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 24, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls sehr gutes) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalsplit bzw. im frisch gespaltenen Holzsplit (Abbildung 24, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung sowohl bei Messungen an den Stirn- als auch Längsseite(n) der Holzsplitte -8,7 %, am Originalsplit -8,2 % und am (dünnen) frisch gespaltenen Split -9,2 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 38 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzsplit immer ungenauer wird (Abbildung 24). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

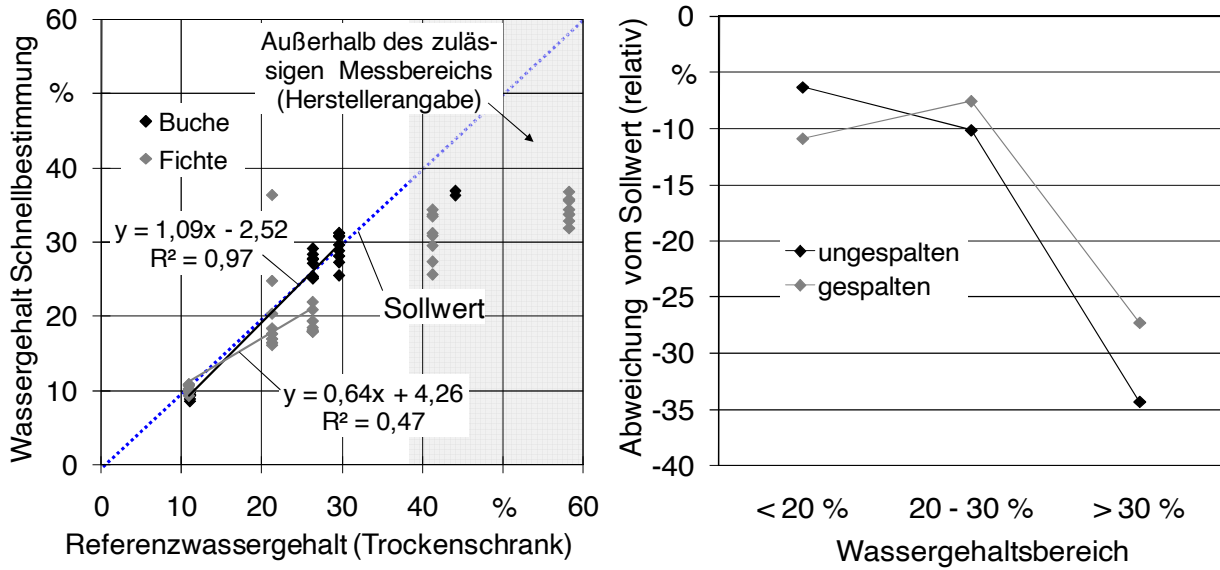


Abbildung 24: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abwei- chung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Gann, Hydromette HT 65 mit Elektrode M 18

#### 5.4.7 Greisinger GMH 3830 mit Elektrode GHE 91

Das GMH 3830 ist laut Herstellerangabe ein robustes Präzisionsmessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  bzw. des Wassergehaltes  $w$  (einstellbar) von Schnittholz, Spanplatten, Furnieren, Sägemehl, Holzspäne, Holzwolle, Flachs, Stroh, Heu, Beton, Gasbeton, Ziegel, Estrich, Putz, Kalkmörtel, Zementmörtel Papier, Karton, Textilien, Hackschnitzel, usw., welches für professionellen Einsatz geeignet ist. Für die Messung von Scheithölzern wurde das Messgerät in Verbindung mit einer Ramm-Elektrode GHE 91 eingesetzt; im Zubehör waren jeweils 3 Elektroden (Stahlstifte) mit 12, 16 und 25 mm Länge enthalten, wobei die Messungen mit den Stahlstiften der Länge 25 mm durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurde ein Temperaturfühler GTF 38 zur automatischen Temperaturkompensation verwendet. Zur Datenübertragung ist das Gerät zusätzlich mit einer seriellen Schnittstelle bzw. einem Analogausgang ausgestattet und es ist eine Auto-Hold-Funktion enthalten, die ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen ermöglicht. Der zulässige Messbereich bei Buchenholz liegt zwischen 5 und 85 % Holzfeuchte (Wassergehalt 5 bis 46 %) und bei Fichtenholz zwischen 6 und 101 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 50 %) sowie Umgebungstemperaturen von  $-25\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$  (Nenntemperatur  $+25\text{ °C}$ ). Das Gerät ist in der Standardversion auf 466 verschiedene Holzsorten und 28 verschiedene Baumaterialien vorprogrammiert. Zusätzlich zur Messung erfolgt gleichzeitig eine Feuchtebewertung (nass, feucht, trocken), so dass die Entscheidung „nass oder trocken“ nicht aus der Literatur hergeleitet werden muss [23].



Abbildung 25: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Greisinger, Typ GMH 3830 mit Einschlagelektrode GHE 91

Für die Messungen in Fichtenholz muss laut Herstellerangabe die Holzgruppe „h.136“ und bei Buchenscheitholz die Holzgruppe „h.86“ eingestellt werden, wobei mit der Schlagelektrode GHE 91 vor Beginn der Messungen ein Loch in das zu messende Holzscheit zu schlagen ist, um den Temperaturfühler GTF 38 zum automatischen Temperaturabgleich hineinzustecken. Wenn das Gerät mit der Schlagelektrode verbunden ist, werden die beiden Stahlstifte der Schlagelektrode GHE 91 mit dem Gleithammer quer zur Faser so eingeschlagen, dass die Elektrodenspitzen etwa  $\frac{1}{3}$  der gesamten Holzstärke eingedrungen sind, als optisches Symbol ist ein blinkendes %-Zeichen (nicht stabile Messwertanzeige) zu erkennen. Die unmittelbar darauf

folgende Messwertanzeige (gemessen wurde die Holzfeuchte  $u$ ) kann abgelesen werden, sobald im Display „HLD“ (stabiler Messwert) angezeigt wird. Die Messungen mit der Schlagelektrode sind im Vergleich zu Messungen mit Geräten, die mit Einstechnadeln arbeiten, aufwändiger zu bedienen, da sich die Kabelverbindung zwischen Gerät und Schlagelektrode beim Einschlagen der Elektroden als hinderlich erweist, was durch das zusätzliche Kabel für den Temperaturfühler noch verstärkt wird. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass sich der Temperaturfühler beim Einschlagen der Schlagelektroden nicht aus dem zu messenden Holzscheid löst. Hinzu kam, dass sich im Verlauf der Messungen der Schiebehammer an der Schlagelektrode mehr und mehr verklemmte, so dass das Einschlagen der Stahlstifte mit der Zeit nur noch mit großem Kraftaufwand möglich war, ursächlich hierfür war offensichtlich ein Metallspan, der sich an der Führungsschiene der Schlagelektrode gelöst hatte und sich in der Bohrung des Gleithammers verklemmte. Die Stahlstifte an der Schlagelektrode erwiesen sich dagegen als stabil und auch für Hartholz gut geeignet, da sie sich während der Messungen nicht verbogen. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige sehr leicht möglich. Vorteilhaft wäre es jedoch, wenn die gerade gemessene Holzart anstelle der verschlüsselten Kürzelanzeige als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Auto-Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bei der Messung von Fichtenholz bis zu einem Wassergehalt von 50 % (Holzfeuchte 101 %) und bei der Messung von Buchenholz bis zu einem Wassergehalt von 46 % (Holzfeuchte 85 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -2,3 % bzw. -9,5 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sowohl bei Fichten- als auch bei Buchenholz relativ genaue Messwerte, wobei das Messergebnis im Wassergehaltsbereich von weniger als 20 % noch besser ist. Hier ist mit relativen Abweichungen zum Sollwert von lediglich +1,0 % (Fichtenholz) und -5,2 % (Buchenholz) zu rechnen.

Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheid bei der Schnellbestimmung fast immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich nur geringfügig verändert, indem die Anzeige mit steigendem Wassergehalt im Holzscheid tendenziell ungenauer wird. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 26, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls sehr gutes) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheid bzw. im frisch gespaltenen Holzscheid (Abbildung 26, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -6,3 %, an der Längsseite -5,7 %, am Originalscheid -4,6 % (Vorzeichen bereinigt 7,1 %) und am (dünnen) frisch gespaltenen Scheit -6,9 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 46 bzw. 50 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheid immer ungenauer wird (Abbildung 26). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

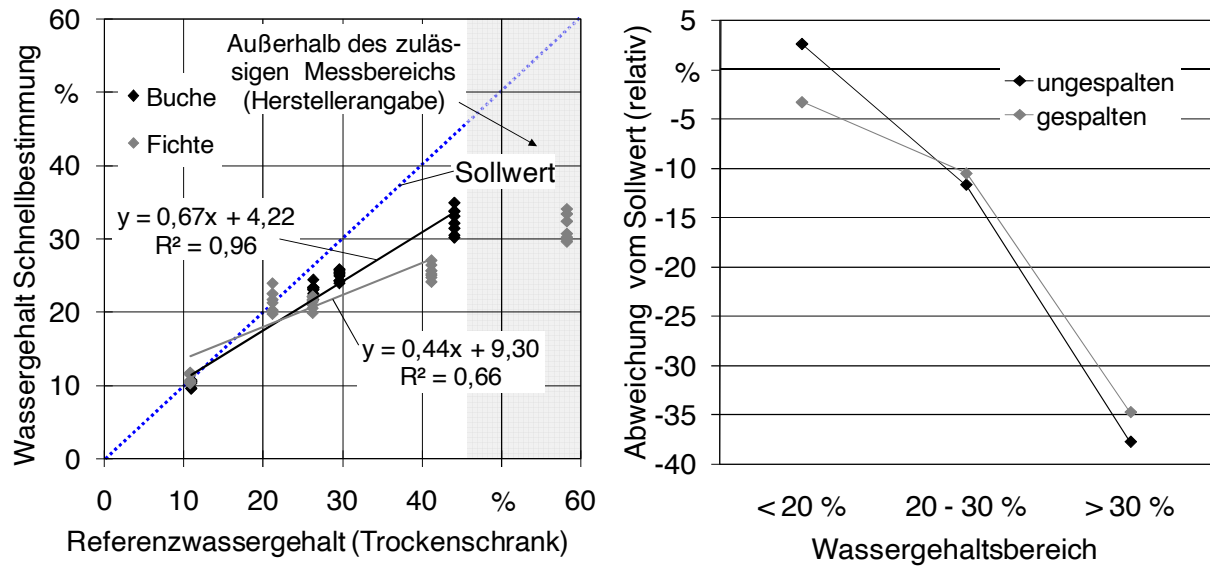


Abbildung 26: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasserergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Greisinger, GMH 3830 mit Elektrode GHE 91

#### 5.4.8 Greisinger GMR 100

Das GMR 100 ist ein Materialfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  bzw. des Wassergehaltes  $w$  (einstellbar) von Holz (Schnittholz, Brennholz, Holzbriketts), Spanplatten, Furnieren sowie Putz und Gips. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei integrierten Elektroden (Messnadeln).



Abbildung 27: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Greisinger, Typ GMR 100 mit Einstechnadeln

Das Gerät ist in der Standardversion auf vier gängige Holzgruppen (Holzgruppe A, B, C und D) mit insgesamt 130 Holzsorten, einer universellen Baustoffeinstellung E (Tabellen) sowie der Einstellmöglichkeit für Putz P vorprogrammiert. Der zulässige Messbereich liegt zwischen 0 und 100 % Holzfeuchte (Wassergehalt 0 bis 50 %), wobei bei der Messung eine individuelle Feuchtebewertung (nass, feucht, trocken) erfolgt. Die zulässigen Umgebungstemperaturen liegen zwischen  $-25\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$ , die Nenntemperatur beträgt  $+25\text{ °C}$ . Das Gerät ist zudem mit einer Auto-Hold Funktion ausgerüstet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen [24].

Für die Messungen musste neben der Temperatur des zu messenden Holzscheites (hier:  $+20\text{ °C}$ ), auch die Holzart eingestellt werden. Dies ist bei Fichtenholz laut Herstellerangabe die Holzart „C“ und bei Buchenholz die Holzart „B“. Beim Messen wurden die Elektroden (Messnadeln) quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt, in der Displayanzeige erscheint ein blinkendes %-Zeichen (nicht stabile Messwertanzeige). Die unmittelbar darauf folgende Messwertanzeige (gemessen wurde die Holzfeuchte  $u$ ) kann abgelesen werden, sobald im Display „HLD“ (stabiler Messwert) angezeigt wird. Das eckige Gerät hat sich beim Messen bedingt durch die eckige Bauform als nicht optimal erwiesen, da die eckigen Kanten beim (kraftaufwändigen) Hineindrücken der Elektroden ins Holz (insbesondere Hartholz) mit der Zeit Druckstellen verursachen. Das Gerät hat sich jedoch als sehr robust herausgestellt und die Messnadeln hielten auch hartem Holz stand und verbogen sich nicht. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige leicht möglich. Vorteilhaft wäre es jedoch, wenn die gerade gemessene Holzart anstelle der verschlüsselten Kürzelanzeige als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchte-

schnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Auto-Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 50 % (Holzfeuchte 100 %) erstreckt. Trotzdem ist der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -18,6 % bei der Messung in Fichtenholz und -28,7 % bei der Messung in Buchenholz deutlich zu niedrig. Auffallend ist, dass der Wassergehalt bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert mit steigendem Wassergehalt im Holz scheinbar teilweise erhöht. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 28, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalszett bzw. im frisch gespaltenen Holzszett (Abbildung 28, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzszette -22,5 %, an der Längsseite -24,1 %, am Originalszett -23,3 % und am (dünnen) frisch gespaltenen Szett -24,8 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 50 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzszett immer ungenauer wird (Abbildung 28). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

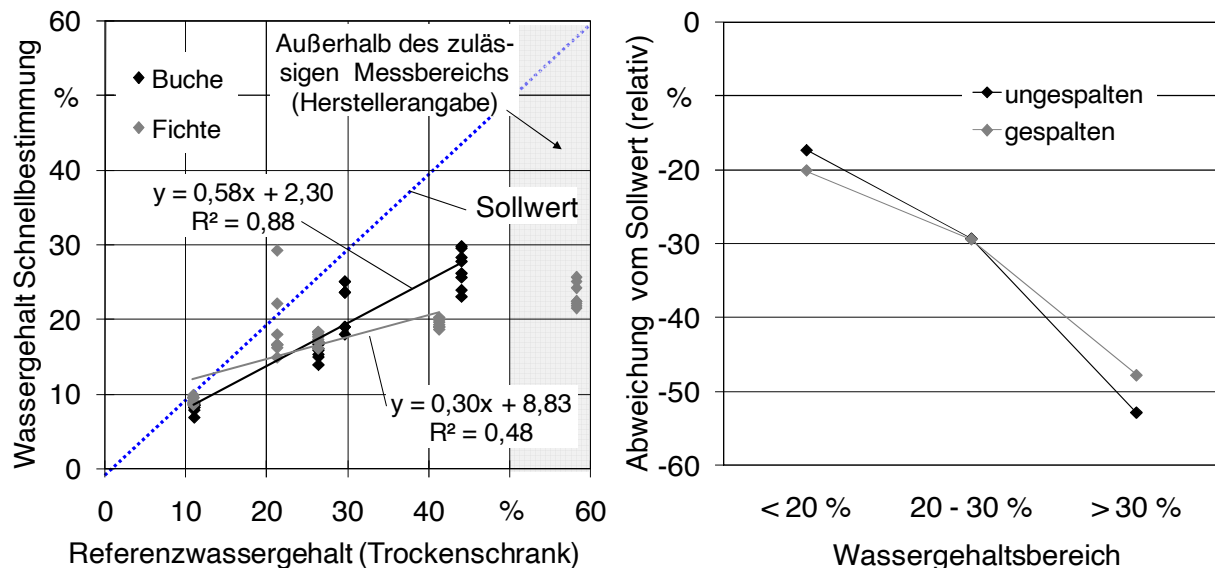


Abbildung 28: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Greisinger, GMR 100

### 5.4.9 HEDÜ 2 in 1

Das 2 in 1 ist ein Materialfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz und Baustoffen. Das Messgut kann durch Änderung der Geräteeinstellung entweder im „Nadelmodus“ durch die 12 mm langen Elektroden (Einstecknadeln) oder für eine zerstörungsfreie Oberflächenmessung im „Suchermodus“ durch Anlegen der Messfläche (Kondensatorplattenoberfläche) an das Holzsplit eingesetzt werden. Das Gerät wurde in beiden Messprinzipien getestet, die nachfolgend näher beschrieben werden.



Abbildung 29: Feuchtemessgerät Fabrikat HEDÜ, Typ 2 in 1, mit Einstecknadeln (links) bzw. mit Kondensatorplatte für Messung im Suchermodus (rechts)

Für das Messen im Nadelmodus ist das Gerät in der Standardversion mit neun Materialgruppen (Cd00 bis Cd07 für verschiedene Holzsorten, Cd08 für Spanplatte und Papier, Cd09 für Kalksandstein, Beton, Estrich) und für das Messen im Suchermodus mit 20 Materialgruppen (Cd03 bis Cd13 für die verschiedenen Holzsorten, Cd15 und Cd16 für Kalksandstein, Sand, Ziegel, Cd17 bis Cd20 für Beton, Putz, Estrich, Granit) vorprogrammiert. Weiterhin ist das Gerät zur automatischen Temperaturkompensation mit einer Nullpunktkorrektur und zusätzlich mit einer HOLD Funktion ausgerüstet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen. Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 0 und 80 % Holzfeuchte (Wassergehalt 0 bis 44 %) und Umgebungstemperaturen von 0 °C bis +50 °C [26].

Für die Messungen im Nadelmodus musste laut Herstellerangabe sowohl für Fichten- als auch für Buchenscheitholz die Holzgruppe „Cd02“ eingestellt werden, wobei vor den Messungen jeweils eine Nullpunktkorrektur durchgeführt wurde. Beim Messen wurden die Elektroden (Einstecknadeln) quer zur Faser mit Druck etwa sechs Millimeter in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Die Messnadeln als separates Bauteil erwiesen sich dabei, bedingt durch die runde Bauform, als sehr handlich und gut einsteckbar. Die Nadelspitzen hielten auch hartem Holz stand und verbogen sich bis zum Ende der Messreihe nur leicht. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige sehr einfach möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung,



da dadurch Ablesefehler vermieden werden. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der leicht abfallenden Messwertanzeige in nassem Holz sowie der gegebenen Messgenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

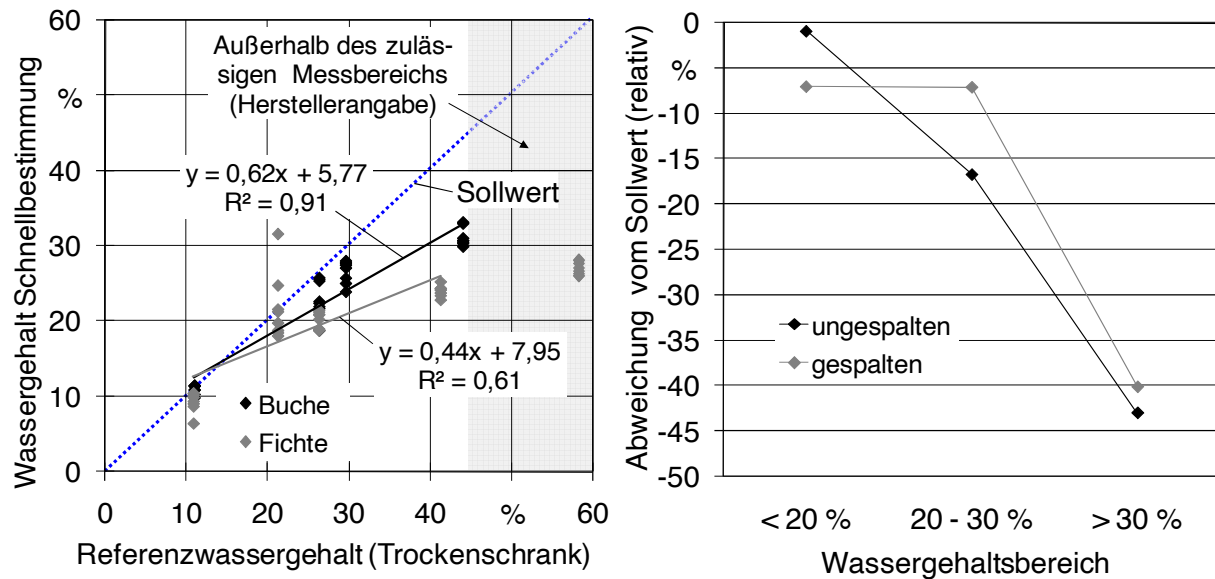


Abbildung 30: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät HEDÜ, 2 in 1 Nadelmodus

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30% beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 44% (Holzfeuchte 80%) erstreckt. Hier liefert die Schnellbestimmung bei der Messung von Buchenholz mit einer relativen Abweichung vom Sollwert von -5,9% relativ genaue Werte. Die Messergebnisse bei der Messung in Fichtenholz sind dagegen mit einer Abweichung von -12,0% deutlich ungenauer. Auffallend ist, dass der Wassergehalt bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die relative Abweichung zum Sollwert im untersuchten Wassergehaltsbereich auf etwa gleichbleibendem Niveau bewegt. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 30, links, dargestellt. Ein ähnliches Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalschicht bzw. im frisch gespaltenen Holzschicht (Abbildung 30, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzschicht -12,1%, an der Längsseite -7,9%, am Originalschicht -8,8% und am (dünnere) frisch gespaltenen Schicht -7,0%. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 44% angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit stei-

gendem Wassergehalt im Holzsplit immer ungenauer wird (Abbildung 30). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

Für die Messungen im Suchermodus musste laut Herstellerangabe für Fichtenholz die Holzgruppe „Cd06“ als für Buchenscheitholz die Holzgruppe „Cd11“ eingestellt werden, wobei vor den Messungen jeweils eine Nullpunktkorrektur durchgeführt wurde, bei der das Gerät frei in die Luft gehalten wurde. Beim Messen wurde die Messfläche (Kondensatorplattenoberfläche) mit leichtem Druck senkrecht auf die zu messende Oberfläche gedrückt. Dabei wurde angestrebt, dass die Auflagefläche, wie vom Hersteller vorgegeben, möglichst eben und glatt war, wobei dies durch die vorgegebenen Messpunkte auf den gespaltenen und dadurch nicht gleichförmigen Holzspliten meist nicht gegeben war. Dadurch lag die Kondensatorplattenoberfläche am Scheitholz oft nicht vollständig auf, wodurch – angesichts des verwendeten Messprinzips – von einer Verfälschung des Messergebnisses ausgegangen werden kann. Durch den geringen erforderlichen Anpressdruck und die handliche Bauform war das Gerät leicht und sicher zu bedienen. Analog zum Messen mit Einstechnadeln war auch hier eine Ablesung des Messwertes bedingt durch die digitale Anzeige sehr gut möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre auch hier für den Bediener die bessere Lösung. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der abfallenden Messwertanzeige vor allem in nassem Holz sowie den gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen unserer Untersuchungen auch Messungen im nassen Holz durchgeführt wurden, haben wir uns bei der vergleichenden Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 44 % (Holzfeuchte 78 %) erstreckt. Trotzdem ist der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -46,4 % bei der Messung in Fichtenholz und -35,1 % bei der Messung in Buchenholz deutlich zu niedrig. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzsplit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzsplit verschlechtert. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 31, links, dargestellt. Ein ähnliches (ebenfalls deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten erzielt. Zwar beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzsplit mit -13,8 % lediglich einen Bruchteil der Abweichung gegenüber Messungen an der Längsseite mit einer Abweichung von -49,7 %, trotzdem ist eine ausreichende Messgenauigkeit auch dort nicht gegeben. Auch liefert die Messung am Originalsplit mit Abweichungen von -51,5 % ein ähnlich (ungenaueres) Ergebnis wie am (dünnen) frisch gespaltenen Split mit -48,0 %. Dieser Zusammenhang ist, in Abhängigkeit des Wassergehaltes, in Abbildung 31, rechts, dargestellt. Augenscheinlich ist hier festzustellen, dass, je glatter die Oberfläche des Holzes ist (z. B. geschnittene Stirnseite gegenüber gespaltenen Längsseite oder relativ glatte Buchensplitfläche gegenüber wellige Fichtensplitfläche), desto besser ist das Messergebnis. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Aus-

wertung mit einfluss, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 44 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit immer noch ungenauer wird (Abbildung 31). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchte-schnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt. Eine Sollwertabweichung aus der Schnellbestimmung in der Größenordnung von -40 % wird als deutlich zu ungenau und nicht mehr anwendbar angesehen.

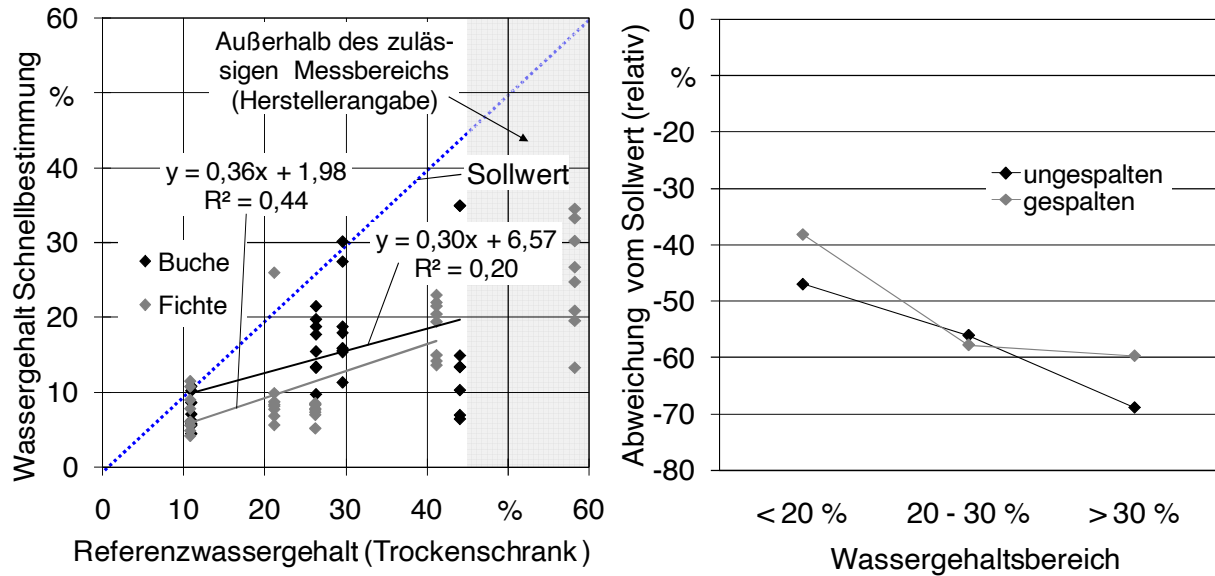


Abbildung 31: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät HEDÜ, 2 in 1 Suchermodus

#### 5.4.10 Lignomat maxiLigno mit Elektrode E 12

Das maxiLigno ist laut Herstellerangabe ein Präzisionsmessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz. Für die Messung von Scheithölzern wurde das Messgerät in Verbindung mit einer Ramm-Elektrode E 12+ eingesetzt. Der zulässige Messbereich liegt zwischen 6 und 75 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 43 %) sowie bei Umgebungstemperaturen von  $-30\text{ °C}$  bis  $+40\text{ °C}$ , wobei die Temperatur des zu messenden Holzscheites am Gerät eingestellt werden muss. Das Gerät ist in der Standardversion auf 28 gängige Holzarten sowie vier Dichtegruppen von über 240 Holzarten vorprogrammiert [27].



Abbildung 32: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Lignomat, Typ maxiLigno mit Einschlagelektrode E 12

Neben der Eingabe der Temperatur des zu messenden Holzscheites von  $+20\text{ °C}$  muss laut Herstellerangabe für die Messungen die Holzgruppe „Fichte“ für Fichtenholz und „Buche“ für Buchenholz eingestellt werden. Nachdem das Gerät mit der Ramm-Elektrode verbunden war, wurden die beiden Spitzen der Ramm-Elektrode E 12+ mit dem Gleithammer quer zur Faser so eingeschlagen, bis die Elektrodenspitzen ca.  $\frac{1}{3}$  der gesamten Holzstärke eingedrungen waren. Nach Drücken der Anzeigetaste kann der Messwert sofort abgelesen werden. Im Vergleich zu anderen Geräten mit Rammelektrode zeigte dieses Gerät als sehr gut zu bedienen, da sowohl die Elektroden sehr leicht ins Holz eindringen, das Kabel sich nicht beim Einschlagen in der Buchse lockert und der Kabelanschluss am oberen Ende der Rammelektrode positioniert ist, so dass das Kabel beim Einschlagen nicht hinderlich ist. Die Elektrodenspitzen erwiesen sich aber als etwas zu schwach bzw. zu lang, da sich diese beim Einschlagen in Hartholz zuerst verbogen und dann im Extremfall auch abbrechen. Sehr positiv empfunden wurde die Klartextanzeige mit der gemessenen Holzart im Display. Eine Fehlerquelle durch eine falsche Kodeeingabe ist hier minimiert. Auch war die Ablesung des Messwertes, der sich sehr schnell auf einen ablesbaren Wert einstellte, durch die digitale Anzeige sehr gut möglich. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte aber auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 43 % (Holzfeuchte 75 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -6,6 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, bei Fichtenholz recht genaue Messwerte, bei Buchenholz liegt diese jedoch mit -13,7 % deutlich schlechter. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit verschlechtert. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 33, links, dargestellt. Ein ähnliches Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 33, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -9,7 %, an der Längsseite -10,3 %, am Originalscheit -10,6 % und am (dünneren) frisch gespaltenen Scheit -9,9 %. Im höheren Wassergehaltsbereich über 30 %, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 50 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit immer noch ungenauer wird (Abbildung 33). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

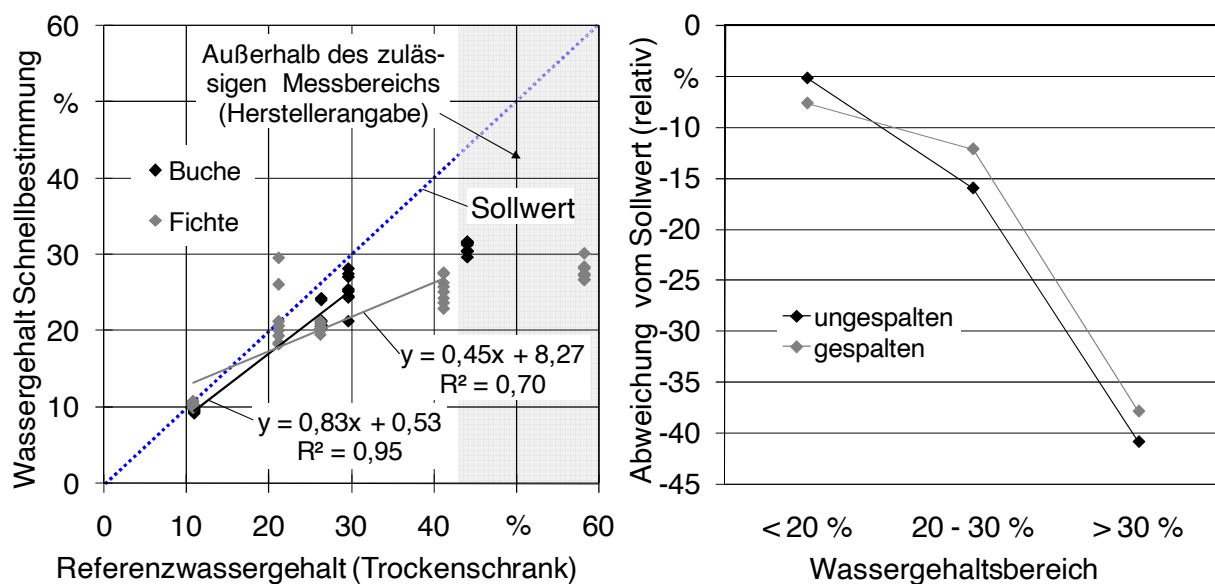


Abbildung 33: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Lignomat, maxiLigno mit Elektrode E 12

#### 5.4.11 Lignomat mini X

Das Feuchtigkeitsmessgerät mini X ist ein digitales Handmessgerät zur ausschließlichen Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz, wobei 4 Standardholzgruppen und 16 verschiedene Holzarten werkseitig vorprogrammiert sind. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei Elektroden (Spitzen). Es ist auf eine Temperatur von  $+20\text{ °C}$  kalibriert und der zulässige Messbereich liegt zwischen 6 und 75 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 43 %) [28].



Abbildung 34: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Lignomat, Typ mini X mit Einstechnadeln

Für die Messungen in Fichtenscheitholz muss laut Herstellerangabe die Holzart „10“ und für Buchenscheitholz die Holzart „08“ eingestellt werden. Beim Messen wurden die Elektroden (Spitzen) quer zur Faser so weit in das Holz eingedrückt, bis die Taste zwischen den Messspitzen aktiviert wird und der Anzeigewert abgelesen werden kann. Eine Temperaturkorrektur war nicht erforderlich, da die Messungen bei einer Temperatur (sowohl Holz als auch Umgebungstemperatur) von  $+20\text{ °C}$  durchgeführt wurden. Bedingt durch die abgerundeten Ecken ist das Gerät trotz eckiger Bauform angenehm zu bedienen. Auch lässt sich das Messgerät durch die sehr kurzen und stabilen Elektroden (Spitzen) sehr leicht in das Holz eindrücken und es ist nur ein geringer Andruck erforderlich. Die Messspitzen hielten dabei auch hartem Holz stand. Durch die sehr kurzen Elektroden und deren relativ großen Abstand war jedoch ein Einstechen speziell bei unregelmäßig geformtem Holz manchmal nur schwierig zu realisieren, da das Gehäuse dann oft bereits am zu messenden Holz auflag. Auch findet in dem Fall keine Aktivierung der Taste zwischen den beiden Messspitzen mehr statt, wodurch eine Messung an einem solchen Messpunkt nicht erfolgen kann. Die Ablesung des Messwertes, der sich sehr schnell auf einen ablesbaren Wert einstellte, ist durch die digitale Anzeige sehr einfach möglich. Vorteilhaft wäre jedoch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 %

beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 43 % (Holzfeuchte 75 %) erstreckt. Trotzdem ist der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -28,4 % bei der Messung in Fichtenholz und -32,7 % bei der Messung in Buchenholz deutlich zu niedrig. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit verschlechtert. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 35, links, dargestellt. Ein ähnliches (deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 35, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -33,2 %, an der Längsseite -29,6 %, am Originalscheit -30,9 % und am (dünnen) frisch gespaltenen Scheit -28,3 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 43 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit immer noch ungenauer wird (Abbildung 35). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt. Eine Sollwertabweichung aus der Schnellbestimmung in der Größenordnung von -30 % wird als deutlich zu ungenau und nicht mehr anwendbar angesehen.

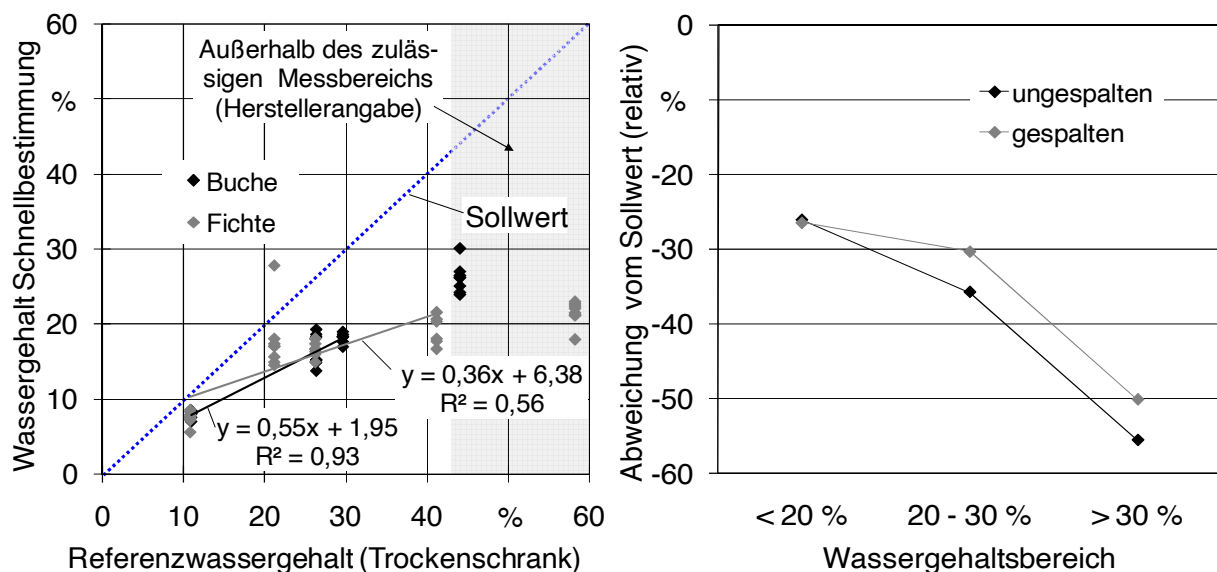


Abbildung 35: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Lignomat, mini X

#### 5.4.12 PCE FME mit Fühler NF 4-17

Das FME ist, je nach Zubehör, ein Materialfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz, Baustoffen, Holzspänen und –staub, Kaffeebohnen, Papier, Furnier, Sägemehl und einiges mehr. Zur Messung von Scheitholz wurde das Messgerät in Verbindung mit einem 4-Nadel-Fühler K-NF4-17 mit einer Nadellänge von 17 mm eingesetzt. Der zulässige Messbereich liegt zwischen 5 und 99 % Holzfeuchte (Wassergehalt 5 bis 50 %) sowie bei Materialtemperaturen von 0 °C bis +50 °C. Im Gerät sind in der Standardversion 500 Kennlinien für Holzarten, Baumaterialien und Papiere hinterlegt. Weiterhin ist das Gerät mit einer Speichermöglichkeit für bis zu 50 Messwerte ausgestattet [29].



Abbildung 36: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat PCE, Typ FME mit Fühler NF 4-17

Neben der Eingabe der Temperatur des zu messenden Holzscheites von +20 °C muss laut Herstellerangabe für die Messungen die Holzart „196“ für Fichtenholz und „149“ für Buchenholz eingestellt werden. Beim Messen wurden die Elektroden (Fühlernadeln) wenn möglich bis etwa  $\frac{1}{3}$  der gesamten Holzstärke quer zur Faser eingedrückt, wobei dies bei Hartholz aufgrund der hohen Materialdichte nicht erreicht werden konnte. Sobald der Anzeigewert stabil war konnte dieser abgelesen werden. Der Fühler als separates Bauteil hat sich bedingt durch die rundliche Bauform als sehr handlich und robust erwiesen, jedoch konnten die vier Nadelspitzen nur mit großem Kraftaufwand in Hartholz gedrückt werden. Der Forderung, wonach die Fühler bis  $\frac{1}{3}$  der Materialstärke eingedrückt werden sollen, konnte bei der Messung in Hartholz in keinem Fall nachgekommen werden. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige sehr gut möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Bei der Ablesung wurde daher entsprechend der Herstellervorgabe so lange gewartet, bis der Anzeigewert relativ stabil war. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung, da dadurch Ablesefehler ausgeschlossen werden. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der abfallenden Messwertanzeige sowie der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden.



Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 50 % (Holzfeuchte 99 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -8,2 % bzw. -6,8 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sowohl bei Fichten- als auch bei Buchenholz relativ genaue Messwerte, wobei das Messergebnis im Wassergehaltsbereich zwischen 20 und 30 % eher noch besser ist als bei weniger als 20 %. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 37, links, dargestellt. Ein ähnliches (brauchbares) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalschieit bzw. im frisch gespaltenen Holzschieit (Abbildung 37, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirn- und auch Längsseite(n) der Holzschieite -7,5 %, am Originalschieit -8,4 % und am (dünnere)n frisch gespaltenen Schieit -6,6 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 50 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzschieit deutlich ungenauer wird (Abbildung 37). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchte-schnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

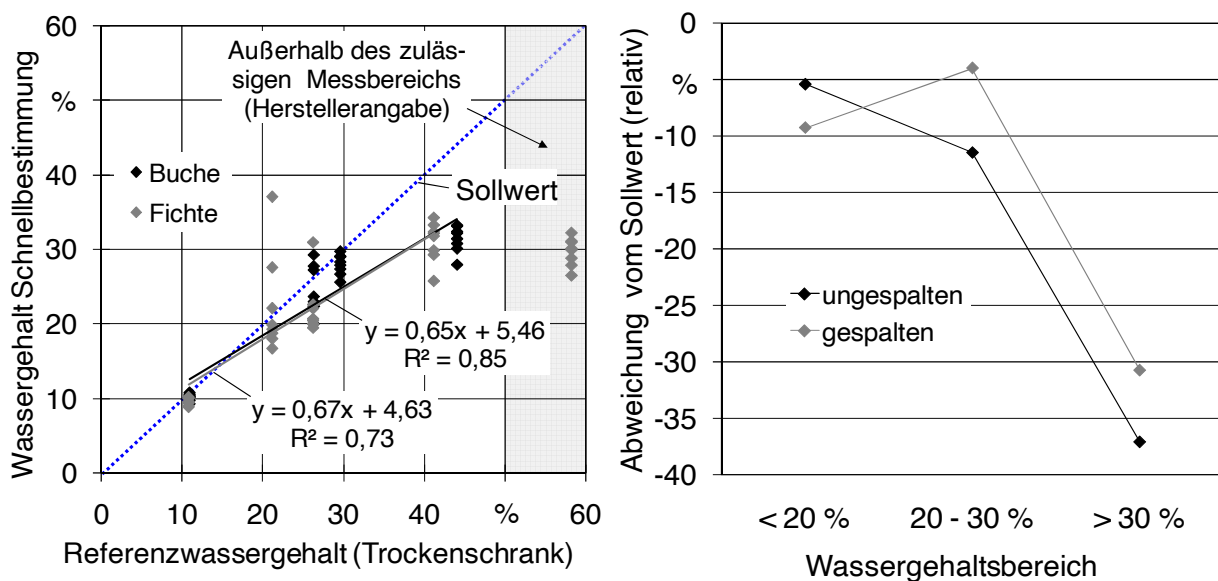


Abbildung 37: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät PCE, FME mit Fühler NF 4-17

### 5.4.13 PCE – 333

Das PCE-333 (augenscheinlich baugleich mit TROTEC T 60) ist laut Herstellerangabe ein sehr einfach zu bedienendes Feuchtemessgerät für orientierende Messungen des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz. Neben gesägtem Bauholz und gespaltenen Brennholz kann das Gerät auch eingeschränkt für Papier, Kartonagen und Baumaterialien wie Pflaster, Beton, usw. genutzt werden. Dabei arbeitet das Messgerät nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei Elektroden (Nadeln). Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 6 und 44 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 31 %) und Umgebungstemperaturen von 0 °C bis +40 °C, wobei das Gerät auf eine Holztemperatur von +20 °C kalibriert ist. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen [30].



Abbildung 38: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat PCE, Typ PCE-333 mit Einstechnadeln

Nach erfolgter Funktions- und Batteriekontrolle wurden die Elektroden (Nadeln) bei einer Umgebungs- und auch Holztemperatur von +20 °C quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Einstechelektroden hielten auch hartem Holz stand und verbogen sich nicht, wenngleich bedingt durch die relativ dicken Elektroden ein größerer Anpressdruck erforderlich war. Die Ablesung des Messwertes war durch die analoge Balkenanzeige sehr übersichtlich gestaltet, da gerade und auch ungerade Anzeigewerte unterschiedlich dargestellt werden. Dennoch war die Ablesung nicht ganz einfach durchzuführen, da sich der Anzeigewert mit dem Anpressdruck des Messgerätes ans Holzscheit verändert und dadurch vom Bediener beeinflusst werden kann. Hiermit ist eine zusätzliche Messunsicherheit verbunden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchung auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dies deckt sich in etwa mit der Angabe des Herstellers, wonach das Gerät bis zu einem Wassergehalt von 31 % (Holzfeuchte 44 %) eingesetzt werden kann. Mit einer über alle untersuchten Holzarten mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -10,0 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, auf den ersten Blick gerade noch

brauchbare Messwerte, wobei Messungen in Buchenholz bei Abweichungen von -5,9 % augenscheinlich ein deutlich besseres Ergebnis liefern als Messungen in Fichtenholz mit Abweichungen von -14,2 %. Auffallend ist jedoch, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung im Wassergehaltsbereich unter 20 % eher überschätzt, ansonsten aber immer unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit deutlich verschlechtert. Dadurch gleichen sich positive und negative Messabweichungen teilweise aus, so dass der Mittelwert der Abweichungen günstiger erscheint. Ohne Beachtung des Vorzeichens liegt der Betrag der mittleren relativen Abweichung bei der Messung in Buchenscheiten bei einem wesentlich ungünstigeren Wert von 11,4 %. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 39, links, dargestellt. Ein ähnliches (nur bei bestimmten Parametern brauchbares) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 39, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -16,6 %, an der Längsseite -7,9 % (Vorzeichen bereinigt 12,6 %), am Originalscheit -9,0 % (Vorzeichen bereinigt 12,6 %) und am (dünnen) frisch gespaltenen Scheit -6,7 % (Vorzeichen bereinigt 12,6 %), wobei sich die besseren Messwerte ausschließlich durch die relativ genauen Messungen am trockenen Holz mit einem Wassergehalt unter 20 % ergeben.

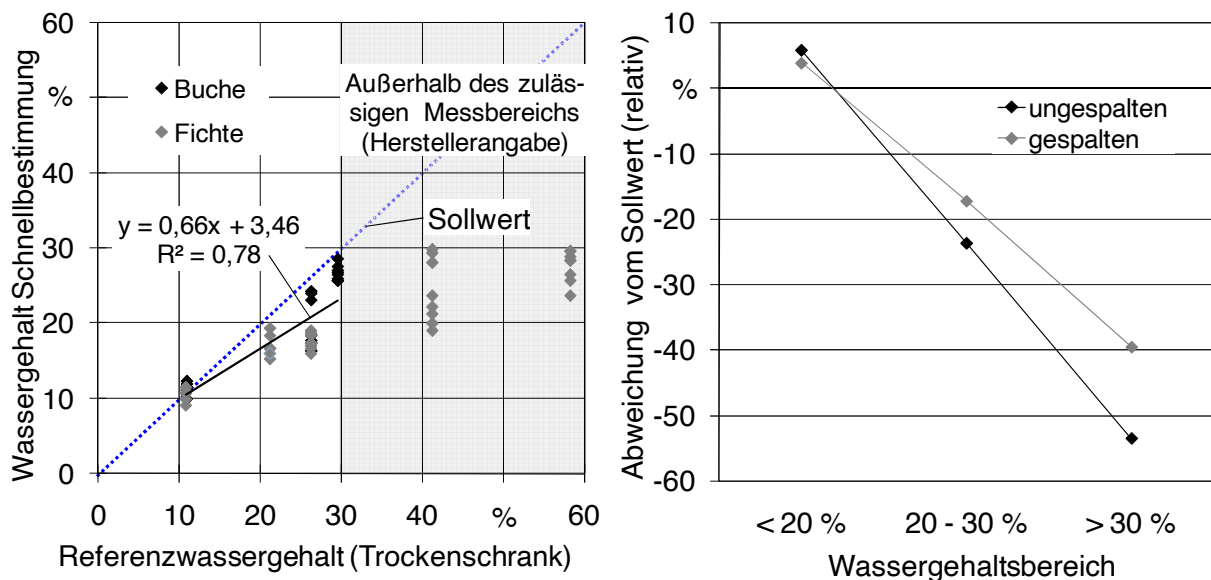


Abbildung 39: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät PCE, PCE-333

#### 5.4.14 Schaller humimeter BLW

Das humimeter BLW ist laut Herstellerangabe ein Scheitholzfeuchtemessgerät, das besonders für Messungen bei hohem Wassergehalt und großer Messtiefe geeignet ist und in Verbindung mit einer Rammelektrode betrieben wird. Die Bedienungsanleitung hierzu ist jedoch äußerst verwirrend, da sowohl von der Messung der Holzfeuchte als auch von der Messung des Wassergehaltes gesprochen wird und auf die unterschiedliche Definition dieser beiden Begriffe (vgl. Kapitel 2.1) nicht hingewiesen wird. Das Gerät ist mit einer automatischen Temperaturkompensation sowie einer Hold-Funktion ausgestattet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen. Darüber hinaus kann das Gerät zur Datenübertragung optional mit einer PC-Schnittstelle, Software, Datenlinkkabel und Drucker ausgestattet werden. Der zulässige Messbereich bei Buchenholz liegt zwischen 11 und 150 % Holzfeuchte (Wassergehalt 10 bis 60 %) sowie bei Umgebungstemperaturen von -10 °C bis +50 °C. Im Gerät ist eine Holzsortenliste einprogrammiert, die laufend erweitert wird [31].



Abbildung 40: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Schaller, Typ humimeter BLW mit Rammeelektrode

Nachdem das Gerät zur Erhöhung der Messgenauigkeit etwa vier Minuten lang warm gelaufen ist, erfolgt die Einstellung der Holzart Fichte bzw. Buche. Sobald das Gerät mit der Ramm-Elektrode verbunden wird, werden die beiden Nägel der Ramm-Elektrode mit dem Gleithammer quer zur Faser so eingeschlagen, dass die Elektrodennägel etwa  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der gesamten Holzstärke eingedrungen sind. Der Messwert kann dann sofort abgelesen werden. Obwohl sich die Ramm-Elektrode als relativ leichtgängig herausstellte, ist dieses Gerät im Vergleich zu Messgeräten mit Einstechnadeln aufwändiger zu bedienen, da sich die Kabelverbindung zwischen Gerät und Rammeelektrode beim Einschlagen der Elektroden als hinderlich erweist und sich zudem manchmal gerade im Bereich der Rammeelektrode lockert. Die Elektrodenspitzen stellten sich als stabil und auch für Hartholz gut geeignet heraus, da sie sich während der Messungen nicht verbogen. Als sehr positiv empfunden wurde die Klartextanzeige, mit der die gemessene (eingestellte) Holzart angezeigt wird und zudem eine farbliche Abstufung der Anzeigewerte zwischen trockenem (Anzeige in schwarzer Farbe) und noch nicht trockenem Holz (Anzeige in grauer Farbe) erfolgt. Durch die permanente Anzeige der gemessenen Holzart ist eine mögliche Fehlerquelle durch fal-

sche Kodeeingabe ausgeschlossen. Auch war die Ablesung des Messwertes, der sich sehr schnell auf einen ablesbaren Wert einstellte, durch die digitale Anzeige sehr leicht möglich. Aufgrund der gegebenen Messgenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Anzeige der Nachkommastelle verzichtet werden. Negativ ist, dass in der beigelegten Bedienungsanleitung die Begriffe „Holzfeuchte und Wassergehalt“ immer wieder vermischt werden, so dass der Kunde nicht abschließend beurteilen kann, welcher der beiden Parameter wirklich gemessen wird (vgl. Kapitel 2.1). Auf Nachfrage beim Hersteller wurde gegenüber dem TFZ bestätigt, dass das Gerät den Wassergehalt  $w$  und nicht – wie in der Bedienungsanleitung mehrfach angegeben – die Holzfeuchte  $u$  misst. Somit wurde der Anzeigewert als Wassergehalt interpretiert. Die Hold-Funktion wurde in den Versuchen nicht angewandt, da die Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 60 % (Holzfeuchte 150 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -4,6 % bzw. -1,2 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sowohl bei Fichten- als auch bei Buchenholz auf den ersten Blick sehr genaue Messwerte. Auffallend ist jedoch, dass das Messergebnis im Wassergehaltsbereich zwischen 20 und 30 % oft überschätzt, und im Wassergehaltsbereich unter 20 % immer unterschätzt wird und der Anzeigewert mit steigendem Wassergehalt im Holzsplit bis zu einem maximalen Wassergehalt von 30 % tendenziell eher genauer wird. Dadurch gleichen sich positive und negative Messabweichungen bei der Mittelwertbildung teilweise aus, so dass der Mittelwert der Abweichungen günstiger erscheint. Ohne Beachtung des Vorzeichens liegt der Betrag der mittleren relativen Abweichung bei der Messung in Fichtenspliten bei 7,2 % und in Buchenspliten bei 6,7 %. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 41, links, dargestellt. Ein ähnliches (als Einzelwert weniger gutes und im Mittel sehr gutes) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalsplit bzw. im frisch gespaltenen Holzsplit (Abbildung 41, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzsplit -4,0 % (Vorzeichen bereinigt 15,7 %), an der Längsseite -2,5 % (Vorzeichen bereinigt 4,0 %), am Originalsplit +1,3 % (Vorzeichen bereinigt 2,4 %) und am (dünnen) frisch gespaltenen Split -6,3 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 60 % angibt, ist eindeutig erkennbar, dass, anders als bei allen anderen getesteten Messgeräten, das Messergebnis in etwa der Genauigkeit von trockenem Holz entspricht bzw. tendenziell sogar bessere Messwerte liefert (Abbildung 41). Die Grundsatzaussage, dass ein hoher Wassergehaltsbereich bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr liefert, trifft bei diesem Gerät somit offenbar nicht zu.

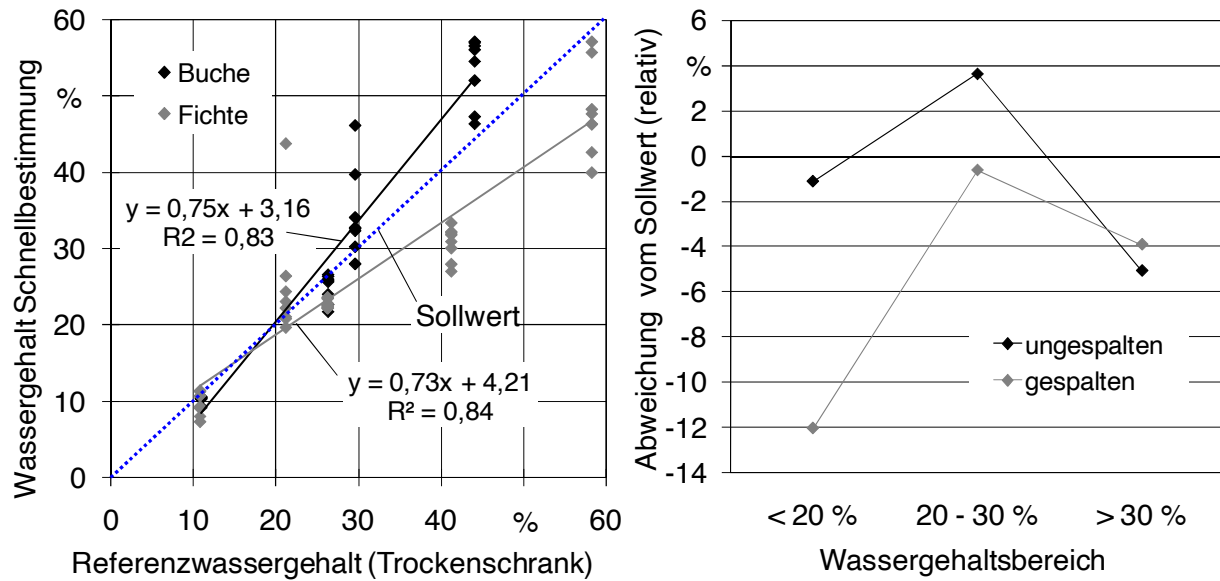


Abbildung 41: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Schaller, humimeter BLW (Interpretation der abgelesenen Messwerte als Wassergehalt w)

#### 5.4.15 testo 606-1

Das testo 606-1 ist laut Herstellerangabe ein Materialfeuchtemessgerät für Holz und Baustoffe, welches nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei integrierten Messelektroden arbeitet. Das Gerät ist in der Standardversion auf zwei gängige Holzgruppen (Holzgruppe 1 und 2) mit insgesamt 12 Holzsorten, zwei Materialgruppen zur Estrichmessung (Gruppe 3 und 4), zwei Materialgruppen zur Messung von Mörtel (Gruppe 5 und 6) und einer Materialgruppe zur Messung von Ziegel (Gruppe 7) vorprogrammiert und kann im Temperaturbereich von  $-10\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$  eingesetzt werden. Der zulässige Messbereich bei der Holzfeuchte liegt zwischen 0 und 90 %, was einem Wassergehalt von 0 bis 48 % entspricht. Die Bedienungsanleitung hierzu ist jedoch fehlerhaft und irreführend, da darin ausschließlich von der Messung der Holzfeuchte gesprochen wird, auf Nachfrage beim Hersteller jedoch mitgeteilt wurde, dass in Wirklichkeit nicht die Holzfeuchte, sondern der Wassergehalt gemessen wird (zur Definition dieser beiden Begriffe vgl. Kapitel 2.1). Insofern wurde – entgegen der Beschreibung in der Bedienungsanleitung – der Anzeigewert als Wassergehalt  $w$  und nicht als Holzfeuchte  $u$  interpretiert. Das Gerät ist zusätzlich mit einer Hold-Funktion ausgestattet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen [32].



Abbildung 42: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat testo, Typ 606-1 mit Einstechnadeln

Für die Messungen musste laut Herstellerangabe sowohl für Fichten- als auch für Buchenscheitholz das Materialsymbol Holz und die Materialnummer „1“ eingestellt werden, wobei vor den Messungen jeweils eine Funktionskontrolle durchgeführt wurde. Bei einer Umgebungstemperatur von  $+20\text{ °C}$  wurden die Messelektroden quer zur Faser mit Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Messnadeln hielten auch hartem Holz stand und ein Verbiegen kam bis zum Ende der Messreihe nicht vor. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige sehr gut möglich, gestaltete sich jedoch schwierig, da der Anzeigewert vor allem in nassem (außerhalb des zulässigen Messbereichs) aber auch in trockenem Holz stetig abfiel. Weiterhin sprang der Anzeigewert in nassen und vorgetrockneten Holz manchmal kurzzeitig auf unrealistische Werte (z. B. von 30 auf 13 %). Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung, da dadurch Ablesefehler ausgeschlossen werden. Vorteilhaft wäre

auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der abfallenden Messwertanzeige sowie der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 48 % (Holzfeuchte 90 %) erstreckt. Mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von +2,3 % bzw. +6,2 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sowohl bei Fichten- als auch bei Buchenholz relativ genaue Messwerte, wobei der Wassergehalt des Holzscheites etwas überschätzt wird. Dies ist wohl dadurch begründet, dass der angezeigte Messwert, entgegen der Beschreibung in der Bedienungsanleitung, als Wassergehalt  $w$  und nicht als Holzfeuchte  $u$  kalibriert worden war. Die Messgenauigkeit im Wassergehaltsbereich zwischen 20 und 30 % entspricht in etwa der bei weniger als 20 %. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 43, links, dargestellt. Ein ähnliches Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalschieit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 43, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite +5,7 %, und an der Längsseite sowie auch am Originalschieit und am (dünnenen) frisch gespaltenen Scheit +3,8 %. Bei der Messung an den Stirnseiten der Holzscheite kommt es teilweise jedoch auch zu einer Unterschätzung der Messergebnisse. Dadurch gleichen sich positive und negative Messabweichungen bei der Mittelwertbildung teilweise aus, so dass der Mittelwert günstiger erscheint. Ohne Beachtung des Vorzeichens liegt der Betrag der mittleren relativen Abweichung hier bei 6,8 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 48 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit deutlich ungenauer wird (Abbildung 43). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.



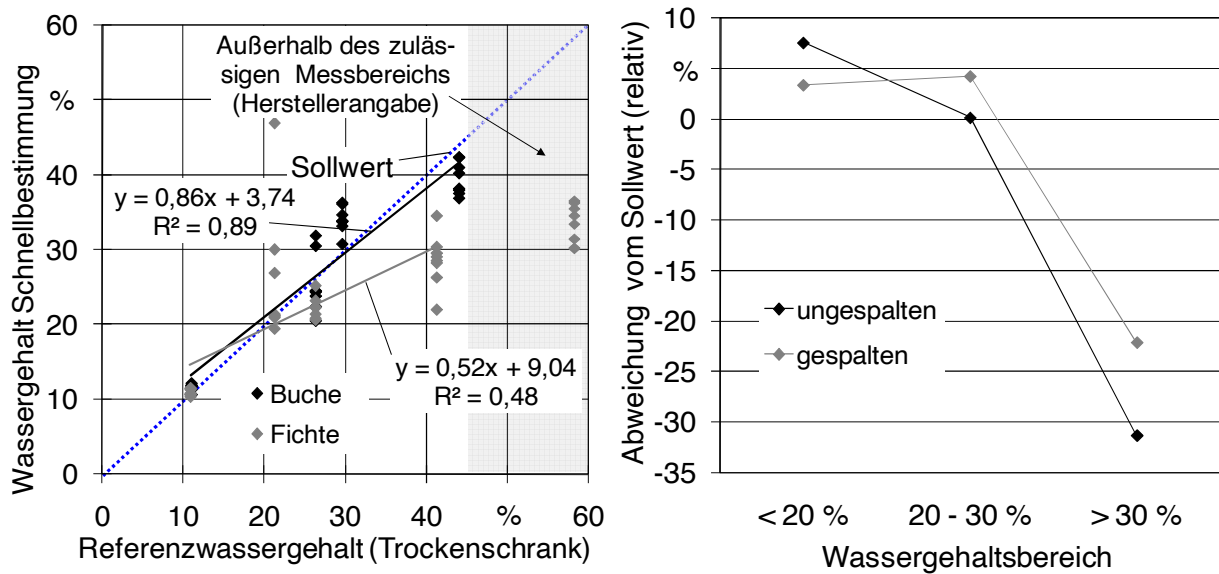


Abbildung 43: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät testo, 606-1 (Interpretation der abgelesenen Messwerte als Wassergehalt  $w$ )

#### 5.4.16 TROTEC T 500

Das T 500 ist laut Herstellerangabe ein professionelles Handmessgerät zur exakten Bestimmung des Holz- und Materialfeuchtegehaltes  $u$  nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei integrierten Elektroden (Messspitzen). Einsatzgebiete sind die Holzfeuchtemessung bei Schnitt- und Brennholz. Des Weiteren lässt sich das Messgerät zur Erfassung der Feuchte bei weichen Baustoffen wie Gips oder Putz einsetzen.



Abbildung 44: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat TROTEC, Typ T 500 mit Einstechnadeln

Das Gerät ist in der Standardversion mit hunderten verschiedener Holzsorten vorprogrammiert und kann im Temperaturbereich von 0 °C bis +50 °C und bei einer Holzfeuchte zwischen 5 und 50 %, was einen Wassergehalt von 5 bis 33 % entspricht, eingesetzt werden, wobei die Materialtemperatur bei den Messungen bei +20 °C liegen soll. Neben einer automatischen Temperaturkompensation ist das Gerät noch zusätzlich mit einer Hold-Funktion ausgerüstet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einsehbaren Messpositionen zu ermöglichen [33].

Nachdem sich das Gerät beim Einschalten automatisch justiert hatte, musste der richtige Sensor-Modus für die Messung der Holzfeuchte (MODE 120) eingestellt werden, bevor anschließend die Holzart, „Code 14“ für Buche und „CODE 08“ für Fichte, sowie die Temperatur des Messgutes, +20 °C, eingestellt wurde. Bei der Messung wurden die Elektroden (Messspitzen) quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Messwert abgelesen, nachdem dieser eine stabile Anzeige lieferte. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Einstechelektroden hielten auch hartem Holz stand und verbogen sich nicht. Die Ablesung des Messwertes war, bedingt durch die digitale Anzeige, sehr gut möglich und der Anzeigewert konnte im trockenen und vorgetrockneten Holz sehr einfach abgelesen werden. Im nassen Holz, welches jedoch außerhalb des zulässigen Messbereiches lag, sprang der Anzeigewert oftmals kurzzeitig auf unrealistische Werte, wodurch die Ablesung des Messwertes nicht einfach durchzuführen war. Wenn das Gerät auch in diesem hohen Wassergehaltsbereich eingesetzt werden soll, wäre hier eine Ein-Wert-Anzeige für den Bediener die bessere Lösung. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der gegebenen Messabweichungen zum Sollwert

könnte hier jedoch die Nachkommastelle entfallen. Die Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da unsere Messpositionen sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dies deckt sich in etwa mit der Angabe des Herstellers, wonach das Gerät bis zu einem Wassergehalt von 33 % (Holzfeuchte 50 %) eingesetzt werden kann. Trotzdem ist der angezeigte Messwert, umgerechnet auf den Wassergehalt, mit einer mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -18,1 % bei der Messung in Fichtenholz und -20,3 % bei der Messung in Buchenholz deutlich zu niedrig. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit verschlechtert. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 45, links, dargestellt. Ein ähnliches (deutlich zu niedriges) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 45, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite -19,6 %, an der Längsseite -19,0 %, am Originalscheit -18,5 % und am (dünnen) frisch gespaltenen Scheit -19,6 %.

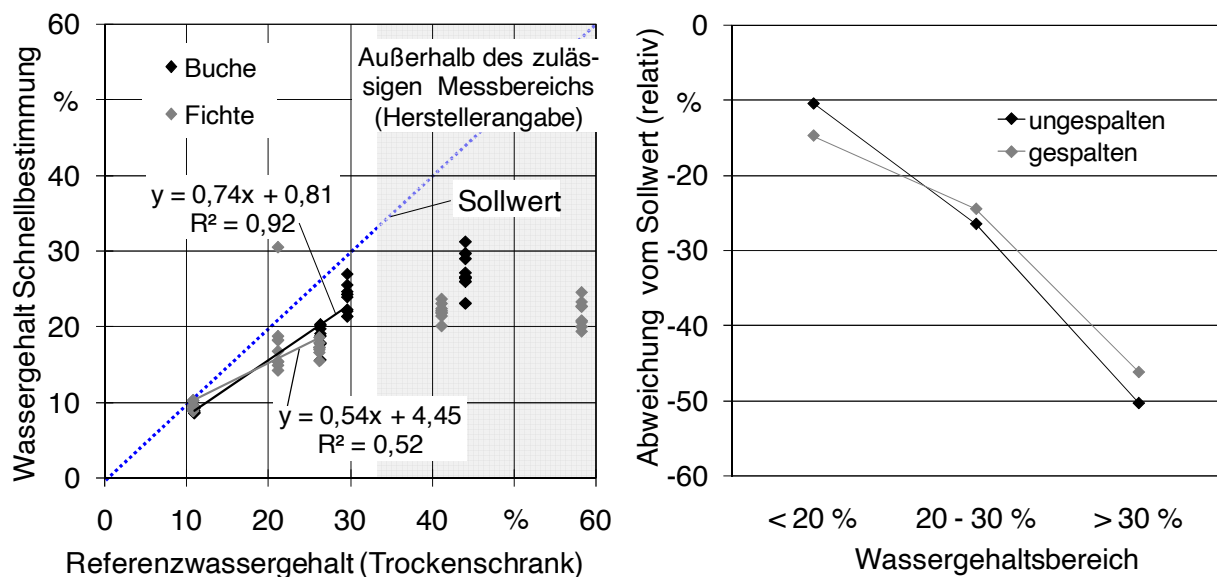


Abbildung 45: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät TROTEC, T 500

#### 5.4.17 TROTEC T 60

Das TROTEC T 60 (augenscheinlich baugleich mit PCE-333) ist laut Herstellerangabe ein sehr einfach zu bedienendes Feuchtemessgerät für orientierende Messungen des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz. Neben gesägtem Bauholz und gespaltenen Brennholz kann das Gerät auch eingeschränkt für Papier, Kartonagen und Baumaterialien wie Pflaster, Beton, usw. genutzt werden. Dabei arbeitet das Messgerät nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei Elektroden (Nadeln). Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 6 und 44 % Holzfeuchte (Wassergehalt 6 bis 31 %) und Umgebungstemperaturen von 0 °C bis +40 °C, wobei das Gerät auf eine Holztemperatur von +20 °C kalibriert ist. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen [34].



Abbildung 46: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat TROTEC, Typ T 60 mit Einstechnadeln

Nach erfolgter Funktions- und Batteriekontrolle wurden die Elektroden (Nadeln) bei einer Umgebungs- und auch Holztemperatur von +20 °C quer zur Faser mit großem Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche Gerät erwies sich dabei als sehr robust, die Einstechelektroden hielten auch hartem Holz stand und verbogen sich nicht, wenngleich bedingt durch die relativ dicken Elektroden ein größerer Anpressdruck erforderlich war. Die Ablesung des Messwertes war durch die analoge Balkenanzeige sehr übersichtlich gestaltet, da gerade und auch ungerade Anzeigewerte unterschiedlich dargestellt werden. Dennoch war die Ablesung nicht sehr einfach durchzuführen, da sich der Anzeigewert mit dem Anpressdruck des Messgerätes ans Holzscheit verändert und dadurch vom Bediener beeinflusst werden kann. Hiermit ist eine zusätzliche Messunsicherheit verbunden.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Dies deckt sich in etwa mit der Angabe des Herstellers, wonach das Gerät bis zu einem Wassergehalt von 31 % (Holzfeuchte 44 %) eingesetzt werden kann. Mit einer über alle untersuchten Holzarten mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -11,4 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, gerade keine brauchbaren Messwerte

mehr, wenn man eine maximale relative Abweichung von etwa 10 % gegenüber dem Sollwert toleriert. Die Messungen in Buchenholz zeigen jedoch mit Abweichungen von -7,1 % ein deutlich besseres Ergebnis als die Messungen in Fichtenholz mit Abweichungen von -15,6 %. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung meist unterschätzt wird und sich die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit deutlich verschlechtert. Die Messwerte im Wassergehaltsbereich unter 20 % stellen sich dagegen durchweg als sehr gut dar. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 47, links, dargestellt. Ein ähnliches (nur im Wassergehaltsbereich unter 20 % gutes) Messergebnis wurde bei der Messung an unterschiedlichen Messpunkten sowie beim Messen im Originalscheit bzw. im frisch gespaltenen Holzscheit (Abbildung 47, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzscheite insgesamt -14,6 %, an der Längsseite -10,2 %, am Originalscheit -9,4 % und am (dünnen) frisch gespaltenen Scheit -11,0 %, wobei sich diese teilweise guten Messwerte ausschließlich durch die relativ genauen Messungen bei trockenen Holz mit einem Wassergehalt unter 20 % ergeben. Bei der Messung an Originalscheiten kommt es teilweise auch zu einer geringfügigen Überschätzung der Messergebnisse, wodurch sich positive und negative Messabweichungen bei der Mittelwertbildung teilweise aufheben. Ohne Beachtung des Vorzeichens liegt der Betrag der mittleren relativen Abweichung hier bei 10,9 %.

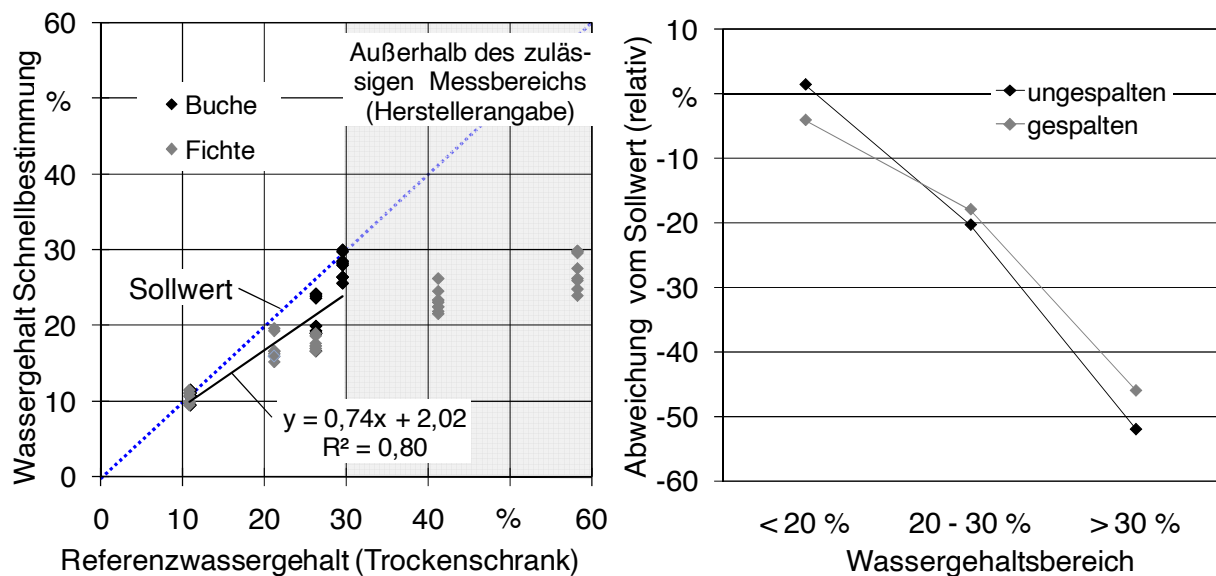


Abbildung 47: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät TROTEC, T 60

#### 5.4.18 Wetekom MD-018

Das MD-018 ist ein sehr einfach zu bedienender Feuchtemesser für die Erfassung der absoluten Feuchtigkeit  $u$  von Holz- und Bauwerkstoffen, wie z. B. Laminat, Sparren, Balken, Waldholz, Furniere, Paneele, Estrich, und so weiter. Dabei arbeitet das Messgerät nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsbestimmung zwischen zwei Elektroden (Messspitzen). Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 0 und 60 % Holzfeuchte (Wassergehalt 0 bis 38 %). Eine Einschränkung bezüglich der zulässigen Umgebungs- bzw. Holztemperaturen ist nicht gegeben und auch eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Holzarten wird nicht vorgenommen [35].



Abbildung 48: Leitfähigkeitsmessgerät Fabrikat Wetekom, Typ MD-018 mit Einstechnadeln

Nach erfolgter Kalibrierung wurden die Elektroden (Messspitzen) bei einer Umgebungstemperatur von +20 °C quer zur Faser mit Druck so weit als möglich in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Dies gestaltete sich durch die digitale Anzeige sehr einfach. Das durch die rundliche Bauform sehr handliche, jedoch auch sehr kleine, Gerät hat sich bei den Messungen als sehr robust erwiesen, die kurzen Einstechelektroden hielten auch hartem Holz stand und haben sich nicht verbogen. Bedingt wurde dies unter anderem durch die sehr kurzen Elektroden, die nur einen geringen Anpressdruck erforderlich machen. Ein Vorteil dieses Gerätes liegt auch darin, dass, bedingt durch die Einfachheit des Gerätes und des Messvorgangs, Fehler bei der Messung fast ausgeschlossen sind. Aufgrund der gegebenen Messabweichungen zum Sollwert könnte hier jedoch die Nachkommastelle entfallen.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 38 % (Holzfeuchte 60 %) erstreckt. Mit einer über alle untersuchten Holzarten mittleren relativen Abweichung zum Sollwert von -59,5 % liefert die Schnellbestimmung, umgerechnet auf den Wassergehalt, sehr ungenaue Messwerte, wobei dies dadurch verstärkt wird, dass bei der Messung in Holzscheiten mit einem Wassergehalt kleiner 20 % fast immer „0,0“ angezeigt wurde, und dies eine Abweichung von 100 % gegenüber dem Sollwert darstellt. Aber auch die Messung in vorgetrockneten Holz liefert mit einer mittleren rela-

tiven Abweichung von -15,8 % in Buchenholz und -22,7 % in Fichtenholz keine ausreichend genauen Ergebnisse. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 49, links, dargestellt. Ein ähnliches (ungenaueres) Ergebnis wurde auch bei unterschiedlichen Messpunkten und bei unterschiedlicher Scheitvorbereitung (siehe Abbildung 49, rechts) erzielt. Auch hier hat die Messung im trockenen Holz oft den Anzeigewert „0,0“ gebracht. Die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holzseite beträgt insgesamt -57,4 %, an der Längsseite -60,2 %, am Originalscheit -61,1 % und am (dünneren) frisch gespaltenen Scheit -59,2 %, wobei der Wassergehaltsbereich zwischen 20 und 30 % mit relativen Abweichungen von -15 % bis -20 % etwas bessere Messergebnisse liefert. Auffallend ist, dass der Wassergehalt im Holzscheit bei der Schnellbestimmung immer unterschätzt wird. Im höheren Wassergehaltsbereich über 30 %, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 38 % angibt, ist dann klar feststellbar, dass das Messergebnis mit steigendem Wassergehalt im Holzscheit immer ungenauer wird (Abbildung 49). Ein solch hoher Wassergehaltsbereich liefert bei der Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10) und blieb daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

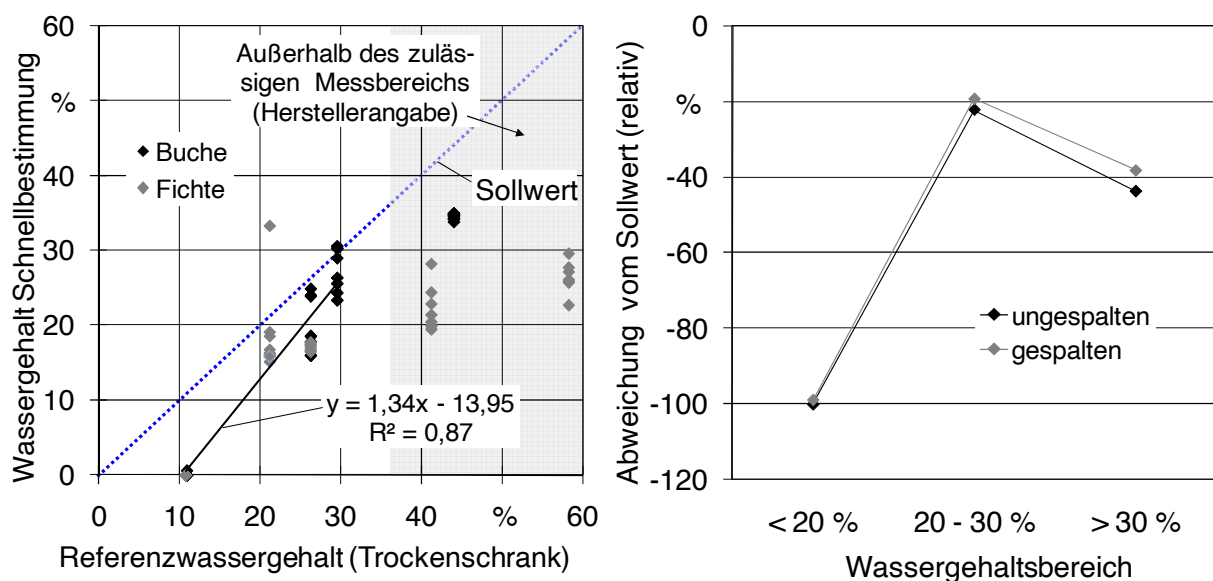


Abbildung 49: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwassergehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Wetekom, MD-018

#### 5.4.19 Wöhler HBF 410

Das HBF 410 ist ein Materialfeuchtemessgerät zur Bestimmung des Feuchtegehaltes  $u$  von Holz und Baustoffen. Das Messgut kann durch Änderung der Geräteeinstellung entweder im „Nadelmodus“ durch die ca. 12 mm langen Elektroden (Einstecknadeln) oder für eine zerstörungsfreie Oberflächenmessung im „Suchermodus“ (Kondensatorplattenoberfläche) verwendet werden. Das Gerät wurde mit beiden Messprinzipien getestet, da aber die Messung im Suchermodus von Seiten des Herstellers für Messungen an Scheitholz als nicht geeignet bezeichnet und damit auch nicht empfohlen wurde, werden die Ergebnisse hier nicht berichtet sondern lediglich dem Hersteller für Kalibrierzwecke zur Verwendung gestellt.

Für das Messen im Nadelmodus ist das Gerät in der Standardversion mit neun Materialgruppen (Cd00 bis Cd07 für verschiedene Holzsorten, Cd08 nicht belegt, Cd09 für Wand, Beton) programmiert und für das Messen im Suchermodus war das Geräte von Seiten des Herstellers, der diese Messungen zu Kalibrierzwecken verwenden will, auf die Materialgruppe Cd 05 vorprogrammiert. Weiterhin ist das Gerät zur automatischen Temperaturkompensation mit einer Nullpunktkorrektur und zusätzlich mit einer Hold-Funktion ausgerüstet, um ein „Einfrieren“ des Messwertes bei schlecht einseharen Messpositionen zu ermöglichen. Der zulässige Messbereich bei Holz liegt zwischen 0 und 80 % Holzfeuchte (Wassergehalt 0 bis 44 %) und Umgebungstemperaturen von 0 °C bis +50 °C [36].



Abbildung 50: Feuchtemessgerät Fabrikat Wöhler, Typ HBF 410, mit Einstecknadeln

Für die Messungen im Nadelmodus musste laut Herstellerangabe sowohl für Fichten- als auch für Buchenscheitholz die Holzgruppe „Cd02“ eingestellt werden, wobei vor den Messungen jeweils eine Nullpunktkorrektur durchgeführt wurde. Beim Messen wurden die Elektroden (Einstecknadeln) quer zur Faser mit Druck etwa sechs Millimeter in das Holz eingedrückt und der Anzeigewert abgelesen. Das durch die abgerundeten Ecken sehr handliche Gerät hat sich dabei als sehr robust erwiesen, wenngleich sich die Einstechelektroden mit fortschreitender Dauer der Messreihe leicht verbogen haben. Auch war die Ablesung des Messwertes durch die digitale Anzeige sehr übersichtlich gestaltet, jedoch nicht immer ganz einfach durchzuführen, da der Anzeigewert in nassem Holz, welches teilweise außerhalb des zulässigen Messbereichs lag, zwar



langsam aber doch stetig abfiel. Eine Ein-Wert-Anzeige wäre hier für den Bediener die bessere Lösung, da dadurch Ablesefehler ausgeschlossen werden. Vorteilhaft wäre auch, wenn die gerade gemessene Holzart als Klartextanzeige im Display mit angezeigt werden würde. Aufgrund der leicht abfallenden Messwertanzeige in nassem Holz sowie der gegebenen Messungenauigkeiten bei der Feuchteschnellbestimmung gegenüber dem Sollwert könnte auf die Nachkommastelle in der Anzeige verzichtet werden. Die Hold-Funktion wurde nicht angewandt, da die Messpositionen im Versuch sehr gut einsehbar waren.

Obwohl im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen an nassem Holz durchgeführt wurden, blieb die vergleichende Auswertung auf einen Wassergehaltsbereich im Holz von maximal 30 % beschränkt. Diese berücksichtigt nur einen Teil des vom Hersteller zugelassenen Messbereichs, der sich bis zu einem Wassergehalt von 44 % (Holzfeuchte 80 %) erstreckt. Hier liefert die Schnellbestimmung bei der Messung von Buchenholz mit einer relativen Abweichung vom Sollwert von -6,7 % auf den ersten Blick relativ genaue Werte, allerdings heben sich positive und negative Messabweichungen bei der Mittelwertbildung hier teilweise auf. Ohne Beachtung des Vorzeichens liegt der Betrag der mittleren relativen Abweichung bei 10,3 %. Die Messergebnisse bei der Messung in Fichtenholz sind dagegen mit einer Abweichung von -13,0 % deutlich ungenauer. Auffallend ist, dass der Wassergehalt bei der Schnellbestimmung meist unterschätzt wird und dass die Genauigkeit mit steigendem Wassergehalt abnimmt. Die entsprechenden Absolutwerte sind in Abbildung 51, links, dargestellt. Ein ähnliches Messergebnis wurde bei unterschiedlichen Messpunkten und bei unterschiedlicher Scheitvorbereitung (siehe Abbildung 51, rechts) erzielt. So beträgt die mittlere relative Abweichung bei Messungen an den Stirnseiten der Holz-scheite -14,2 %, an der Längsseite -8,4 %, am Originalscheit -8,8 % (Vorzeichen bereinigt: 10,2 %) und am (dünneren) frisch gespaltenen Scheit -8,0 %. Im höheren Wassergehaltsbereich, der jedoch nicht mehr in die Auswertung mit einfließt, obgleich der Hersteller einen Messbereich bis 44 % angibt, liefert die Feuchteschnellbestimmung keine verwertbaren Ergebnisse mehr (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10).

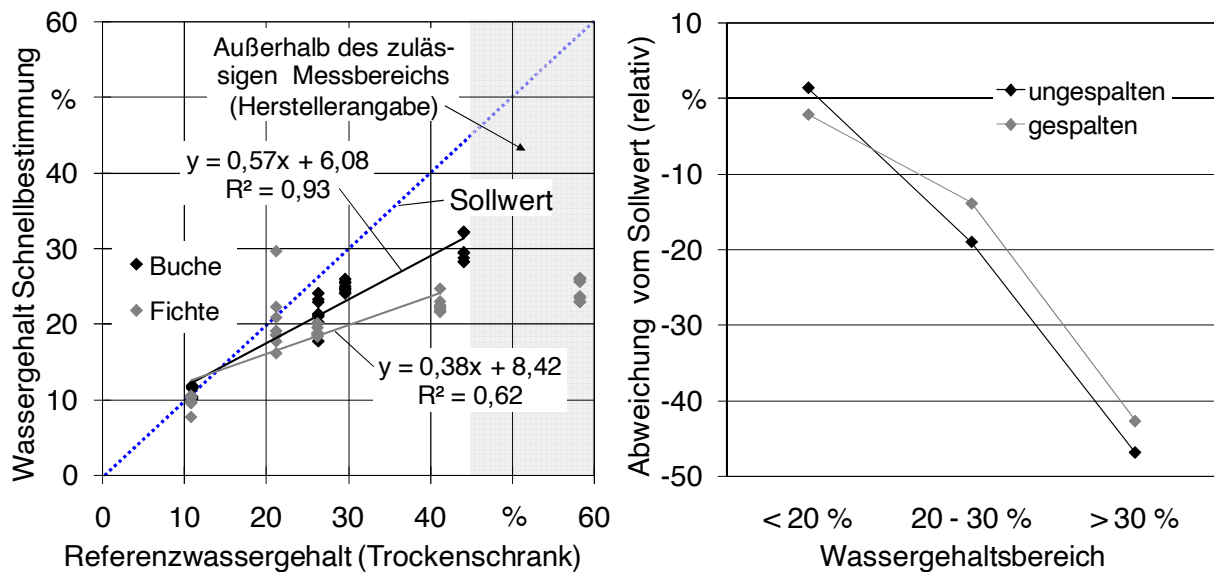


Abbildung 51: Absolute Abweichung bei der Feuchte-Schnellbestimmung zum Referenzwasser-gehalt in Abhängigkeit der Holzart und Wassergehalt (links) bzw. relative Abweichung zum Sollwert in Abhängigkeit von Holzvorbereitung und Wassergehalt (rechts); Messgerät Wöhler, HBF 410 Nadelmodus

## 5.5 Gesamtübersicht und Gegenüberstellung

Eine Übersicht über die mittlere relative Abweichung aus der Feuchteschnellbestimmung im Vergleich zum Referenzwert über alle Messgeräte und alle untersuchten Einflussparameter geben Tabelle 11 bzw. Tabelle 12. Um eine Aussage hinsichtlich der Richtung der Messabweichung (d. h. negatives Vorzeichen – Wassergehalt wird unterschätzt; ohne (positives) Vorzeichen – Wassergehalt wird überschätzt) geben zu können, wurden die Vorzeichen bei der Auswertung in Tabelle 11 bei der Mittelwertbildung zunächst mit berücksichtigt. Dadurch erscheint der Mittelwert der Abweichung in manchen Fällen günstiger, da sich gegebenenfalls vorliegende positive Abweichungen und die meist negativen Abweichungen teilweise gegenseitig aufheben. Im Gegensatz dazu wird die Messwertstreuung, d. h. nur der mittlere Betrag der Abweichung, ohne Berücksichtigung der Vorzeichen in Tabelle 12 wiedergegeben.

Aufgrund der Tatsache, dass oberhalb des Fasersättigungspunktes von Holz (ca. 19 bis 25 % Wassergehalt) kaum noch ein sicherer Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Wassergehalt und dem gemessenen elektrischen Widerstand besteht (vgl. Kapitel 3.1), geben viele Hersteller den zulässigen Messbereich der Geräte mit maximal ca. 30 bis 40 % Wassergehalt an. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass die Messgenauigkeit in diesem Bereich und insbesondere darüber unakzeptabel gering ist. Aus diesem Grund werden Wassergehalte von mehr als 30 % bei den dargestellten Gerätevergleichen (Tabelle 11 bzw. Tabelle 12) nicht mehr berücksichtigt. Diese Einschätzung wird auch durch die Erfahrungen anderer Versuchsansteller bestätigt [5].

Die mittlere Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert (Referenzwert) lag bei der durchgeführten Versuchsreihe über alle Messgeräte und alle untersuchten Einflussparameter (mit Berücksichtigung der Vorzeichen) bei -18,7 % (Tabelle 11) und die Streuung (ohne Berücksichtigung der Vorzeichen) betrug durchschnittlich 19,8 % (Tabelle 12).

Tabelle 11: Übersicht über die mittlere relative Abweichung aus der Feuchteschnellbestimmung bezogen auf den Referenzwassergehalt in Prozent für alle untersuchten Messgeräte und Einflussparameter (Hier: Mittelwertbildung mit Berücksichtigung der Vorzeichen)

Messgerät	Messbereich (geprüft) (w)	Relative Abweichung der Schnellbestimmung zum Sollwert (%) in Abhängigkeit von der Holzart Scheitvorbe- Mess- alle Krite- reitung punktlage rien			
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 30 %	-2,9	-2,5	-3,3	-2,9
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	10 – 30 %	-5,9	-5,7	-6,0	-5,9
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	10 – 30 %	-8,7	-8,7	-8,7	-8,7
Lignomat maxiLigno mit E 12	10 – 30 %	-10,1	-10,3	-10,0	-10,1
<i>Mittelwert</i>	-	-6,9	-6,8	-7,0	-6,9
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	10 – 30 %	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5
Greisinger GMR 100	10 – 30 %	-23,7	-24,1	-23,3	-23,7
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	10 – 30 %	-9,0	-7,9	-10,0	-9,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	10 – 30 %	-21,6	-19,5	-22,0	-21,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	10 – 30 %	-33,0	-31,7	-34,0	-32,9
Doser LWM 2	10 – 30 %	-31,0	-30,6	-31,3	-31,0
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	10 – 30 %	-9,8	-8,4	-11,3	-9,8
Gann Hydromette Compact S	10 – 30 %	-19,6	-19,9	-19,3	-19,6
Trotec T 500	10 – 30 %	-19,2	-19,0	-19,3	-19,2
Fuva S 06	10 – 30 %	-22,6	-22,5	-22,7	-22,6
testo 606-1*	10 – 30 %	4,3	3,8	4,8	4,3
PCE – 333	10 – 30 %	-10,0	-7,9	-12,2	-10,1
Trotec T 60	10 – 30 %	-11,4	-10,2	-12,4	-11,3
Wetekom MD-018	10 – 30 %	-59,5	-60,2	-58,8	-59,5
Lignomat miniLigno X	10 – 30 %	-30,5	-29,6	-31,4	-30,5
<i>Mittelwert</i>	-	-20,3	-19,7	-20,7	-20,2
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	10 – 30 %	-17,9	-24,5	-11,2	-17,9
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	10 – 30 %	-40,8	-49,7	-31,8	-40,8
<i>Mittelwert</i>	-	-29,3	-37,1	-21,5	-29,3
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	-18,6	-18,9	-18,2	-18,5

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

*Tabelle 12: Übersicht über die mittlere Streuung der Werte aus der Schnellbestimmung im Vergleich zum Referenzwert über alle Messgeräte und alle untersuchten Einflussparameter (Hier: Streuung berechnet als mittlerer Betrag der Abweichungen ohne Berücksichtigung des Vorzeichens)*

Messgerät	Messbereich (geprüft) (w)	Relative Abweichung der Schnellbestimmung zum Sollwert (%) in Abhängigkeit von der			
		Holzart	Scheitvorbe- reitung	Mess- punktlage	alle Krite- rien
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>					
Schaller humimeter BLW*	10 – 30 %	7,0	4,4	9,9	7,1
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	10 – 30 %	6,4	7,0	6,0	6,5
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	10 – 30 %	8,8	8,7	8,7	8,7
Lignomat maxiLigno mit E 12	10 – 30 %	10,1	10,3	10,0	10,1
<i>Mittelwert</i>	-	<i>8,1</i>	<i>7,6</i>	<i>8,6</i>	<i>8,1</i>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>					
PCE FME mit NF 4-17	10 – 30 %	7,5	7,5	7,7	7,6
Greisinger GMR 100	10 – 30 %	23,7	24,1	23,3	23,7
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	10 – 30 %	9,0	7,9	10,0	9,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	10 – 30 %	21,6	19,5	22,0	21,0
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	10 – 30 %	33,0	31,7	34,0	32,9
Doser LWM 2	10 – 30 %	31,0	30,6	31,3	31,0
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	10 – 30 %	11,6	9,1	11,3	10,7
Gann Hydromette Compact S	10 – 30 %	19,6	19,9	19,3	19,6
Trotec T 500	10 – 30 %	19,2	19,0	19,3	19,2
Fuva S 06	10 – 30 %	22,6	22,5	22,7	22,6
testo 606-1*	10 – 30 %	4,3	3,8	5,3	4,5
PCE – 333	10 – 30 %	12,8	12,6	14,6	13,3
Trotec T 60	10 – 30 %	11,4	10,9	12,4	11,6
Wetekom MD-018	10 – 30 %	59,5	60,2	58,8	59,5
Lignomat miniLigno X	10 – 30 %	30,5	29,6	31,4	30,5
<i>Mittelwert</i>	-	<i>21,1</i>	<i>20,6</i>	<i>21,6</i>	<i>21,1</i>
<i>Dielektrische Messgeräte</i>					
Doser DM4 A	10 – 30 %	17,9	24,5	14,0	18,8
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	10 – 30 %	40,8	49,7	31,8	40,8
<i>Mittelwert</i>	-	<i>29,3</i>	<i>37,1</i>	<i>22,9</i>	<i>29,8</i>
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	<i>19,4</i>	<i>19,7</i>	<i>19,2</i>	<i>19,5</i>

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

Die übrigen vergleichenden und zusammenfassenden Aspekte sowie die Schlussfolgerungen, die sich aus der Betrachtung der Gesamtübersichten in Tabelle 11 und Tabelle 12 sowie aus den vorangehenden Ergebniskapiteln ergeben, werden im Schlusskapitel (Kapitel 6) erläutert.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Wassergehalt ist der wichtigste qualitätsbestimmende Parameter von naturbelassenem stückigem Holz (Scheitholz), das zeigen viele wissenschaftliche Untersuchungen an häuslichen Verbrennungsanlagen (Einzelfeuerstätten, Scheitholzkesseln). Wegen seiner nachteiligen Wirkungen auf den Ausstoß von gesundheitsschädlichen organischen Verbindungen und Stäuben im Abgas soll der Wassergehalt bei derartigen Anwendungen zukünftig auf 20 % (d. h. 25 % Brennstofffeuchte) begrenzt werden. Dies ist im Entwurf der novellierten 1. BImSchV vorgesehen und soll im Rahmen der wiederkehrenden Überwachung alle zwei Jahre, und bei Einzelraumfeuerungsanlagen im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Feuerstättenschau alle fünf Jahre durch den Schornsteinfeger überprüft werden. Allerdings ist dabei bislang noch unklar, welche messtechnischen Hilfsmittel hierfür verwendet werden können und welche der angebotenen Schnellbestimmungsmessgeräte geeignet sind. Die vorliegende Untersuchung soll daher eine Übersicht über die messtechnischen Möglichkeiten bieten und eine Bewertung einer Auswahl der angebotenen Verfahren und Geräte vornehmen, um in der Praxis eine Festlegung auf geeignete Messverfahren vornehmen zu können.

**Auswahl und Vorgehen.** Auf Basis einer Marktrecherche wurden 19 verschiedene Messgeräte (bzw. 21 Betriebsarten) von 13 Herstellern für die Versuche ausgewählt. Es handelt sich hauptsächlich um Messgeräte, die mit der Messung der Leitfähigkeit arbeiteten. Diese Geräte waren überwiegend mit Einstechnadeln ausgestattet, vier Geräte verfügten jedoch über eine separate Einschlagelektrode, die ein tieferes Eindringen in das Holz ermöglichte. Zwei weitere Geräte arbeiteten nach dem Dielektrizitätsprinzip (Kapazitätsänderung).

Nach Durchführung verschiedener Vorversuche wurde ein Messplan erarbeitet, nach dem mit sämtlichen Geräten bzw. Betriebsarten eine Schnellbestimmung an insgesamt 12 Holzscheiten (vier Buchen-, drei Birken- und fünf Fichtenscheiten) erfolgte, wobei jeweils im Originalscheit und im anschließend frisch gespaltenen Scheit bei jeweils zwei Wiederholungen gemessen wurde. Außerdem wurden verschiedene Messpunkte (2-mal Stirnseite, 3-mal Längsseite) untersucht. Die 33-cm-Scheite mit einem Wassergehalt von 11 bis 58 % wurden bei der Auswertung jeweils drei unterschiedlichen Wassergehaltsstufen (lufttrocken, angetrocknet und erntefrisch) zugeordnet und entsprechend ausgewertet. Als Referenzmessung diente die Wassergehaltsbestimmung der kleingespaltenen Prüfscheite im Trockenschrank bei 105 °C gemäß CEN/TS 14774-1 über mindestens 48 Stunden.

**Bedienung und Ausstattung.** Die Geräte unterscheiden sich zum Teil wesentlich in ihrer Ausstattung und im Bedienungskomfort. Die meisten sind mit einer Temperaturkompensation ausgestattet, wodurch Messfehler durch Messbedingungen, die von den Nennbedingungen (20 °C) abweichen (z. B. Messung im Freien), automatisch kompensiert werden können (betrifft Fabrikat Schaller, humimeter BLW; Fabrikat PCE, PCE FME; Fabrikat Wöhler, HBF 410; Fabrikat HE-DÜ, 2 in 1; Fabrikat Fuva, S 06; Fabrikat Gann, Hydromette HT 65; Fabrikat BES Bollmann, Easy comfort; Fabrikat Greisinger, GMH 3830 und GMR 100; Fabrikat Lignomat, maxiLIGNO; Fabrikat Doser, DM 4A; Fabrikat Trotec, T 500). In den hier durchgeführten Messungen konnten derartige Vorteile sich aber wegen der geforderten Einheitlichkeit der Versuchsbedingungen (d. h. Messung bei 20 °C im Labor) nicht niederschlagen, sie sind jedoch bei der Geräteauswahl zu beachten.

Weitere Unterschiede bestehen in der Bauform. Einige Geräte mit angebauten Einstechnadeln erwiesen sich als relativ unhandlich, ihre scharfkantige Bauform führte bei mehrfacher Benutzung zu schmerzhaften Druckstellen beim (kraftaufwändigen) Hineindrücken der Elektroden ins Holz (insbesondere bei Hartholz). Das war vor allem bei den Herstellern Fuva (S 06), Greisinger (GMR 100) und Dosser (LWM 2) der Fall.

Bei den Geräten mit angebauten Einstechnadeln bestand ein häufiges Ärgernis darin, dass die Einstechelektroden zu lang, zu kurz oder zu wenig stabil waren. Dadurch konnten die Nadeln bei unebenem Holz gar nicht richtig eingestochen werden, da das Gehäuse zwischen den Elektroden am Holzsplit auflag, beziehungsweise bei dem Druck, der erforderlich war, um die vom Hersteller geforderte Eindringtiefe auch beim Hartholz zu erreichen, rasch verbogen und dann umständlich gerichtet werden mussten. Teilweise konnte die vorgegebene Einstechtiefe auch mit größter Anstrengung nicht erreicht werden. Leider waren im Lieferumfang meist auch keine Ersatzelektroden enthalten. Negativ hervorzuheben sind hier die Geräte der Hersteller PCE (PCE FME, hier Fühler NF 4-17), Fuva (S 06), Greisinger (GMR 100), Lignomat (miniLigno X) und Dosser (LWM 2).

Das Display zur Ergebnisanzeige ist vielfach auch sehr einfach gestaltet. Verbesserungsmöglichkeiten bestehen oft bei solchen Geräten, die gemäß Herstellerangabe für eine Vielzahl von Materialarten eingesetzt werden können. Hier wäre es oft sinnvoll, dass die gerade gemessene Einstellung (z. B. Holzart) im Display gemeinsam mit dem Ergebniswert angezeigt wird, um eine eventuell fehlerhafte Auswahl der Kalibrierfunktion (z. B. durch falsche Codeeingabe bei Beginn der Messungen) zu erkennen. Gute technische Lösungen bieten hierzu die Geräte der Hersteller Schaller (Typ humimeter BLW) und Lignomat (Typ maxiLIGNO). Generell sollten jedoch alle hier genannten Hersteller wegen der insgesamt meist unbefriedigenden Messgenauigkeit auf die Anzeige der Nachkommastelle verzichten, um dem Anwender nicht eine unnötig hohe und in der Praxis nicht erreichbare Präzision vorzuspiegeln.

**Ergebnisse zu den Messvarianten und Einflussgrößen.** Zwischen den Holzarten Fichte und Buche kommen relativ geringe Unterschiede in der Messgenauigkeit zustande, tendenziell werden bei Buche aber etwas geringere Abweichungen vom Referenzwert erzielt. Die Messunsicherheit ist hier um ca. 3 % geringer.

Auch die Wahl des Messpunktes am Holzsplit kann das Messergebnis beeinflussen. Allerdings machen die Hersteller meist keine detaillierten Angaben über die empfohlene Soll-Lage des Einsteck- bzw. Anlegepunktes. In den Versuchen zeigte sich aber, dass die Messungen an der (inneren) Längsseite des Splittes überwiegend bessere Messergebnisse lieferten als die Messung an der Stirnseite (Sägekante). Das gilt jedoch nicht für die beiden untersuchten Geräte, die nach dem dielektrischen Messprinzip arbeiten, hier war die Messung an den Stirnseiten deutlich im Vorteil, da hier die ebene Oberfläche eine geeignete glatte Auflagefläche bot, die solche Geräte für einen guten Kontakt zwischen Kondensatorplatten und zu prüfendem Holz benötigen.

Einige Hersteller geben in ihrer Beschreibung an, dass das zu messende Holz unmittelbar vor der Messung gespalten werden soll, um eine Messung an der frisch gespaltenen Fläche zu ermöglichen. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen, dass diese Maßnahme zumeist geringfügig bessere

Ergebnisse liefert. Das gilt allerdings nicht für Geräte mit Einschlagelektrode, hier bringt der Spaltvorgang eher Nachteile.

**Beurteilung der Messgerätekategorien.** Betrachtet man die einzelnen Messgerätekategorien bei einem Brennstoffwassergehalt von weniger als 30 %, so zeigt sich, dass Geräte, die mit Einschlagelektroden ausgestattet sind, bei einer mittleren Abweichung (über alle untersuchten Einflussparameter) von -6,9 % (bzw. 8,1 % Streuung) ein deutlich besseres Ergebnis liefern, als Geräte mit Einstechnadeln, bei denen die mittlere relative Abweichung mit -20,2 % (bzw. 21,1 % Streuung) um etwa das Dreifache höher liegt. Messgeräte, die nach dem dielektrischen Prinzip arbeiten, sind mit -29,3 % Abweichung (bzw. 29,8 % Streuung) im Durchschnitt nochmals ungenauer. Zur Feuchtebestimmung an Scheitholz sind dielektrische Messgeräte somit nicht geeignet, zumal die unebene Oberfläche des gespaltenen Scheits keine ausreichend glatte Auflagefläche bietet, die solche Geräte für einen guten Kontakt zwischen Kondensatorplatten und zu prüfendem Holz benötigen.

Die höhere Genauigkeit der Geräte mit Einschlagelektrode wird jedoch erkauft durch einen im Vergleich zu den übrigen Gerätetypen (d. h. Einstechnadeln bzw. dielektrische Geräte) größeren Zeitaufwand, da hier – neben dem eigentlichen Messgerät – immer noch mit einer Einschlagelektrode hantiert werden muss, die über Kabel mit dem Messgerät verbunden ist. Die höhere Genauigkeit ist auch mit höheren Anschaffungskosten verbunden, diese Messgeräte markieren das obere Ende der Preisskala (vgl. hierzu Tabelle 1).

**Einzelvergleich.** Die im Mittel genauesten Messergebnisse liefern – je nach Betrachtungsweise (d. h. mittlere Abweichung oder Streuung) – die Geräte der Firmen Schaller, Typ humimeter BLW (relative Abweichung zum Referenzwert -2,9 % bzw. 7,1 % Streuung), Testo, Typ 606-1 (relative Abweichung zum Referenzwert 4,3 % bzw. 4,5 % Streuung) und Greisinger, Typ GMH 3830 mit Einschlagelektrode GHE 91 (relative Abweichung zum Referenzwert -5,9 % bzw. 6,5 % Streuung). Daneben sind mit einer mittleren relativen Abweichung bis 10 % noch die Geräte der Firmen Gann, Typ Hydromette HT 65 mit Elektrode M 18, PCE, Typ FME mit Fühler NF 4-17, HEDÜ, Typ 2 in 1 Nadelmodus, Wöhler, Typ HBF 410 Nadelmodus sowie PCE, Typ PCE-333 zu nennen.

**Ergebnisse in einzelnen Wassergehaltsbereichen.** Die Betrachtung der Messergebnisse zeigt, dass die Möglichkeiten einer Schnellbestimmung des Wassergehaltes bei Scheitholz begrenzt sind. Das gilt insbesondere für den aus verbrennungstechnischer Sicht besonders kritischen Wassergehaltsbereich von mehr als 30 %. Hier wirkt sich aus, dass bei Geräten, die nach dem Prinzip der Messung der elektrischen Leitfähigkeit arbeiten, oberhalb des Fasersättigungspunktes von Holz (ca. 19 bis 25 % Wassergehalt) offenbar kaum noch ein sicherer Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Wassergehalt und der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit besteht. Bei allen Messgeräten, mit Ausnahme von Fabrikat Schaller (Typ humimeter BLW), wurden mit zunehmendem Wassergehalt (bereits ab ca. 20 %) erhebliche Abweichungen zur Referenzmethode festgestellt. Viele Hersteller beschränken daher den zulässigen Messbereich der Geräte, zum Beispiel auf maximal ca. 40 % Wassergehalt. Einige Geräte sollen laut Herstellerangabe jedoch sogar bis maximal 60 % Wassergehalt einsetzbar sein; die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Messgenauigkeit bei solchen Wassergehalten unakzeptabel gering ist.

**Allgemeine Ergebnisbeurteilung.** Generell kann festgestellt werden, dass der Wassergehalt von Scheitholz bei der Schnellbestimmung mit marktgängigen Messgeräten fast durchgehend unterschätzt wird, so dass bezüglich der Einsatztauglichkeit bzw. der Genauigkeit der Kalibrierung Zweifel angebracht sind. Verfahrenstechnische Verbesserungen der Messgeräte zur Reduzierung der Messfehler sind somit wünschenswert. Hierzu ist in erster Linie die Durchführung von verbesserten Kalibrierungen mit Scheitholz zu nennen. Aber auch durch Vergrößerung des Probenumfangs oder durch Bereitstellung von Kalibrierungen für mehrere Holzarten können zum Teil Verbesserungen erzielt werden.

**Missverständliche Begriffsdefinitionen.** Bei der korrekten Verwendung der Begriffe „Wassergehalt“ und „Brennstofffeuchte“ besteht in der Praxis – aber leider auch bei einigen Herstellerfirmen bzw. in deren Technischen Anleitungen – zum Teil noch einige Unsicherheit oder auch Unkenntnis. Dieser Umstand ist jedoch für die Messergebnisse von großer Bedeutung, da es sich per Definition bei den Begriffen „Feuchte“ und „Wassergehalt“ um völlig verschiedene Parameter handelt, die erst ineinander umgerechnet werden müssen (vgl. hierzu Kapitel 2.1). Bedenklich ist beispielsweise die Tatsache, dass die Firma Testo in ihren Produktbeschreibungen angibt, die Brennstofffeuchte zu messen, jedoch auf Nachfrage mitteilt, dass es sich in Wirklichkeit um den Wassergehalt handelt. Auf die unterschiedliche Definition dieser beiden Begriffe (vgl. Kapitel 2.1) wird bei vielen Herstellern in den Technischen Anleitungen gar nicht eingegangen (betrifft Firmen BES Bollmann, Doser, Gann, HEDÜ, Lignomat, PCE, Schaller, Testo, Trotec, Wetekom und Wöhler), so dass Fehlinterpretationen in der Praxis hier kaum zu vermeiden sind. In einigen Fällen (betrifft Firmen Doser und Schaller) wird in den Anleitungen sowohl von der Feuchte als auch vom Wassergehalt gesprochen (vgl. Tabelle ). Auf Nachfrage wird von der Firma Schaller angegeben, den Wassergehalt, und von der Firma Doser angegeben, die Brennstofffeuchte als Messergebnis anzuzeigen. Einer der Hersteller, der die Begriffe in seiner Dokumentation missverständlich definiert hatte (Schaller), kündigte bei der Nachfrage des TFZ sofortige Korrekturen seiner technischen Unterlagen an.

Angesichts derartiger Begriffsunschärfen liegt die Vermutung nahe, dass schon die Kalibrierung bei einigen Geräten möglicherweise zum Teil nicht sachgerecht, d. h. auf Basis falsch interpretierter Messwerte, erfolgt sein könnte. Diese Vermutung wird auch durch die Feststellung gestützt, dass der Wassergehalt im Holzsplit bei der Schnellbestimmung fast immer unterschätzt wird (vgl. Tabelle ). Bei 15 von insgesamt 19 Geräten wäre die Interpretation des angezeigten Messwertes als „Wassergehalt“ anstelle der laut Bedienungsanleitung angezeigten (und bei Nachfrage bestätigten!) „Brennstofffeuchte“ mit einer deutlich höheren Genauigkeit verbunden gewesen. Eine entsprechende (orientierende) Berechnung zeigt, dass sich die mittlere relative Abweichung vom Sollwert bei den 15 verwendeten Messgeräten mit Einstechnadeln von -20,2 % auf -6,8 % und bei den beiden dielektrischen Messgeräten von -29,3 % auf -16,2 % verbessern würde. Das gilt jedoch nicht für die vier Messgeräte mit Einschlagelektrode, hier ergäbe sich im Mittel eine Verschlechterung mit einer Abweichung von +7,7 % statt -6,9 %. Den Herstellern, deren Geräte in der Untersuchung hohe Messunsicherheiten aufwiesen und die zudem in ihren Anleitungen keine Angaben zum Unterschied der Parameter „Wassergehalt“ und „Brennstofffeuchte“ machen, ist eine Überprüfung der Kalibrierungen auch hinsichtlich der korrekten Verwendung dieser beiden Parameter zu empfehlen.



## 7 Quellenverzeichnis

- [1] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2007): Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel, Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel, Broschüre, Gülzow: FNR, 5. Auflage, 144 Seiten
- [2] BURVALL, J.; SAMUELSSON, R. (2004): Report on reference test methods for moisture content. Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Deliverable D1 for EU-Project Bionorm, Contract ENK6-CT-2001-00556, Umea: Elsevier Ltd., S. 930-934
- [3] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1988): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung zur Neufassung der Ersten und Änderungen der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes), Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, 1. BImSchV, vom 15. Juli 1988 (BGB1 I, S. 1059), neugefasst durch Bekanntmachung vom 14.03.1997 (BGB1 I, S. 490), zuletzt geändert durch Art. 4 der Verordnung vom 14.08.2003 (BGB1 I, S. 1614)
- [4] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2007): Entwurf zur Novelle der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Entwurf Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, Entwurf 1.BimSchV, Stand: 21. Dezember 2007
- [5] BÖHM, T. (2005): Verfahren zur Bestimmung physikalischer Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes biogener Festbrennstoffe, Dissertation an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technische Universität München, 189 Seiten
- [6] DAUGBJERG JENSEN, P.; HARTMANN, H.; BÖHM, T.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; MORSING, M. (2006): Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass and Bioenergy*, 30, S. 935-943
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): CEN/TS 14774-1 (Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes – Verfahren der Ofentrocknung – Teil 1: Gehalt an Gesamtwasser – Referenzverfahren). Beuth Verlag, Berlin
- [8] Deutsches Institut für Normung (2003): CEN/TS 14588 (Feste Biobrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen), Beuth Verlag, Berlin
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2005): CEN/TS 14780 (Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung). Beuth Verlag, Berlin
- [10] DU, Q. P.; GEISSEN, A.; NOACK, D. (1991): Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip; *Holz als Roh- und Werkstoff*, Jg. 49, Nr. 1, S. 1-6
- [11] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; THUNEKE, K.; HÖLDRICH, A.; ROSSMANN, P. (2007): Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung. In: HARTMANN, H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2. Auflage, S. 56-67
- [12] BAYERISCHES KAMINKEHRER-HANDWERK (2007): Holzfeuchtemessgeräte, 1907-2007, 100 Jahre LIV Bayern, 7/2007, S. 157-160
- [13] HARTMANN, H., BÖHM, T. (2004): Physikalisch-mechanische Brennstoffeigenschaften. In: HÄRTLEIN, M.; ELTROP, L.; THRÄN, D. (Hrsg.): *Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Teil 2: Mess- und Analyseverfahren*. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Nr. 23, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Münster, Landwirtschaftsverlag, S. 558-632

- [14] GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, Download: Die Holzfeuchtemessung, 4 Seiten, [www.gann.de](http://www.gann.de)
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2002): DIN EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Verfahren. 2002-07. Berlin: Beuth Verlag
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2005): DIN EN 13183-3: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren. 2005-06. Berlin: Beuth Verlag
- [17] BES BOLLMANN GmbH, Firmenunterlagen, Funktionsbeschreibung, 15 Seiten
- [18] DOSER MESSTECHNIK GMBH, Firmenunterlagen, DM 4A, Bedienungsanleitung, 8 Seiten
- [19] DOSER MESSTECHNIK GMBH, Firmenunterlagen, LWM 2, Bedienungsanleitung, 2 Seiten
- [20] FUVA GMBH, Firmenunterlagen, S 06, Bedienungsanweisung, 2 Seiten
- [21] GANN GMBH, Firmenunterlagen, HYDROMETTE COMPACT S, Bedienungsanweisung, 2 Seiten
- [22] GANN GMBH, Firmenunterlagen, HYDROMETTE HT 65, Bedienungsanweisung, 16 Seiten
- [23] GREISINGER ELECTRONIC GMBH, Firmenunterlagen, GMH 3830, Bedienungsanleitung, 16 Seiten
- [24] GREISINGER ELECTRONIC GMBH, Firmenunterlagen, GMR 100, Bedienungsanleitung, 8 Seiten
- [25] LOHMANN, U.: Handbuch Holz, 4. Aufl., Stuttgart, DRW-Verlag, 1993, 312 Seiten
- [26] HEDÜ GMBH, Firmenunterlagen, 2 in 1, Bedienungsanleitung, 8 Seiten
- [27] LIGNOMAT GMBH, Firmenunterlagen, maxiLIGNO, Bedienungsanleitung, 8 Seiten
- [28] LIGNOMAT GMBH, Firmenunterlagen, mini X, Bedienungsanleitung, 4 Seiten
- [29] PCE GROUP, Firmenunterlagen, FME, Bedienungsanleitung, 18 Seiten
- [30] PCE GROUP, Firmenunterlagen, PCE-333, Bedienungsanleitung, 1 Seite
- [31] SCHALLER GMBH, Firmenunterlagen, humimeter BLW, Kurz-Bedienungsanleitung, 8 Seiten
- [32] TESTO AG, Firmenunterlagen, testo 606-1, Kurzanleitung, 6 Seiten
- [33] TROTEC GMBH, Firmenunterlagen, T 500, Bedienungsanleitung, 31 Seiten
- [34] TROTEC GMBH, Firmenunterlagen, T 60, Bedienungsanleitung, 11 Seiten
- [35] WESTFALIA, Firmenunterlagen, Wetekom MD-018, Bedienungsanleitung, 4 Seiten
- [36] WÖHLER GMBH, Firmenunterlagen, HBF 410, Bedienungsanleitung, 13 Seiten
- [37] MESA ELECTRONIC GMBH, Bedienungsanleitung MESA MM710, Seiten 1-8 bis 1-9
- [38] TROTEC GMBH, Firmenunterlagen, Praxishandbuch T2000, Version 2.0, Seite 3.2-02

## 8 Anhang

Tabelle 13: Adressenliste der Hersteller von Feuchte-Schnellbestimmungsgeräten

Fabrikat	- Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort - Telefon, Fax, Internet
BES Bollmann	BES Bollmann B.V., Plesmanweg 27, 7602 PD Almelo, Niederlande Tel.: +31(0)546-876530, Fax: +31(0)546-870525, Internet: www.bes-bollmann.nl
Doser	Doser Messtechnik GmbH & Co. KG, Kemptener Str. 73, 87629 Füssen, Tel.: 08362 91 59-402, Fax: 08362 91 59-407, Internet: www.doser.de
Fuva	Fuva GmbH, Richterstraße 37, 91052 Erlangen, Tel.: 09131 52 100, Fax: 09131 54 012, Internet: www.fuva.de
Gann	Gann Mess- und Regeltechnik GmbH, Schillerstraße 63, 70839 Gerlingen, Tel.: 07156 49 07-0, Fax: 07156 49 07-40, Internet: www.gann.de
Greisinger	Greisinger electronic GmbH, Hans-Sachs-Straße 26, 93128 Regenstauf, Tel.: 09402 93 83-0, Fax: 09402 93 83-33, Internet: www.greisinger.de
HEDÜ	HEDÜ GmbH, Karstraße 19a, 41068 Mönchengladbach; Tel.: 02161 35433-0, Fax: 02161 35433-9, Internet: www.hedue.de
Lignomat	Lignomat GmbH, Gewerbegebiet Nord 3, 09456 Mildenaue, Tel.: 03733 59 60 45, Fax: 03733 59 60 46, Internet: www.lignomat.de
PCE	PCE Deutschland GmbH & Co. KG, Im Langel 4, 59872 Meschede; Tel.: 02903 976 99 0, Fax: 02903 976 99 29, Internet: www.warensortiment.de
Schaller	Schaller GmbH, Max-Schaller-Straße 99, 8181 St. Ruprecht an der Raab; Ös- terreich; Tel.: +43(0)3178 28899, Internet: www.humimeter.com
Testo	Testo AG, Testo-Straße 1, 79853 Lenzkirch; Tel.: 07653 681-700, Fax: 07653 681-701, Internet: www.testo.de
TROTEC	TROTEC GmbH & Co. KG, Grebbener Straße 7, 52525 Heinsberg, Tel.: 02452 962-400, Fax: 02452 962-200, Internet: www.trotec.de
Wetekom	Westfalia, Industriestraße 1, 58093 Hagen, Tel.: (0180) 530 31 32, Fax: (0180) 530 31 30, Internet: www.westfalia.de
Wöhler	Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, Schützenstraße 41, 33181 Bad Wün- nenberg, Tel.: 02953 73-100, Fax: 02953 73-96100, Internet: www.woehler.de

*Tabelle 14: Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Scheitvorbereitung, über alle Holzarten, alle Wassergehalte und über alle Messpunkte*

Messgerät	Messbereich (w)	Variationskoeffizient Mittelwert (%)	
		Originalsheit	Scheit frisch gespalten
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>			
Schaller Humimeter BLW*	10 – 60 %	3,41	4,11
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	3,09	2,85
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	3,61	4,06
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	3,64	2,54
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,44</i>	<i>3,39</i>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>			
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	4,02	2,31
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	1,82	2,72
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	1,61	2,66
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	2,57	3,66
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	4,94	3,34
Doser LWM 2	5 – 23 %	4,06	2,79
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	1,85	1,79
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	4,81	3,47
Trotec T 500	5 – 33 %	4,63	3,80
Fuva S 06	6 – 50 %	3,40	2,60
testo 606-1*	8 – 48 %	2,96	4,33
PCE – 333	6 – 31 %	3,94	3,05
Trotec T 60	6 – 31 %	3,45	2,20
Wetekom MD-018	0 – 38 %	2,33	8,08
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	3,81	3,53
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,35</i>	<i>3,35</i>
<i>Dielektrische Messgeräte</i>			
Doser DM4 A	0 – 50 %	2,79	5,97
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	6,64	9,41
<i>Mittelwert</i>	-	<i>4,72</i>	<i>7,69</i>
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	<i>3,49</i>	<i>3,77</i>

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

*Tabelle 15: Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Lage des Messpunktes, über alle Holzarten, alle Wassergehalte und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzscheit*

Messgerät	Messbereich (w)	Variationskoeffizient Mittelwert (%)	
		Längsseite	Stirnseite
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>			
Schaller Humimeter BLW*	10 – 60 %	3,76	7,24
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	2,97	2,99
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	3,83	4,79
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	3,09	6,97
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,41</i>	<i>5,50</i>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>			
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	3,17	4,75
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	2,27	2,55
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	2,13	2,81
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	3,12	3,82
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	4,14	3,06
Doser LWM 2	5 – 23 %	3,43	4,18
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	1,82	3,15
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	4,14	7,78
Trotec T 500	5 – 33 %	4,21	3,78
Fuva S 06	6 – 50 %	3,00	5,09
testo 606-1*	8 – 48 %	3,64	6,41
PCE – 333	6 – 31 %	3,50	5,50
Trotec T 60	6 – 31 %	2,83	3,57
Wetekom MD-018	0 – 38 %	5,27	6,07
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	3,67	3,82
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,35</i>	<i>4,42</i>
<i>Dielektrische Messgeräte</i>			
Doser DM4 A	0 – 50 %	4,38	2,61
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	8,03	5,83
<i>Mittelwert</i>	-	<i>6,20</i>	<i>4,22</i>
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	<i>3,64</i>	<i>4,61</i>

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

*Tabelle 16: Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit der Holzart, über alle Messpunkte, alle Wassergehalte und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzscheit*

Messgerät	Messbereich (w)	Variationskoeffizient Mittelwert (%)	
		Buche	Fichte
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>			
Schaller Humimeter BLW*	10 – 60 %	5,72	3,76
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	3,21	2,78
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	3,62	4,38
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	5,38	3,01
<i>Mittelwert</i>	-	<i>4,48</i>	<i>3,48</i>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>			
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	3,63	3,51
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	2,97	1,84
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	1,86	2,66
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	3,97	3,77
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	4,97	3,99
Doser LWM 2	5 – 23 %	3,44	3,76
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	1,83	2,41
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	3,90	5,96
Trotec T 500	5 – 33 %	4,13	4,09
Fuva S 06	6 – 50 %	3,29	3,71
testo 606-1*	8 – 48 %	4,40	4,28
PCE – 333	6 – 31 %	4,68	3,54
Trotec T 60	6 – 31 %	3,25	2,85
Wetekom MD-018	0 – 38 %	8,64	2,98
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	3,32	4,02
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,89</i>	<i>3,56</i>
<i>Dielektrische Messgeräte</i>			
Doser DM4 A	0 – 50 %	4,76	3,28
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	9,18	6,11
<i>Mittelwert</i>	-	<i>6,97</i>	<i>4,70</i>
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	<i>4,29</i>	<i>3,65</i>

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).

*Tabelle 17: Mittelwert Variationskoeffizient von zwei Messungen hintereinander am gleichen Messpunkt in Abhängigkeit des Wassergehaltes im Holzsplit, über alle Messpunkte, alle Holzarten und über alle vorbereitenden Maßnahmen am Holzsplit*

Messgerät	Messbereich (w)	Variationskoeffizient Mittelwert (%)		
		w < 20 %	w = 20 – 30 %	w > 30 %
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einschlagelektrode</i>				
Schaller Humimeter BLW*	10 – 60 %	4,15	5,32	4,04
Greisinger GMH 3830 mit GHE 91	5 – 46 %	1,23	2,84	4,31
Gann Hydromette HT 65 mit M 18	4 – 38 %	1,57	5,13	4,51
Lignomat maxiLigno mit E 12	6 – 43 %	1,18	6,03	3,36
<i>Mittelwert</i>	-	<i>2,03</i>	<i>4,83</i>	<i>4,05</i>
<i>Leitfähigkeitsmessgeräte mit Einstechnadeln</i>				
PCE FME mit NF 4-17	5 – 50 %	1,43	4,86	3,26
Greisinger GMR 100	0 – 50 %	1,48	2,52	2,68
HEDÜ 2 in 1 Nadelmodus	0 – 44 %	4,07	1,87	1,70
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Nadel	5 – 32 %	0,93	4,42	4,07
BES Bollmann EASY <i>comfort</i> Kontakt	5 – 32 %	1,76	6,10	2,65
Doser LWM 2	5 – 23 %	1,42	4,76 *	3,56
Wöhler HBF 410 Nadelmodus	0 – 44 %	1,69	2,45	2,06
Gann Hydromette Compact S	9 – 33 %	2,94	5,14	6,32
Trotec T 500	5 – 33 %	2,26	3,70	5,88
Fuva S 06	6 – 50 %	2,82	2,61	5,20
testo 606-1*	8 – 48 %	0,58	5,30	5,55
PCE – 333	6 – 31 %	2,04	3,79	6,26
Trotec T 60	6 – 31 %	3,39	3,02	2,59
Wetekom MD-018	0 – 38 %	141,42	3,09	2,97
Lignomat miniLigno X	6 – 43 %	4,72	3,59	3,15
<i>Mittelwert</i>	-	<i>11,53</i>	<i>3,82</i>	<i>3,86</i>
<i>Dielektrische Messgeräte</i>				
Doser DM4 A	0 – 50 %	0,84	4,91	4,71
HEDÜ 2 in 1 Suchermodus	0 – 44 %	6,10	6,20	10,10
<i>Mittelwert</i>	-	<i>3,47</i>	<i>5,55</i>	<i>7,41</i>
<i>Mittelwert über alle Messgeräte</i>	-	<i>8,95</i>	<i>4,17</i>	<i>4,23</i>

\* Nach Rückfrage bei den Herstellern wurden die Anzeigewerte dieser Geräte entgegen den Anweisungen der Bedienungsanleitung nicht als „Brennstoff-Feuchte“ sondern als „Wassergehalt“ interpretiert (vgl. Kap. 2.1).





## Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetausche
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte –
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit



