

52

Berichte aus dem TFZ

Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln



Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln



Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln

Theresa Mendel
Dr. Daniel Kuptz
Andreas Überreiter
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 52

Straubing, Juli

Titel: Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
Projektleiter: Dr. Hans Hartmann
Autoren: Theresa Mendel, Dr. Daniel Kuptz, Andreas Überreiter, Dr. Hans Hartmann
Mitarbeiter: Albert Maierhofer

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22030314 gefördert (Projektlaufzeit 01.02.2015 bis 30.09.2016). Mittelvergabe erfolgte über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

© 2017
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 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.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

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

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Theresa Mendel, Dr. Daniel Kuptz, Andreas Überreiter, Dr. Hans Hartmann, Ulrich Eidenschink

Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2017
Gestaltung: Mendel, Kuptz, Überreiter

Fotonachweis: Mendel, Überreiter

Danksagung

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

- A & P Instruments e. K., Albert-Schweizer-Str. 16, 32758 Detmold
- ACO Automation Components, Industriestr. 2, 79793 Wutöschingen
- Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Eichenfeldstraße 1, 83607 Holzkirchen
- Doser Messtechnik GmbH & Co. KG, Kemptener Str. 73, 87629 Füssen
- Franz Ludwig GmbH, Budenheimer Str. 1, 55124 Mainz
- Gann Mess- und Regeltechnik GmbH, Schillerstraße 63, 70839 Gerlingen
- Greisinger electronic GmbH (GHM Messtechnik GmbH), Hans-Sachs-Straße 26, 93128 Regenstauf
- IMKO GmbH, Im Stöck 2, 76275 Ettlingen
- Krahl-Messtechnik (Sartorius AG), Tecklenburgstraße 8, 37120 Bovenden
- Schaller GmbH, Max-Schaller-Str. 99, A-8181 St. Ruprecht a. d. Raab
- SWR Engineering Messtechnik GmbH, Gutedelstr. 31, 79418 Schliengen
- Wöhler Technik GmbH, Gneisenaustraße 12, 80992 München

Weiterhin bedanken sich die Autoren bei ihren Projektpartnern, dem Deutschen Pelletinstitut GmbH und dem Projektbeirat des Projekts „HackZert“, für die fachliche Unterstützung und für die kollegiale Zusammenarbeit.

Die Studie wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter dem Förderkennzeichen 22030314 gefördert. Die Mittelvergabe erfolgte über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	13
1 Einleitung und Problemstellung	15
2 Zielsetzung und Aufbau der Studie	17
3 Stand des Wissens.....	19
3.1 Qualitätsparameter von Hackschnitzeln	19
3.2 Wassergehalt von Holzhackschnitzeln	21
3.3 Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts.....	22
3.3.1 Thermogravimetrische Verfahren.....	22
3.3.2 Elektrische Verfahren.....	24
3.3.3 Weitere Verfahren.....	24
4 Manuelle Schnellbestimmung des Wassergehalts	25
4.1 Material und Methoden	25
4.1.1 Auswahl der verwendeten Messgeräte	25
4.1.1.1 Standmessgeräte.....	26
4.1.1.2 Einstechlanzen	29
4.1.2 Versuchsdurchführung.....	32
4.2 Ergebnisse und Diskussion	36
4.2.1 Ergebnisse und Beurteilung der manuellen Messgeräte	37
4.2.2 Einfluss des Wassergehalts auf die Messgenauigkeit.....	48
4.2.3 Einfluss des Hackschnitzelsortiments auf die Messgenauigkeit.....	50
4.3 Exkurs: Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit dem Wöhler HF550 Holzfeuchtemessgerät / FW550 Feuchtwaaage	51
4.3.1 Material und Methoden	52
4.3.2 Ergebnisse und Diskussion.....	53
4.4 Zusammenfassende Bewertung der manuellen Messgeräte.....	57
5 Online-Schnellbestimmung des Wassergehalts von Hackschnitzeln	59
5.1 Material und Methoden	59
5.1.1 Auswahl verwendeter Messgeräte	59
5.1.2 Versuchsbrennstoffe und Versuchsdurchführung	60
5.2 Ergebnisse und Diskussion	62
5.2.1 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit vom Sortiment.....	63
5.2.2 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit von der Wassergehaltsstufe.....	65

5.3 Zusammenfassende Bewertung der Online-Messgeräte 68

Zusammenfassung 71

Summary 73

Quellenverzeichnis 75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick über Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts [3]	23
Abbildung 2:	Messverfahren der ausgewählten manuellen Messgeräte und der Referenzmethode	25
Abbildung 3:	Standmessgeräte: UX3081, MA35 und humimeter BMA	26
Abbildung 4:	Einstechlanzen: humimeter BL2, AD22-CMS22, Almemo Feuchtefühler, GMH 3851, Hydromette HT85T, HD2	29
Abbildung 5:	Gewählte Hackschnitzelsortimente und Trocknungsboxen zum Erreichen der Wassergehaltsstufen im Technikum des TFZ	32
Abbildung 6:	Schematischer Ablauf der Messreihe zur Bestimmung des Wassergehalts mittels manueller Messgeräte im Technikum des TFZ	33
Abbildung 7:	Gewünschte Wassergehaltsstufen für die Messreihe (erntefrisch (45–55 m-%), 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%)	34
Abbildung 8:	Lagerung in Kunststoffsäcke (a), Probenteilung (b), Messung mit Einstechlanzen (c), Einwiegen der Referenzmessung (d)	35
Abbildung 9:	Mittelwerte und Standardabweichungen (n = 5) der Referenzmessungen aller Sortimente und Wassergehaltsstufen (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)	37
Abbildung 10:	Wassergehaltsmessungen des MA35 im Vergleich zur Referenzmethode	39
Abbildung 11:	Wassergehaltsmessungen des UX3081 im Vergleich zur Referenzmethode	39
Abbildung 12:	Wassergehaltsmessungen des humimeter BMA im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	41
Abbildung 13:	Wassergehaltsmessungen des humimeter BL2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	42
Abbildung 14:	Wassergehaltsmessungen des AD22-CMS22 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	43
Abbildung 15:	Wassergehaltsmessungen des Almemo im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	45
Abbildung 16:	Wassergehaltsmessungen des GMH3851 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	45

Abbildung 17: Wassergehaltsmessungen des HT85T im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	46
Abbildung 18: Wassergehaltsmessungen des HD2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)	47
Abbildung 19: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert (*Error-Messungen und Messungen außerhalb des jeweiligen Messbereichs wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)	48
Abbildung 20: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs < 25 m-% (Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)	49
Abbildung 21: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs >25 m-% (*Error-Messungen wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)	50
Abbildung 22: Einfluss der Schüttdichte (auf einem einheitlichen Wassergehalt von 15 m-%) der einzelnen Sortimente auf die Messgenauigkeit der Messgeräte (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)	51
Abbildung 23: Messdurchführung und Messgerät: Wöhler HF550/FW550	52
Abbildung 24: Wassergehaltsmessungen der HF550/FW550 im Vergleich zur Referenzmethode (HS = Hackschnitzel, schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des möglichen Messbereichs)	54
Abbildung 25: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 vom Referenzwert, getrennt nach unterschiedlichen Wassergehaltsstufen	55
Abbildung 26: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 unterschiedlicher Sortimente vom Referenzwert (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb, HS = Hackschnitzel)	56
Abbildung 27: Versuchsaufbau: (a) untersuchte Hackschnitzelsortimente: Hackschnitzel aus Waldrestholz (Vordergrund) und Energierundholz (Hintergrund), (b) Messkanal befüllt mit Hackschnitzel, (c) Anbringung der Sensoren im Messkanal, (d) geschlossener Messkanal mit Stempel und (e) schematischer Aufbau des Versuchs.....	61
Abbildung 28: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Energierundholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)	64

Abbildung 29: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Waldrestholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)	64
Abbildung 30: Abweichung der Messwerte des AMMS-0-1-2-0 (ACO Automation Components) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen	66
Abbildung 31: Abweichung der Messwerte des BLO (Schaller GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen	66
Abbildung 32: Abweichung der Messwerte des FL-Digi Smart Basic (Franz Ludwig GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen	67
Abbildung 33: Abweichungen der Messwerte des M-Sens 2 (SWR Engineering Messtechnik GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen (schraffierter Bereich: Messbereich überschritten, Messung in den Berechnungen nicht berücksichtigt)	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifikation von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug) [14].....	20
Tabelle 2:	Partikelgröße von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [14].....	20
Tabelle 3:	Einteilung der Hackschnitzelsortimente nach DIN EN ISO 17225 (Teil 1 und Teil 4) [13], [14].....	36
Tabelle 4:	Mittlere Abweichung (absolut) der manuellen Messgeräte vom Referenzverfahren sowie die dazugehörige Regressionsanalyse	38
Tabelle 5:	Referenzwassergehaltswerte (in m-%) nach Sortiment und Spezifikation für die Versuchsreihe mit dem HF550/FW550.....	53
Tabelle 6:	Messbereich und Messprinzip der untersuchten Sensoren	59
Tabelle 7:	Mittlere Referenzwassergehalte in m-% (\pm Standardabweichung) bei den Messungen mit den Online-Messgeräten	62
Tabelle 8:	Übersicht über die Anzahl der Einzelmessungen und die durchschnittliche Messgenauigkeit der untersuchten Online-Messgeräte, getrennt nach Sortiment.....	63

1 Einleitung und Problemstellung

Mit dem Ziel, die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, haben sich alle 196 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Weltgemeinschaft auf der 21. Klimakonferenz in Paris auf ein gemeinsames Ziel im Kampf gegen den Klimawandel verständigt [8]. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, muss u. a. ein rascher Ausbau der Erneuerbaren Energien im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor erfolgen [8]. In Deutschland stellt die Biomasse aktuell die wichtigste Säule innerhalb der Erneuerbaren Energien dar. Vor allem bei der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Quellen trägt die Biomasse derzeit rund 88,1 % bei, wobei 69,2 % auf die Nutzung biogener Festbrennstoffe (v. a. Holz) zurückgehen (Stand Februar 2017 [9]).

Jährlich werden rund 68,4 Mio. Festmeter an Holz energetisch genutzt [30]. Zu den Holzbrennstoffen zählen Scheitholz, Hackschnitzel, Pellets und Briketts. Hackschnitzel sind dabei als einer der günstigeren Holzbrennstoffe zu bewerten und werden u. a. in privaten Hackschnitzelheizungen kleiner Leistung, in kommunalen Wärmenetzen und in großen Heiz(kraft)werken eingesetzt. Da Hackholz hauptsächlich als Koppelprodukt der Ernte von stofflichen Holzsortimenten anfällt, verringern sich sowohl die Erntekosten als auch die CO₂-Emissionen bei der Brennstoffproduktion [41] [55], da diese hauptsächlich dem Hauptprodukt Nutzholz angelastet werden. Zudem kann die Produktion weitestgehend in einer mechanisierten Verfahrenskette erfolgen [41]. Durch die dezentrale Hackschnitzelerzeugung und dem dezentralen Hackschnitzelverbrauch bleibt die Wertschöpfung vornehmlich im ländlichen Raum.

Bei Hackschnitzeln existiert eine große Bandbreite an unterschiedlichen Brennstoffqualitäten aufgrund ihrer Herkunft (Baumart, Sortiment, etc.) und der verwendeten Produktionsketten (Hacker, Maschineneinstellung, etc.) [25] [41]. Diese Vielfalt stellt Hackschnitzelproduzenten, Brennstoffhändler, Betreiber von Hackschnitzelfeuerungen und Kesselhersteller häufig vor große Herausforderungen, denn nur mit der Wahl des passenden Brennstoffs kann ein emissionsarmer, störungsfreier und energieeffizienter Betrieb von Hackschnitzelfeuerungen gewährleistet werden. Ebenso ist die genaue Beurteilung der Brennstoffqualität essentiell für eine transparente Abrechnung [24].

Vor allem die am 01. Januar 2015 in Kraft getretene Stufe 2 der 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) zwingt die Betreiber von neu errichteten Hackschnitzelkesseln im kleineren und mittleren Leistungsbereich (< 100 kW bis 1 MW), deutlich strengere Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid (0,4 g/Nm³) und für Staub (0,02 g/Nm³, jeweils bei 13 % O₂) einzuhalten [31]. Diese können u. a. nur mit einer fest definierten, hochwertigen und homogenen Brennstoffqualität erreicht werden, da nur mit gleichbleibenden Qualitäten die Verbrennungsführung der Anlage optimal an den Brennstoff angepasst werden kann [4] [47].

Neben der Schüttdichte, der Partikelgrößenverteilung und dem Aschegehalt zählt der Wassergehalt von Hackschnitzeln zu den wichtigsten Qualitätsparametern. Dieser beeinflusst unter anderem den Heizwert und die Lagerfähigkeit des Brennstoffs sowie das Emissionsverhalten bei der Verbrennung [37] [40] [47]. Als präzises und anerkanntes

Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln gilt die gravimetrische Messung der Brennstoffe durch Trocknung im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-1, bzw. nach DIN EN ISO 18134-2 (vereinfachtes Verfahren [22]). Die Bestimmung im Trockenschrank ist jedoch sehr zeit- und arbeitsintensiv.

In der Praxis ist häufig eine möglichst schnelle Bestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln erforderlich, sowohl für den Hackschnitzelproduzenten als auch für den Betreiber eines Hackschnitzelkessels. Besonders zur Gewährleistung eines transparenten An- und Verkaufs von Hackschnitzeln oder bei der Qualitätsbeurteilung von Hackschnitzeln bei Lieferung ist eine rasche Bestimmung vorteilhaft. Auf dem Markt ist hierzu eine Vielzahl an Schnellbestimmungsgeräten für den Wassergehalt von Holzhackschnitzeln erhältlich. Die Geräte bestimmen diesen auf unterschiedlichste Weise, z. B. gravimetrisch, kapazitiv oder über Infrarotstrahlung. Für die Verwendung dieser Geräte herrscht in der Praxis allerdings eine große Unsicherheit hinsichtlich der Genauigkeit und Aussagekraft der Messwerte. Auch lassen frühere Studien Zweifel an der Genauigkeit und damit an der Anwendbarkeit der Geräte vermuten [3] [10] [54].

2 Zielsetzung und Aufbau der Studie

Ziel der hier dargestellten Studie war die Überprüfung aktueller Messgeräte für die Schnellbestimmung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln. Der Fokus der Arbeit lag vor allem auf der Messgenauigkeit der Geräte, aber auch auf ihrer Handhabung, bzw. ihrer Praxistauglichkeit. Aus den Ergebnissen lassen sich direkt Empfehlungen für die Praxis ableiten, z. B. bezüglich der Eignung der Geräte für unterschiedliche Einsatzzwecke. Die Studie ergänzt dabei frühere Untersuchungen des TFZ zur Schnellbestimmung des Wassergehalts im Scheitholz (siehe TFZ-Bericht 16 [42]), aber auch ältere Messreihen mit Hackschnitzeln [3] [10] [54].

Die Arbeiten wurden als Teilvorhaben 2 des vom Bundesamt für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Projektes „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Hackschnitzel“ (HackZert) durchgeführt. Zunächst wurden in einer Marktrecherche verfügbare Schnellbestimmungsmethoden identifiziert. Danach wurde eine Auswahl geeigneter Messgeräte für die manuelle und mobile Messung, z. B. für den Einsatz an den Produktionsstätten der Brennstoffe oder am Heizwerk, getroffen. Mit den ausgewählten Messgeräten wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Hackschnitzelsortimenten durchgeführt. Als Referenzverfahren wurde die gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts mittels Trocknung der Brennstoffe im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-2 angewendet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 dieses Berichts wiedergegeben.

Des Weiteren wurden Online-Messgeräte zur Schnellbestimmung des Wassergehalts im kontinuierlichen Gutstrom untersucht. Auch hier wurde die Trockenschrankmethode als Referenzverfahren verwendet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dieses Berichts wiedergegeben.

3 Stand des Wissens

Ein wesentliches Teilziel des Projektes „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Hackschnitzel“ (HackZert) war die Überprüfung der Messgenauigkeit von Schnellbestimmungsgeräten zur Analyse des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln. In Kapitel 4 werden insgesamt 10 manuell betriebene, mobile Messgeräte in zwei Versuchsreihen bewertet. Die Geräte wurden anhand einer vorab stattgefundenen Marktanalyse ausgewählt. Kapitel 5 fokussiert auf Online-Messgeräte, die kontinuierlich im bewegten Gutstrom messen. Als Referenzverfahren wurde jeweils die Ofentrocknung im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-2 verwendet.

3.1 Qualitätsparameter von Hackschnitzeln

Durch die große Bandbreite an Rohstoffen und Prozessschritten für die Produktion von Holzhackschnitzeln ergibt sich eine hohe Variation innerhalb der Brennstoffqualität. Neben unterschiedlichen Ausgangsmaterialien (z. B. Sägereholz, Waldrestholz oder KUP) haben der Herstellungsprozess, z. B. die verwendete Maschine oder ausgewählte Maschineneinstellungen (z. B. Messerschärfe, Austragssystem), aber auch die Arbeitsweise in der Vorkette (Fällen und Rücken des Holzes), der Erfahrungsgrad der Maschinenführer, die Lagerung des Holzes oder weitere Aufbereitungsschritte am Biomassehof, z. B. die Trocknung oder die Siebung, einen Einfluss auf die Brennstoffqualität [38] [40].

Für einen störungsfreien Betrieb von Biomassefeuerungen ist die richtige Brennstoffqualität essentiell. Darüber hinaus beeinflusst diese das Emissionsverhalten der Anlagen. Gerade kleine Kessel sind für eine störungsfreie und emissionsarme Verbrennung auf eine definierte, gleichbleibende und hohe Brennstoffqualität angewiesen [39]. Qualitativ hochwertige Hackschnitzel zeichnen sich u. a. durch einen niedrigen Wassergehalt, einen geringen Grünanteil, einen geringen Feinanteil und durch scharfkantige Partikel aus [37] [41]. Die Brennstoffqualität sollte dabei möglichst homogen sein.

In der Praxis existiert eine Reihe von internationalen Normen rund um die DIN EN ISO 17225, in welchen die Verfahren zur Bestimmung wichtiger Qualitätsparameter geregelt und Spezifikationen für Brennstoffqualitäten definiert sind. Normen erleichtern dabei die Kommunikation im Holzhackschnitzelhandel zwischen Produzenten, Kesselherstellern und Kunden, z. B. hinsichtlich der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Hackschnitzelchargen oder der Wahl des richtigen Brennstoffs für die jeweilige Anlage. Daneben unterstützen sie Kesselhersteller, international gültige Definitionen hinsichtlich der optimalen Brennstoffqualität für die jeweiligen Kessel zu erstellen. Eine Norm ist dabei immer als Angebot für die Praxis zu sehen, eine gesetzliche Verpflichtung zu ihrer Einhaltung existiert meist nicht.

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen einen Auszug aus der DIN EN ISO 17225-4. In dieser werden Brennstoffspezifikationen (A1 bis B2) für Hackschnitzel zum Gebrauch in Kleinfeuerungsanlagen definiert. Es werden vier Klassen festgeschrieben. Die Klasse A1 stellt dabei die höchste Qualität, Klasse B2 die niedrigste Qualität dar. Für die Klasse A1

kommen nach DIN EN ISO 17225-4 eine Reihe naturbelassener Rohmaterialien, beispielsweise Vollbäume ohne Wurzeln oder Waldrestholz, in Frage. Der Wassergehalt für diese Klasse darf maximal 10 bzw. 25 m-% (Masse-%) aufweisen, der Aschegehalt maximal 1 m-% (wf = wasserfreie Bezugsbasis) betragen. Die Schüttdichte muss für die Klasse A1 größer als 150 kg/m^3 (ar = „as received“, dt. im Anlieferungszustand) sein.

Tabelle 1: Spezifikation von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug) [14]

Eigenschaft	Einheit	A1	A2	B1	B2
Herkunft und Quelle	-	Vollbäume ohne Wurzeln, Stammholz, Waldrestholz, chemisch unbehandelte Ernterückstände		Wald- und Plantagenholz, anderes naturbelassenes Holz, chemisch unbehandelte Holzrückstände	Wald- und Plantagenholz, anderes naturbelassenes Holz, Industrie-restholz, chemisch unbehandelte Holzrückstände
Wassergehalt	m-% (wf)	M10 \leq 10 M25 \leq 25	M35 \leq 35	Höchstwert ist anzugeben	
Aschegehalt	m-% (wf)	A1.0 \leq 1,0	A1.5 \leq 1,5	A3.0 \leq 3,0	
Schüttdichte	kg/m^3 (ar)	BD150 \geq 150 BD200 \geq 200 BD250 \geq 250	BD150 \geq 150 BD200 \geq 200 BD250 \geq 250 BD300 \geq 300	Kleinster Wert ist anzugeben	

wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand (engl. „as received“)

Für den Betrieb von kleineren, privaten Heizkesseln mit einem Leistungsbereich von bis zu 100 kW kommen vor allem die Klassen A1 und A2 in Frage. Die Klassen B1 und B2 richten sich eher an mittelgroße Heizwerke, z. B. für kommunale Wärmenetze [39].

Tabelle 2: Partikelgröße von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [14]

Hauptfraktion (mind. 60 m-%) in mm	Feinanteil in m-%	Grobanteil in m-% (Länge der Partikel, in mm)	Max. Länge von Partikeln in mm	Max. Quer- schnittsfläche des Grobanteils in cm^2
P16S (3,15 < P \leq 16)	\leq 15	\leq 6 (> 31,5 mm)	\leq 45	\leq 2
P31S (3,15 < P \leq 31,5)	\leq 10	\leq 6 (> 45 mm)	\leq 150	\leq 4
P45S (3,15 < P \leq 45)	\leq 10	\leq 10 (> 63 mm)	\leq 200	\leq 6

Hinsichtlich der Partikelgröße verwendet die DIN EN ISO 17225-4 drei Klassen. Hierin werden die durchschnittliche Partikelgröße (Hauptfraktion), der Feinanteil (Partikel $\leq 3,15 \mu\text{m}$), der Grobanteil, die maximale Partikellänge sowie die maximale Querschnittsfläche der übergroßen Partikel definiert. Die Partikelklassen der DIN EN ISO 17225-4 ersetzen dabei die in der Praxis immer noch gängigen „G“-Klassen (G30, G50 und G100) der ehemaligen Ö-Norm M1733.

3.2 Wassergehalt von Holzhackschnitzeln

Der Wassergehalt ist der wichtigste qualitätsbestimmende Parameter von Holzhackschnitzeln [37]. Er gibt die Masse an Wasser im Brennstoff, bezogen auf dessen Gesamtmasse in m-% (Masse-%), an.

Der typische Wassergehalt von frischen Waldhackschnitzeln liegt bei 45–55 m-% [41]. Bei Hackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb liegt er sogar häufig $> 55 \text{ m-%}$. Technisch oder natürlich, z. B. ungehackt im Polter oder im Haufwerk, getrocknete Hackschnitzel können dagegen deutlich niedrigere Wassergehalte von 15–35 m-% aufweisen. Hackschnitzel mit Wassergehalten unter 15 m-% können dagegen i. d. R. nur mit einer technischen Trocknung erreicht werden [40]. Von Seiten des Gesetzgebers (z. B. 1. BImSchV [6]) und der Kesselhersteller werden daher beim Betrieb von Biomassefeuerungen genaue Ansprüche an den Wassergehalt der Brennstoffe gestellt. Besonders Heizkessel im kleineren bis mittleren Leistungsbereich von $< 100 \text{ kW}$ bis 500 kW sind häufig auf Hackschnitzel mit einem definierten Wassergehalt von $< 15 \text{ m-%}$, von 15–25 m-% oder von 25–35 m-% angewiesen [39]. Größere Heiz(kraft)werke hingegen können auch mit Hackschnitzeln mit Wassergehalten über 35 m-% bis hin zu frischen Brennstoffen zuverlässig betrieben werden [41].

Das Wasser kommt im Holz sowohl in freier als auch in gebundener Form vor. Freies Wasser befindet sich in den Zellhohlräumen bzw. Interzellularen, ist nicht gebunden und kann leicht durch natürliche Trocknungsprozesse entzogen werden. Das gebundene Wasser befindet sich innerhalb der Zellwände und wird vorwiegend durch hygroskopische Kräfte der Zellwände gebunden. Der Fasersättigungspunkt beschreibt den Wassergehalt, ab dem Wasser nur noch in gebundener Form innerhalb der Zellwände vorliegt. Dieser liegt je nach Holzart zwischen 19 und 25 m-% [37]. Gebundenes Wasser ist durch natürliche Trocknungsprozesse schlecht entfernbar. Eine Trocknung unter den Fasersättigungspunkt benötigt daher i. d. R. technische Trocknungsverfahren. Wird Holz unter den Fasersättigungspunkt getrocknet, beginnt das Holz zu schwinden.

Der Wassergehalt beeinflusst direkt den Heizwert und die Lagerfähigkeit der Brennstoffe. Daneben beeinflusst er die bei der Verbrennung freiwerdenden Emissionen an CO und Feinstaub sowie den Anfall an Asche. Weiterhin beeinflusst der Wassergehalt die Schüttdichte, sowohl durch die Masse des Wassers an sich als auch durch Schrumpfungseffekte, und somit das Gewicht des Brennstoffes bei der Lieferung von Holzhackschnitzeln [37] [41]. Eine Abrechnung nach Masse mit einheitlicher Bezugsbasis ist daher zu empfehlen (z. B. t_{atro} = Tonne absolut trockener Brennstoff [24]).

Neben dem Wassergehalt existiert die Feuchte als weiteres Maß für den Wasseranteil in Biomassen. Die Feuchte stellt die Masse an Wasser bezogen auf die Trockenmasse der Materialien dar und kann dadurch Werte über 100 m-% annehmen (bei Wassergehalten > 50 m-%). Die Feuchte findet vor allem in der Holzverarbeitenden Industrie Anwendung, wird aber teilweise auch bei der thermischen Nutzung angegeben [42]. Ein direkter Vergleich von Wassergehalt und Feuchte erfordert die Umrechnung auf eine einheitliche Bezugsbasis. Diese zwei Parameter werden jedoch in der Praxis häufig synonym verwendet, wodurch es zwangsläufig zu Missverständnissen kommt.

3.3 Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts

Zur Messung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln existiert eine Vielzahl an Messverfahren und Messgeräten. Neben dem Messprinzip (gravimetrisch, elektrisch, etc.) unterscheiden sich die einzelnen Methoden in ihrer Genauigkeit, in der Zeitdauer bis zur Ergebnisausgabe, im Anschaffungspreis, in ihren Betriebskosten oder in der von ihnen untersuchten Probengröße. Darüber hinaus unterscheiden sie sich hinsichtlich der Messdurchführung (z. B. manuelle/automatische Messung an einer unbewegten Probe oder Messung im kontinuierlichen Gutstrom) und, im Fall von mobilen Geräten, hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit im Feld (Witterung, Akkulaufzeit, Handhabbarkeit).

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über alle Messprinzipien bzw. Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts von Biomasse. Zum genaueren Verständnis wird im Folgenden näher auf die Messverfahren eingegangen, die in den hier dargestellten Versuchsreihen verwendet wurden.

3.3.1 Thermogravimetrische Verfahren

Bei den thermogravimetrischen Verfahren wird der Brennstoff getrocknet, bis dessen Massenkonstanz erreicht wird. Das gängigste und genaueste Messverfahren zur gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung ist die Trocknung der Hackschnitzel in einem **Trockenschrank** (DIN EN ISO 18134 [22]). Über den Massenverlust bei der Ofentrocknung kann der Wassergehalt des Brennstoffs errechnet werden. Als weitere thermogravimetrische Verfahren existieren **Infrarottrockner**. Gravimetrische Verfahren sind unabhängig von der Schüttdichte und der Temperatur des Probenmaterials. Für die meist geringe Probenmenge im Vergleich zur Gesamtcharge ist eine repräsentative Probennahme einschließlich Homogenisierung der Probe ausschlaggebend.

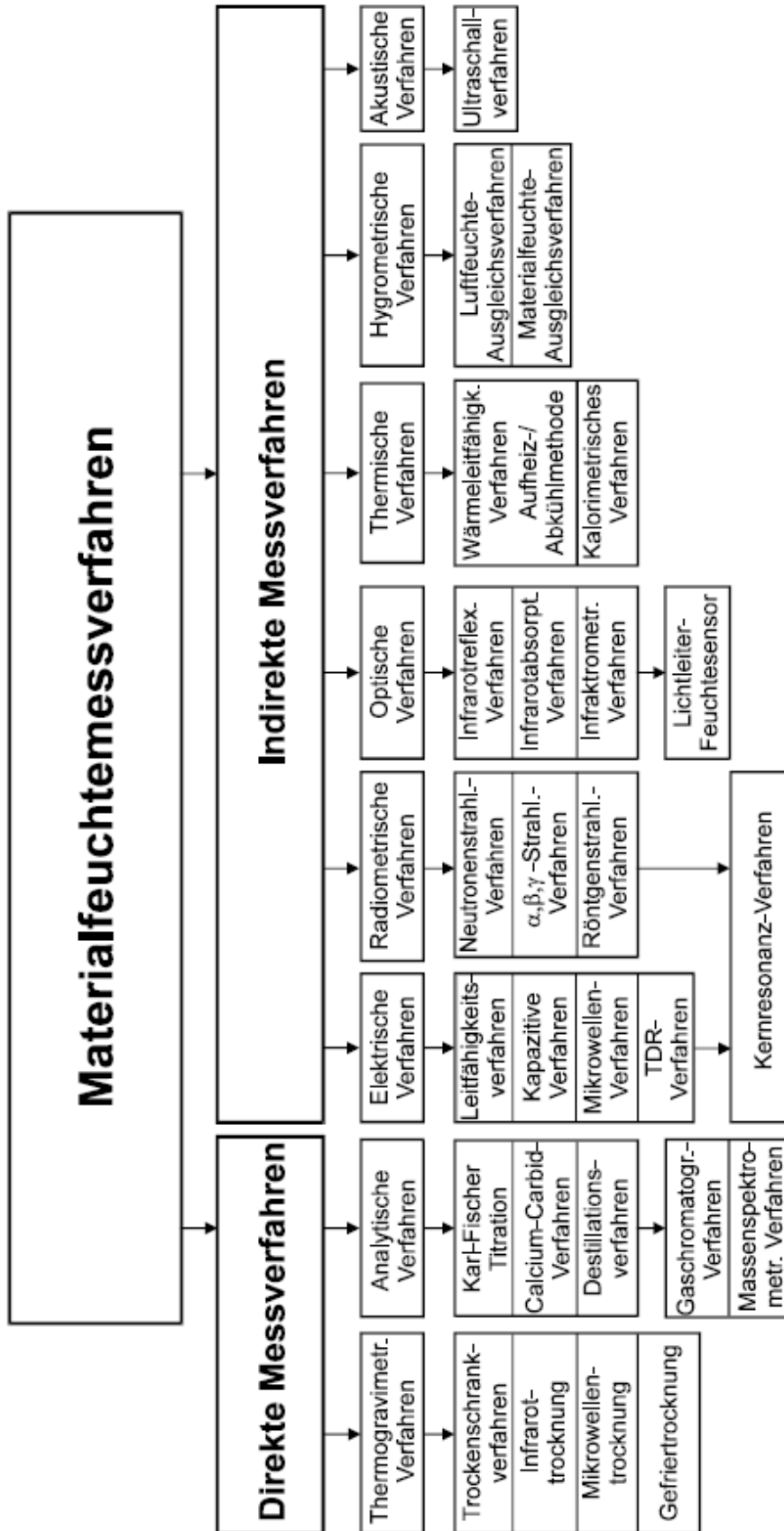


Abbildung 1: Überblick über Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts [3]

3.3.2 Elektrische Verfahren

Im Gegensatz zu den gravimetrischen Messverfahren messen elektrische Messverfahren indirekt über den Umweg einer Messung von elektrischen Werten. Diese Verfahren verändern im Gegensatz zu den gravimetrischen Messverfahren die Eigenschaften der Hackschnitzel nicht. Kapazitive Verfahren, Leitfähigkeitsverfahren oder Time-Domain-Reflectometry-Verfahren (TDR, dt. Zeitbereichs-Reflektometrie) gruppieren sich zu den elektrischen Messmethoden.

Bei den **kapazitiven Verfahren** wird der Wassergehalt über einen Vergleich der Dielektrizitätskonstante von Wasser zu Holz errechnet. Wasser besitzt eine Dielektrizitätskonstante von 78,2, Holz von 1,5–3. Daher kann schon ein geringer Wassergehalt in Hackschnitzeln über dieses Verfahren festgestellt werden. **Leitfähigkeitsverfahren** messen den Wassergehalt anhand des elektrischen Widerstands. Dieser sinkt bei steigendem Wassergehalt. Je mehr Wasser in Hackschnitzeln vorhanden ist, desto leitfähiger werden diese und umso geringer ist der elektrische Widerstand [33]. **TDR-Verfahren** ermitteln den Wassergehalt über die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung. Ein hoher Wassergehalt führt zur Ausbremsung dieser Strahlung [3].

3.3.3 Weitere Verfahren

Weitere Verfahren, die in der Praxis Anwendung finden, allerdings für die hier dargestellten Untersuchungen primär aus hohen Anschaffungskosten nicht gewählt wurden, sind v. a. optische Verfahren, z. B. die Messung mittels Infrarot-Strahlung (NIR). Auch Mikrowellenstrahlung wird als elektrisches Verfahren zur Messung des Wassergehalts angewendet. Dies ist nicht zu verwechseln mit der Mikrowellentrocknung (gravimetrisch), welche aus Sicherheitsaspekten eher nicht zu empfehlen ist. Weder optische Messgeräte noch Mikrowellenstrahlung fanden in der hier dargestellten Studie Anwendung, weshalb nicht weiter auf diese Techniken eingegangen wird. Weitere, weniger praxisrelevante Verfahren, z. B. die Gefriertrocknung oder die Wassergehaltsbestimmung mittels radioaktiven Materialien, werden ebenfalls nicht weiter erläutert.

4 Manuelle Schnellbestimmung des Wassergehalts

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer ersten Versuchsreihe mit mobilen Messgeräten dargestellt, die sowohl am Betriebshof, aber auch direkt bei der Brennstoffproduktion im Feld verwendet werden können (nachfolgend als „manuelle Messgeräte“ bezeichnet). Die Auswahl der Geräte, die verwendeten Hackschnitzelsortimente und die Versuchsplanung und -durchführung werden in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 erläutert. Die Methodik orientiert sich dabei an dem Vorgehen in dem Projekt „Bionorm 2“ [10] [54].

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Auswahl der verwendeten Messgeräte

Zunächst wurde eine umfangreiche Recherche über die derzeit am Markt verfügbaren Messgeräte durchgeführt. Die Auswahl erfolgte anhand des Anschaffungspreises, der mobilen Einsetzbarkeit der Geräte und dem Ziel, eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Messverfahren zu untersuchen. Von 20 kontaktierten Herstellern konnten neun Messgeräte bzw. acht Hersteller als Partner für die Versuchsreihe gewonnen werden. Diese stellten ihre Messgeräte leihweise zur Verfügung. Zum Einsatz kamen gravimetrische, kapazitive, Leitfähigkeits- und TDR-Messverfahren. Die Geräte lassen sich zudem in drei Standmessgeräte und sechs Einstechlanzen unterteilen (Abbildung 2).

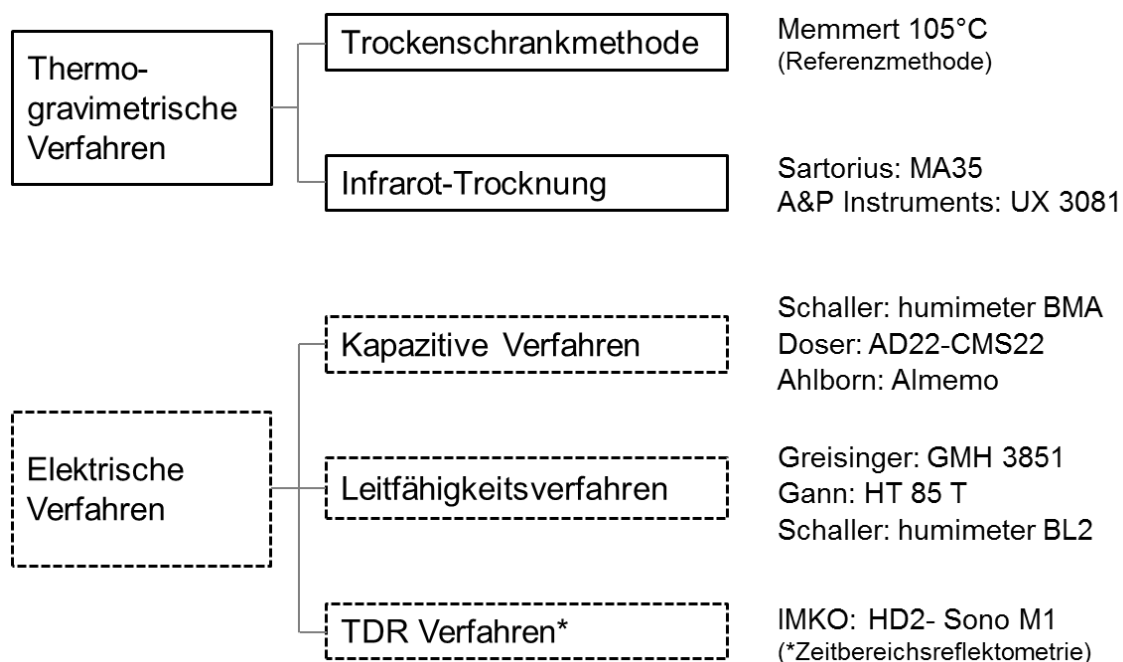
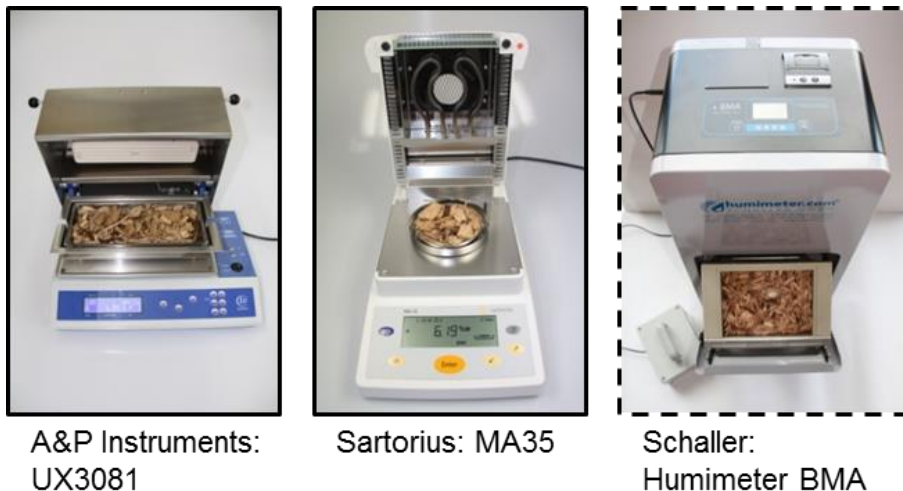


Abbildung 2: Messverfahren der ausgewählten manuellen Messgeräte und der Referenzmethode

Alle Geräte verfügen über eine Digitalanzeige, mit Hilfe derer der Wassergehalt bzw. die Feuchte direkt abgelesen werden können. Die verwendeten Geräte und das Vorgehen bei den Einzelmessungen werden im Folgenden kurz beschrieben.

4.1.1.1 Standmessgeräte

In der Versuchsreihe wurden insgesamt drei Standmessgeräte verwendet (Sartorius MA35, A&P Instruments UX3081, Schaller humimeter BMA, Abbildung 3). Mit allen Geräten wurden fünf Hackschnitzelsortimente bei unterschiedlichen Wassergehaltsstufen gemessen (siehe Abschnitt 4.1.2). Dabei wird eine repräsentativ gewonnene Teilprobe in das Gerät gegeben und mit unterschiedlichen Messprinzipien (gravimetrisch über Infrarottrocknung oder kapazitiv) der Wassergehalt der Probe ermittelt. Die verwendeten Geräte unterscheiden sich neben dem Messprinzip vor allem in der Größe der zu analysierenden Hackschnitzelprobe.



A&P Instruments:
UX3081

Sartorius: MA35

Schaller:
Humimeter BMA

Abbildung 3: Standmessgeräte: UX3081, MA35 und humimeter BMA

Sartorius MA35 (Infrarottrockner)

Der Infrarottrockner MA35 von Sartorius (Abbildung 3) gehört zu den gravimetrischen Messverfahren. Der Messbereich des MA35 liegt zwischen 0 und 100 m-% Wassergehalt. Das Gerät besteht aus einer Basiseinheit und einer Klapphaube, in der sich der Infrarotstrahler befindet. Die Basiseinheit beinhaltet eine Waage, auf der ein aufsteckbarer Schalen-träger angebracht ist. Auf dem Schalen-träger kann eine kleine Aluminiumprobenschale mit einer Probe aufgelegt werden. Die Probe wird durch eine Infrarotheizspirale auf einen möglichst wasserfreien Zustand getrocknet. Laut Herstellerangaben wird dabei eine Wellenlänge von 1,8 bis 2,4 μm verwendet. Der Wassergehalt berechnet sich über die Gewichtsabnahme der Probe. Der einstellbare Temperaturbereich der Heizspirale liegt zwischen 40 °C und 160 °C mit einer Genauigkeit von 1 °C. Die maximale Einwaage inklusive der Probenschale liegt bei 35 g. Die Genauigkeit der Wägung liegt bei 1 mg [44]. Der Start der Messung erfolgt entweder manuell über eine Eingabetaste oder

automatisch beim Schließen des Deckels. Das Ende der Messung kann entweder nach einer vorgewählten Zeit erfolgen oder automatisch, wenn die Gewichtskonstanz der Probe durch Trocknung erreicht wird.

Für die Versuchsreihe wurden jeweils ein automatischer Messbeginn (Schließen des Deckels) und ein automatisches Messende (Gewichtskonstanz der Probe) gewählt. Unter welchen Bedingungen von einer Gewichtskonstanz der Probe ausgegangen wird, kann beim MA35 nicht manuell eingestellt werden. Die Ergebnisanzeige erfolgt entweder als Wassergehalt (in m-%), als Feuchte (in m-%), als Trockenmasse (in m-%) oder als Restgewicht der Probe (in g) [44].

Der Hersteller empfiehlt, das Gerät auf einer erschütterungsarmen und ebenen Fläche aufzustellen und das Gerät vor starken Temperaturschwankungen, direkter Sonneneinstrahlung, direktem Luftzug und Feuchte zu schützen. Die Stromversorgung erfolgt über einen 230 V Netzanschluss.

In der hier dargestellten Messreihe wurde eine Trocknungstemperatur von 105 °C analog dem Referenzverfahren mittels Trockenschrank gewählt. Die Probenmenge lag aufgrund der geringen Dichte von Hackschnitzeln, je nach Wassergehalt und Holzsorte, zwischen 6 und 15 g. Um eine relativ gleichmäßige Trocknung sicherzustellen, wurden die Hackschnitzel in nur einer Schicht auf die Probenschale gelegt. Das Messgerät wurde zwischen den Einzelmessungen mit Druckluft gereinigt. Pro Material und Wassergehaltsstufe wurden bis zu drei Messungen ($n = 3$) mit dem Gerät durchgeführt.

A&P Instruments UX3081 (Infrarottrockner)

Der Infrarottrockner UX3081 von A&P Instruments (Abbildung 3) misst ebenfalls nach dem gravimetrischen Verfahren. Der Messbereich des UX3081 liegt analog dem MA35 zwischen 0 und 100 m-% Wassergehalt. Der Unterschied zwischen den beiden Geräten liegt vor allem in den größeren Abmaßen, dem höheren Gewicht und der größeren Probenschale des UX3081.

Das Messprinzip erfolgt analog der Messung mit dem MA35 über die Trocknung und Messung der Gewichtsabnahme einer eingewogenen Probe. Der Wellenbereich des Infrarotstrahlers liegt laut Herstellerangaben zwischen 2 und 10 μm . Die maximale Einwaage liegt bei 750 g mit einer Genauigkeit von 1 mg [1]. Der einstellbare Temperaturbereich liegt zwischen 40 °C und 170 °C mit einer Genauigkeit von 1 °C. Das Ergebnis kann wahlweise als Feuchte (in m-%), als Wassergehalt (in m-%), als Trockenmasse (in m-%), als Restgewicht der Probe (in g) und als Gewichtsverlust der Probe (in g) angezeigt werden [1]. Als Aufstellbedingungen empfiehlt der Hersteller die gleichen Bedingungen wie beim MA35. Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls über einen 230 V Netzanschluss.

Analog zu den Messungen mit dem Sartorius MA35 wurde eine Trocknungstemperatur von 105 °C gewählt. Als Einwaage wurden durchschnittlich 35 g an Hackschnitzeln eingewogen. Der Beginn der Messung erfolgte manuell über das Einschalten des Infrarotstrahlers. Das Messende erfolgte entweder nach einer voreingestellten Zeit oder über eine Automatikfunktion, welche die Messung nach Erreichen der Gewichtskonstanz beendet. Für die hier dargestellte Messreihe wurde letzteres gewählt. Zur Anpassung der

Abschaltautomatik können das Gewichtabfrageintervall, der Abfragebeginn und die Gewichtsabnahme, ab der die Automatik von einer Gewichtskonstanz ausgeht, eingestellt werden. Als Abfragebeginn wurde die empfohlene und werkseitig voreingestellte Zeit von 3 min. übernommen. Als Abfrageintervall wurden 20 Sekunden gewählt (Herstellerempfehlung). Als Wert für den Parameter „Gewichtsabnahme“, bei dem die Automatik von einer Gewichtskonstanz ausgeht, wird ein Wert empfohlen, der ca. 0,1 m-% der Hackschnitzleinwaage entspricht. Bei einer durchschnittlichen Einwaage von ca. 35 g wurde dieser Wert auf 30 mg eingestellt. Die Reinigung und die Messanzahl sind analog zum MA35. Pro Material und Wassergehaltsstufe wurden bis zu drei Messungen ($n = 3$) mit dem Gerät durchgeführt.

Schaller humimeter BMA (kapazitives Verfahren)

Das Schaller humimeter BMA (Abbildung 3) misst nach dem kapazitiven Messprinzip. Der Messbereich des BMA liegt bei Hackschnitzeln zwischen 5 und 70 m-% Wassergehalt [45]. Hauptbestandteil des BMA ist eine herausnehmbare, 12 l fassende Messkammer. Zur Wassergehaltsbestimmung wird die Messkammer komplett mit Probenmaterial befüllt. Überschüssiges Material wird vor der Messung mit Hilfe eines Kantholzes abgestrichen. Anschließend wird die Messkammer in eine seitlich an dem Messgerät angebrachte Klappe eingehängt und in das Gerät eingeklappt.

Zu Beginn der Messung wird das Probenmaterial in der Messkammer automatisch mit einem Stempel von oben her verdichtet. Hierdurch soll eine einheitliche Verdichtung des Materials sichergestellt und etwaige Anwenderfehler vermieden werden. Neben dem Wassergehalt (in m-%) misst das Gerät die Temperatur (in °C) und die Schüttdichte des Probenmaterials (in kg/m^3), sowohl im Anlieferungszustand als auch auf wasserfreier Bezugsbasis. Die Messwerte können gespeichert und mit einem optional erhältlichen Drucker direkt vor Ort ausgedruckt werden. Zusätzlich kann die Messbox BMA somit die Schüttdichte bestimmen (aufpreispflichtig). Das Messgerät besitzt eine Datenschnittstelle, über die die Messwerte über einen PC ausgelesen werden können. Die Stromversorgung erfolgt wahlweise über ein Stromnetzteil oder – wie beim Testgerät der Versuchsreihe – über einen externen Akku.

Im Messgerät sind verschiedene Kennlinien für die Wassergehaltsbestimmung von unterschiedlichen Rohmaterialien (z. B. Hackschnitzel, Miscanthushäckselgut, Holzpellets, Stroh) hinterlegt. Die für die Versuchsreihe relevanten Kennlinien waren „Hackgut“, „Grobhackgut“ und „Industriehackgut“. Die Kennlinien orientieren sich dabei anhand der Spezifikationen für die Partikelgrößenverteilung von Hackschnitzeln nach der mittlerweile durch die DIN EN ISO 17225-4 abgelöste DIN EN 14961-4 [11]. Besondere Unterscheidungen werden zudem hinsichtlich des Feinanteils (Partikelgröße $\leq 3,15$ mm) getroffen. Eine bebilderte Beschreibung im Handbuch des Gerätes zur Einteilung der Hackgutsortimente erleichtert die Wahl der richtigen Kennlinie. In der Versuchsreihe wurden die Messwerte aller drei Hackgutkennlinien aufgezeichnet. Das Messgerät wurde zwischen den Versuchen regelmäßig mittels Druckluft gereinigt. Pro Material und Wassergehaltsstufe wurden fünf Messungen durchgeführt ($n = 5$).

4.1.1.2 Einstechlanzen

In der Versuchsreihe wurden neben den drei Standmessgeräten sechs Einstechlanzen zur Schnellbestimmung des Wassergehalts untersucht. Zwei davon messen mit dem kapazitiven Messverfahren, drei mit dem Leitfähigkeitsverfahren und eines mit TDR-Verfahren.



Abbildung 4: Einstechlanzen: humimeter BL2, AD22-CMS22, Almemo Feuchtefühler, GMH 3851, Hydromette HT85T, HD2

Die Messungen wurden für alle Geräte unter gleichen Bedingungen durchgeführt, indem der Messkopf der jeweiligen Lanze in eine festgelegte Menge an Hackschnitzeln eingestochen wurde. Alle Messgeräte mit Einstechlanzen sind durch ihre handliche Bauweise flexibel und mobil einsetzbar. Zudem sind alle Geräte mit Akkus ausgerüstet.

Pro Material und Wassergehaltsstufe wurden 10 Messungen je Gerät durchgeführt ($n = 10$). Für die einzelnen Messungen wurde die jeweilige Lanze jeweils erneut in die Hackschnitzelprobe eingestochen (vgl. Abschnitt 4.1.2). Im Folgenden werden die verwendeten Messlanzen kurz beschrieben.

Schaller humimeter BL2 (Leitfähigkeitsverfahren)

Das Messgerät humimeter BL2 von Schaller (Abbildung 4) besteht aus einer 115 cm langen Einstechlanze und einem Universal-Messgerät, welches auch für andere Messköpfe, z. B. für die Bestimmung des Wassergehalts im Holzsplit, verwendet werden kann. Das BL2 misst nach dem Leitfähigkeitsverfahren. Der Messbereich für den Wassergehalt erstreckt sich über einen Bereich von 10 bis 50 m-% [46]. Die Messwertanzeige erfolgt als Wassergehalt.

Ähnlich wie beim humimeter BMA von Schaller sind auch in der Messlanze verschiedene Kennlinien wie z. B. für „Hackgut“, „Grobhackgut“, „Industriehackgut“, „Pellets“ oder „Sägespäne“ hinterlegt. Analog zum BMA sind die einzelnen Hackschnitzelkennlinien den Partikelgrößenklassen für Hackschnitzel nach DIN EN 14961-4 [11] zugeteilt. Eine bebilderte Hilfestellung im Handbuch des Gerätes erleichtert erneut die Zuordnung der Kennlinien. Zusätzlich zum Wassergehalt zeigt das Display des Messgeräts die Temperatur des Materials an. Zum Temperaturabgleich sollte die Einstechlanze laut Hersteller 30 min. vor Messbeginn bei der Hackschnitzelprobe gelagert werden. Nach dem Einschalten des Messgerätes erfolgt die Messung und Messwertanzeige kontinuierlich.

Ahlborn Almemo Feuchtefühler (kapazitives Verfahren)

Die Länge der Messlanze FH A696-GF1 von Ahlborn (Abbildung 4) beträgt 110 cm, wobei der Sensor selbst ca. 20 cm lang ist und an drei Verlängerungsrohre geschraubt wird. Das dazugehörige Universalmessgerät Almemo 2470–2 kann einen Wassergehaltsbereich von 0–50 m-% anzeigen (mündliche Angabe des Herstellers). Die Anzeige der Messwerte erfolgt als Feuchte (in m-%) und erfordert eine anschließende Umrechnung auf den Wassergehalt (in m-%). Die Messung erfolgt kapazitiv. Der Radius des Messbereichs um den Sensor beträgt laut Herstellerangabe 10 cm [2]. Das Messgerät wurde mit nur einer hinterlegten Kalibrierkurve ausgeliefert. Eine kundeneigene Kalibrierung ist durch ein für Anwender gesperrtes Einstellungsmenü nicht möglich. Nach Einschalten des Messgerätes erfolgt die Messung und Anzeige der Messwerte kontinuierlich.

Doser AD22-CMS22 (kapazitives Verfahren)

Das Wassergehaltsmessgerät von Doser besteht aus dem universellen Anzeigegerät AD22 und dem Messsensor CMS22 (Abbildung 4). Dieser wird an drei Verlängerungsrohre angeschraubt. Der Sensor selbst hat eine Länge von 20 cm. Zusammen mit den Verlängerungsrohren ergibt die Lanze eine Länge von 107 cm. Das Messverfahren ist kapazitiv. Die Anzeige des Messwertes erfolgt in Feuchte (in m-%), wodurch die anschließende Umrechnung in Wassergehalt (in m-%) erforderlich ist. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 50 m-% Wassergehalt. Der Messsensor sollte laut Herstellerangaben mit mindestens 5 cm Hackschnitzel umgeben sein [26]. Zusätzlich zur Anzeige der Feuchte in m-% kann auch der elektrische Rohwert ausgegeben werden. Dieser kann für kundenspezifische Kalibrierungen verwendet werden. Im Versuch wurde sowohl der Feuchtegehalt als auch der elektrische Rohwert aufgezeichnet. Nach dem Einschalten des Gerätes erfolgt die Messung und Anzeige der Messwerte kontinuierlich.

Greisinger GMH3851 (Leitfähigkeitsverfahren)

Das Handmessgerät GMH3851 von Greisinger (Abbildung 4) ist mit einer Messlanze von ca. 40 cm Länge ausgestattet. Die Mindesteinstechtiefe des Messkopfes beträgt laut Herstellerangaben 10 cm [34]. Das Messprinzip erfolgt nach dem Leitfähigkeitsverfahren. Der Messbereich liegt bei einem Wassergehalt von 4,7–50 m-% (bzw. 5–100 m-% Feuchte) [34]. In der Geräteanleitung wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass der Anzeigewert außerhalb 8 bis 40 m-% zunehmend ungenau wird und nur als Tendenz verwendet werden soll. Die Anzeige des Messwertes erfolgt wahlweise als Feuchte (in m-%) oder als Wassergehalt (in m-%) und wird kontinuierlich nach dem Einschalten des Gerätes angegeben. Die Messlanze besitzt einen eingebauten Temperatursfühler zur Kompensation von Temperaturschwankungen des Probenmaterials. Neben der Hackschnitzelkalibrierung sind auch andere Kalibrierungen, z. B. für Stroh oder Getreide, hinterlegt. Eine Kalibrierung durch den Kunden ist mit diesem Gerät nicht möglich.

Gann Hydromette HT85T (Leitfähigkeitsverfahren)

Das Wassergehaltsmessgerät von Gann besteht aus dem Handgerät Hydromette HT85T und einer Doppellanze mit zwei parallel laufenden, 50 cm langen Einstechelektroden (Abbildung 4). Am oberen Ende jeder Elektrode (griffseitig) befindet sich jeweils eine 10 cm lange Isolierhülse aus Kunststoff. Diese sollen eine Messverfälschung durch Oberflächenfeuchtigkeit ausschließen. Das Gerät ermittelt den Wassergehalt über die elektrische Leitfähigkeit der Hackschnitzel [33].

Die Anzeige erfolgt als Feuchte (in m-%), sodass eine Umrechnung in Wassergehalt (in m-%) notwendig ist. Der Messbereich liegt zwischen 4 und 100 m-% Feuchte bzw. bei 3,85 bis 50 m-% Wassergehalt. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass oberhalb des Fasersättigungspunktes die Messung an Genauigkeit verlieren kann [33].

Vor der Messung muss die Holzart der Probe entsprechend einer beigefügten Holzsorten-Tabelle einer Ziffer von 1 bis 4 zugeordnet und am Gerät eingestellt werden. Zusätzlich ist die Materialtemperatur über Temperaturkorrekturschalter einzustellen. In der Versuchsreihe wurde die Temperatur entsprechend der Raumtemperatur und nach Empfehlung des Herstellers auf 20 °C eingestellt. Zur Verbesserung des Kontakts zwischen Material und Einstechelektroden soll die Andruckscheibe zwischen Griff und Elektroden direkt auf die Hackschnitzel gedrückt werden. Die Doppellanze sollte komplett in der Probe versenkt werden. Zum Start der Messung muss eine Taste gedrückt werden. Der Messwert wird nur während dem Tastendruck angezeigt.

IMKO HD2 (TDR-Verfahren)

Das TDR-Messgerät von IMKO besteht aus dem Grundgerät HD2 und einer Einstechsonde (Abbildung 4). Die Sonde besteht aus zwei parallel verlaufenden, 13 cm langen metallischen Stäben. Es misst nach dem TRIME-TDR-Verfahren [36]. Der Messbereich liegt bei einem Wassergehalt von 0 bis 50 m-% (mündliche Herstellerangabe). Die Anzeige der Messwerte erfolgt direkt als Wassergehalt (in m-%).

In der Ausleseinheit waren drei Kennlinien mit den Namen „normal“, „sensitiv“ und „weniger sensitiv“ hinterlegt. Zusätzlich kann der elektrische Rohwert angezeigt werden.

Während der Messreihe wurden die Messwerte aller Kennlinien und der elektrische Rohwert notiert. Um eine hohe Messgenauigkeit unter Laborbedingungen zu gewährleisten, setzt der Hersteller voraus, dass die Sondenstäbe in voller Länge in das Probenmaterial eingestochen werden. Das Materialvolumen sollte mindestens 10 l betragen. Die Füllhöhe sollte dabei 5 cm größer sein als die Stablänge [36]. Außerdem sollte der Behälter zylindrisch aufgebaut sein und aus nichtmetallischem Material bestehen. Die Messung erfolgt beim Tastendruck. Dabei erfolgt je Tastendruck eine neue Messung.

4.1.2 Versuchsdurchführung

Um eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Hackschnitzelsortimente zu untersuchen, wurden folgende fünf praxisrelevante Sortimente ausgewählt: Energierundholz aus Fichte und Buche, Waldrestholz aus Nadelholz und Laubholz sowie Pappelholz aus dem Kurzumtrieb (Abbildung 5).



Abbildung 5: Gewählte Hackschnitzelsortimente und Trocknungsboxen zum Erreichen der Wassergehaltsstufen im Technikum des TFZ

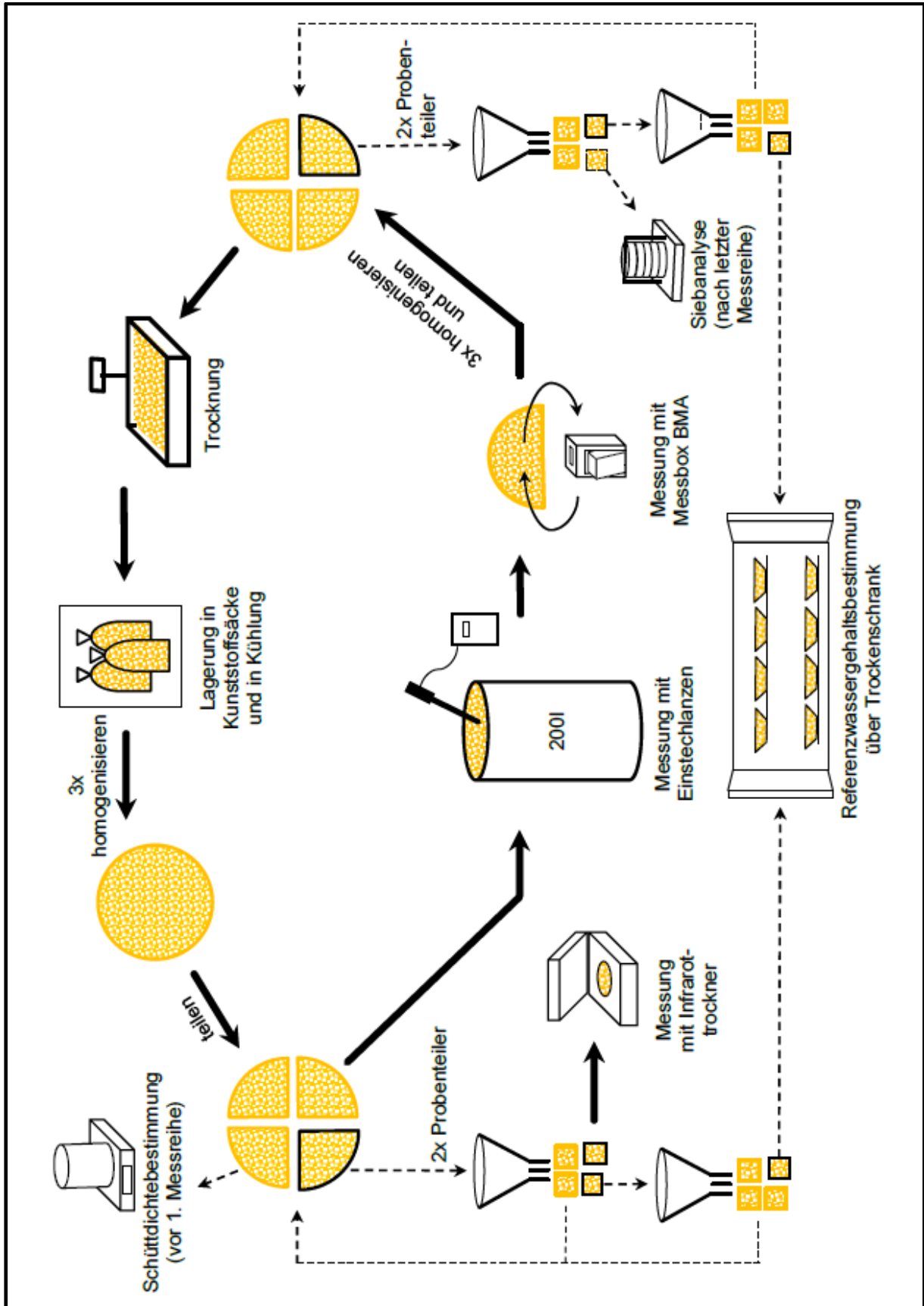


Abbildung 6: Schematischer Ablauf der Messreihe zur Bestimmung des Wassergehalts mittels manueller Messgeräte im Technikum des TFZ

In Anlehnung an die Eigenschaftsklassen der DIN EN ISO 17225-4 [14] wurden fünf Wassergehaltsstufen gewählt: Erntefrisch (ca. 45–55 m-%), 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-% (Abbildung 5). Der Ausgangswassergehalt wurde bei Anlieferung der Hackschnitzel über die Ofentrocknung im Trockenschrank bei 105 °C nach DIN EN ISO 18134-2 bestimmt [22]. Zusätzlich wurde die Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 [20] gemessen und eine Siebanalyse zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17827-1 [19] durchgeführt.

Die Messreihe mit den 9 manuellen Messgeräten erfolgte für jede Wassergehaltsstufe und jedes Sortiment nach demselben Ablaufschema (Abbildung 6).

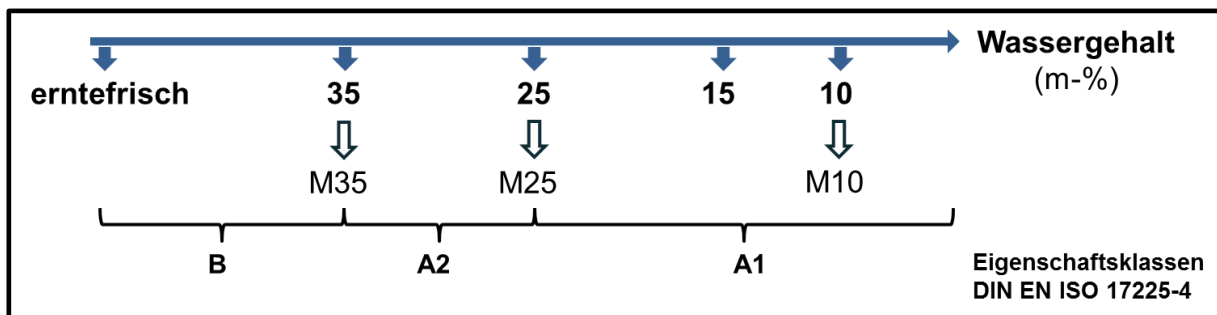


Abbildung 7: Gewünschte Wassergehaltsstufen für die Messreihe (erntefrisch (45–55 m-%), 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%)

Um die jeweiligen Wassergehaltsstufen zu erreichen (Abbildung 6, Abbildung 7), wurden die Hackschnitzel in „Trocknungsboxen“ mit einer Schütthöhe von 10 cm ausgebreitet und in einem der Arbeitsbereiche des TFZ bei Raumluft langsam getrocknet (Abbildung 5). Über den Ausgangswassergehalt und über die Gewichtsänderung einer in Aluschalen gelagerten Referenz-Hackschnitzelmenge wurde der voraussichtliche Wassergehalt der Hackschnitzel in den Trocknungsboxen abgeschätzt.

Bei Erreichen der gewünschten Wassergehaltsstufe wurden die Hackschnitzel aus der Trocknungsbox in luftdichte Kunststoffsäcke umgefüllt (Abbildung 6, Abbildung 8a) und für mindestens 24 Stunden bei 4 °C in einer Kühlkammer gelagert. Durch die luftdichte Lagerung sollten mögliche Wassergehaltsunterschiede zwischen einzelnen Holzpartikeln ausgeglichen und damit die Homogenität der Gesamtprobe erhöht werden. Die Lagerung bei 4 °C konnte eine Schimmelbildung größtenteils verhindern. Vor der Messreihe und nach dem Angleichen der Hackschnitzel an die Raumtemperatur wurde die Probe aus den Kunststoffsäcken entleert und auf einer festen, sauberen und trockenen Oberfläche zu einem kegelförmigen Haufen geschüttet. Durch dreimaliges Umschütten des Haufens mit einer Schaufel wurde das Probenmaterial homogenisiert und anschließend nach DIN EN ISO 14780 [23] durch manuelle Vierteilung repräsentativ geteilt. Aus der geteilten Menge wurde ein Viertel der Probe mit Hilfe des am TFZ konstruierten Probenteilers erneut in vier repräsentative Teile geteilt (Abbildung 8b). Danach wurden aus den Teilproben Proben zur Referenzwassergehaltsbestimmung nach DIN EN ISO 18134-2 [22]

(5 × 2 l) und zur Wassergehaltsbestimmung mit den beiden Infrarottrocknern (10 l) gezogen.

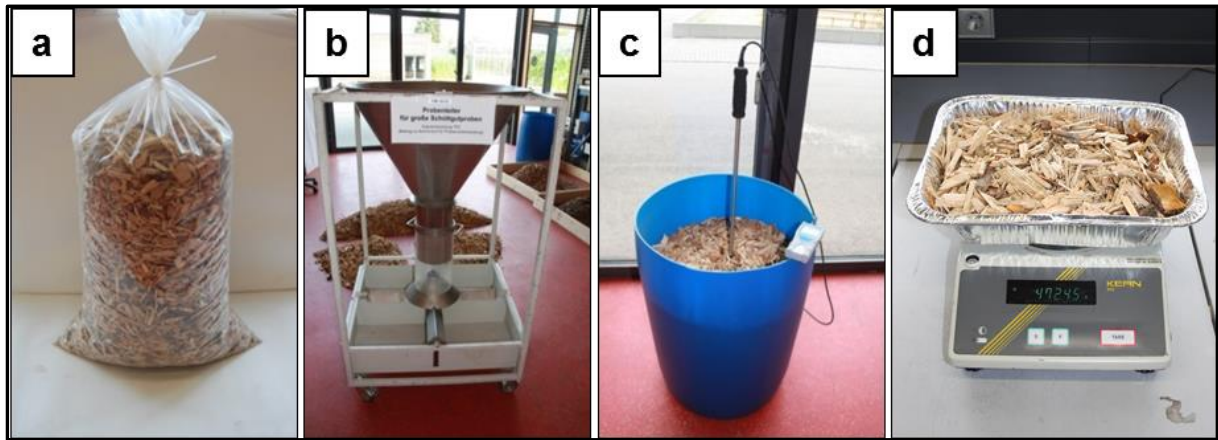


Abbildung 8: Lagerung in Kunststoffsäcke (a), Probenteilung (b), Messung mit Einstechlanzen (c), Einwiegen der Referenzmessung (d)

Anschließend erfolgte die Messung mit den Einstechlanzen (Abbildung 6). Hierfür wurde die gesamte Hackschnitzelcharge in ein 200 l fassendes zylindrisches Kunststofffass gefüllt und durch dreimaliges freies Fallenlassen des Fasses aus 15 cm Höhe verdichtet (analog DIN EN ISO 17828 [20]). Nach der Verdichtung wurde mit den Einstechlanzen 10-mal in die Hackschnitzelprobe eingestochen (Abbildung 8c) und der jeweilige Messwert notiert ($n = 10$). Es wurde darauf geachtet, dass sich die Messsensoren auf mittlerer Höhe des Hackschnitzelfüllstandes des Kunststofffasses befanden. Wurde die Hackschnitzelschüttung durch Einstechen oder Herausziehen der Lanzen gelockert, wurden die entstandenen lockeren Bereiche durch manuelles Rütteln am Fass wieder gefüllt.

Nach den Messungen mit den Einstechlanzen wurden die Hackschnitzel aus dem Kunststofffass entleert und erneut zu einem kegelförmigen Haufen geformt (Abbildung 6). Aus diesem Haufen wurden dann die Proben für die Messbox humimeter BMA repräsentativ gewonnen (siehe oben). Die Messkammer wurde mit einer Handschaufel mit Hackschnitzel gefüllt. Mit dem Messgerät BMA wurden jeweils fünf Wiederholungen durchgeführt ($n = 5$).

Die Bestimmung des Wassergehalts mit den Infrarottrocknern konnte aufgrund der geringen Probenmenge parallel zu den Messungen mit den Einstechlanzen ablaufen. Die Anzahl der Wiederholungen der Infrarottrockner betrug drei ($n = 3$).

Am Ende der Messstrecke wurde die gesamte Hackschnitzelprobe erneut homogenisiert und geteilt, um weitere Proben für das Referenzverfahren zu ziehen (Abbildung 6). Die Messungen mittels Referenzverfahren wurden somit an fünf Proben vor der jeweiligen Messreihe und an drei Proben nach der jeweiligen Messreihe durchgeführt ($n = 8$). Zur Bestimmung des Wassergehalts nach DIN EN ISO 18134-2 wurden mindestens 300 g Hackschnitzel in Aluschalen eingewogen (Abbildung 8d) und im Trockenschrank bei 105

(±2) °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Der Wassergehalt (im Anlieferungszustand, M_{ar}) wird aus dem Massenverlust wie folgt berechnet [22]:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Dabei ist m_1 die Masse des leeren Trocknungsbehälters bzw. der Aluschale (in Gramm), m_2 die Masse des Trocknungsbehälters und des Brennstoffes vor dem Trocknen (in Gramm) und m_3 die Masse des Trocknungsbehälters und des Brennstoffes nach dem Trocknen (in Gramm). Nach dem Trocknen wird der Trocknungsbehälter mit dem Brennstoff im noch heißen Zustand und innerhalb von 15 Sekunden zurückgewogen. Das Ergebnis ist auf eine Kommastelle zu runden.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

Alle Sortimenten ließen sich nach DIN EN ISO 17225-1 [13] in die Partikelklasse P31 einordnen (Tabelle 3). Eine Klassifizierung nach Teil 4 der Norm war nur beim Energierundholz aus Fichte möglich (P31S), da der Feinanteil der Probe unter 10 m-% lag. Der Anteil an Feinmaterial beim Waldrestholz aus Nadel- und Laubholz war aufgrund von Nadeln und Blättern bzw. kleinen Ästen durchschnittlich am höchsten.

Tabelle 3: Einteilung der Hackschnitzelsortimente nach DIN EN ISO 17225 (Teil 1 und Teil 4) [13], [14]

Einteilung nach DIN EN ISO	Waldrestholz Nadelholz	Energierundholz Fichte	Waldrestholz Laubholz	Energierundholz Buche	KUP Pappel
17225-1	P31	P31	P31	P31	P31
17225-4	keine	P31S	keine	keine	keine
Feinanteilkategorie	F20	F10	F20	F15	F12

Die Wassergehalte der Brennstoffe lagen bei Anlieferung der Hackschnitzel zwischen 33,4 m-% (Waldrestholz aus Laubholz) und 68,0 m-% (Hackschnitzel aus KUP, Abbildung 9). Die Werte der Sortimenten aus Nadelholz waren dabei als typisch für erntefrische Hackschnitzel einzuordnen (47,9–51,0 m-%) [41]. Die Wassergehalte der Hackschnitzel aus Laubholz lagen dagegen niedriger als für den erntefrischen Zustand zu erwarten ist. Hier muss davon ausgegangen werden, dass es vor der Versuchsreihe bereits zu einer Vortrocknung der Sortimenten vor der Lieferung an das TFZ gekommen ist [40]. Der sehr hohe Ausgangswassergehalt der KUP Hackschnitzel von 68,0 m-% ist ebenfalls nicht als typisch anzusehen. Es wird davon ausgegangen, dass der Wasser-

gehalt dieser Charge durch Niederschlag nach dem Prozessschritt „Hacken“ erhöht wurde.

Insgesamt wurde durch die schrittweise Trocknung am TFZ ein sehr weiter Wassergehaltsbereich von 9,5 bis 68,0 m-% abgedeckt. Pro Sortiment wurden, abgesehen vom Waldrestholz aus Laubholz, fünf unterschiedliche Wassergehaltsstufen erreicht (Abbildung 9).

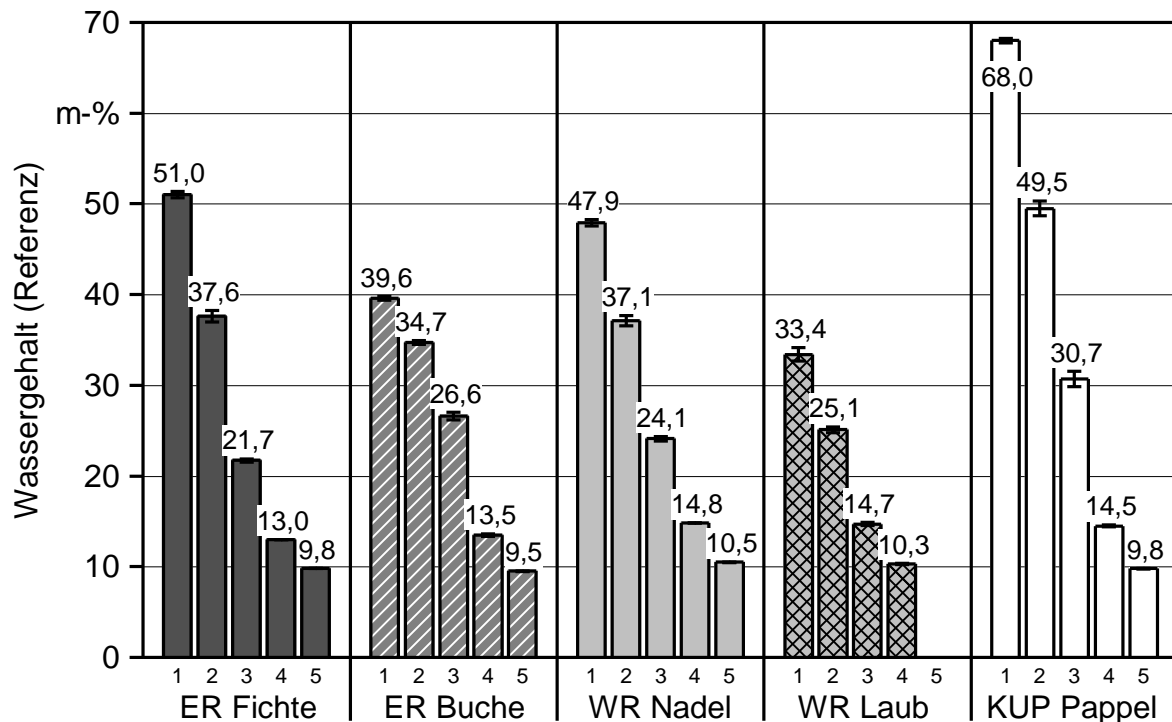


Abbildung 9: Mittelwerte und Standardabweichungen ($n = 5$) der Referenzmessungen aller Sortimente und Wassergehaltsstufen (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)

4.2.1 Ergebnisse und Beurteilung der manuellen Messgeräte

Die nachfolgenden Abbildungen und Tabellen zeigen die Vergleichsmessungen zur Wassergehaltsbestimmung. Dargestellt werden die Einzelwerte der Messungen, die mittleren Abweichungen zum Referenzwert sowie die Ergebnisse von Regressionsanalysen, getrennt nach den jeweiligen Messgeräten.

Die in Abbildung 10 bis Abbildung 18 eingezeichnete Sollwertgerade besitzt eine Steigung von 1 m-% und einen Schnittpunkt mit der y-Achse von 0 ($x = y$, durchgängige Linie). Im Idealfall sollten alle Einzelmessungen auf dieser Gerade liegen.

Die ebenfalls eingezeichneten, unterbrochenen Linien kennzeichnen den Wertebereich von $\pm 40\%$ ober- und unterhalb des Referenzwerts, jeweils für einen Messbereich von 4,8 bis 39,4 m-%. Dieser wird in der aktuellen Überarbeitung der VDI 4206 Blatt 4 als

Mindestanforderung an Schnellbestimmungsmethoden für die Beurteilung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln im Rahmen der wiederkehrenden Überwachung von Kleinfeuerungsanlagen durch das Schornsteinfegerhandwerk diskutiert [52]. Die Messungen in der hier dargestellten Versuchsreihe bieten dabei jedoch nur eine erste Einschätzung und sind nicht mit einer tatsächlichen Eignungsprüfung, wie sie die VDI 4206 Blatt 4 vorschlägt, gleichzusetzen.

In einzelnen Abbildungen sind zudem grau schraffierte Flächen eingezeichnet. Diese kennzeichnen Wassergehaltsbereiche, die nicht im Messbereich des jeweiligen Gerätes liegen. Messergebnisse außerhalb der individuellen Gerätemessbereiche werden in den Übersichtsdiagrammen zwar dargestellt, sie fließen aber nicht in die Bewertungen mit ein.

Tabelle 4: Mittlere Abweichung (absolut) der manuellen Messgeräte vom Referenzverfahren sowie die dazugehörige Regressionsanalyse

Messgerät	Messbereich in m-%	n	Mittlere Abweichung (absolut) in m-% (\pm SD)	Schnittpunkt mit y-Achse	Geradensteigung	R ²
MA35	0–100	67	-0,7 (\pm 2,1)	-0,66	1,00	0,98
UX3081	0–100	68	-2,6 (\pm 1,7)	-1,66	0,96	0,99
humimeter BMA	5–70	120	-0,5 (\pm 4,0)	3,65	0,85	0,95
humimeter BL2	10–50	190	3,8 (\pm 4,7)	-3,50	1,28	0,96
AD22-CMS22	0–50	220	-0,7 (\pm 4,0)	1,00	0,93	0,90
Almemo	0–50	220	1,5 (\pm 4,2)	2,88	0,94	0,90
GMH3851*	0–50	190	0,7 (\pm 4,9)	-3,53	1,21	0,88
HT85T	4–50	220	1,9 (\pm 3,7)	-4,27	1,10	0,94
HD2	0–50	206	-1,6 (\pm 5,1)	4,14	0,76	0,86

Sartorius MA35

Das MA35 von Sartorius hat einen Messbereich von 0 bis 100 m-%. Die mittleren Abweichungen der gemessenen Wassergehalte zum Referenzwassergehalt lagen über alle Sortimente bei -0,7 m-% (\pm 2,1) (Tabelle 4). Die größte maximale Abweichung eines einzelnen Messwertes betrug -8,5 m-% (Abbildung 10).

Eindeutige Trends bezüglich unterschiedlicher Sortimente wurden nicht beobachtet. Alle Messwerte lagen zudem innerhalb von vorgeschlagenen \pm 40 % zum Referenzwert und hätten somit die Anforderungen nach der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 eingehalten. Insgesamt zeigte das MA35 sowohl in der mittleren Abweichung als auch bei der Regressionsberechnung die besten Ergebnisse aller Messgeräte (vgl. auch Abbildung 19).

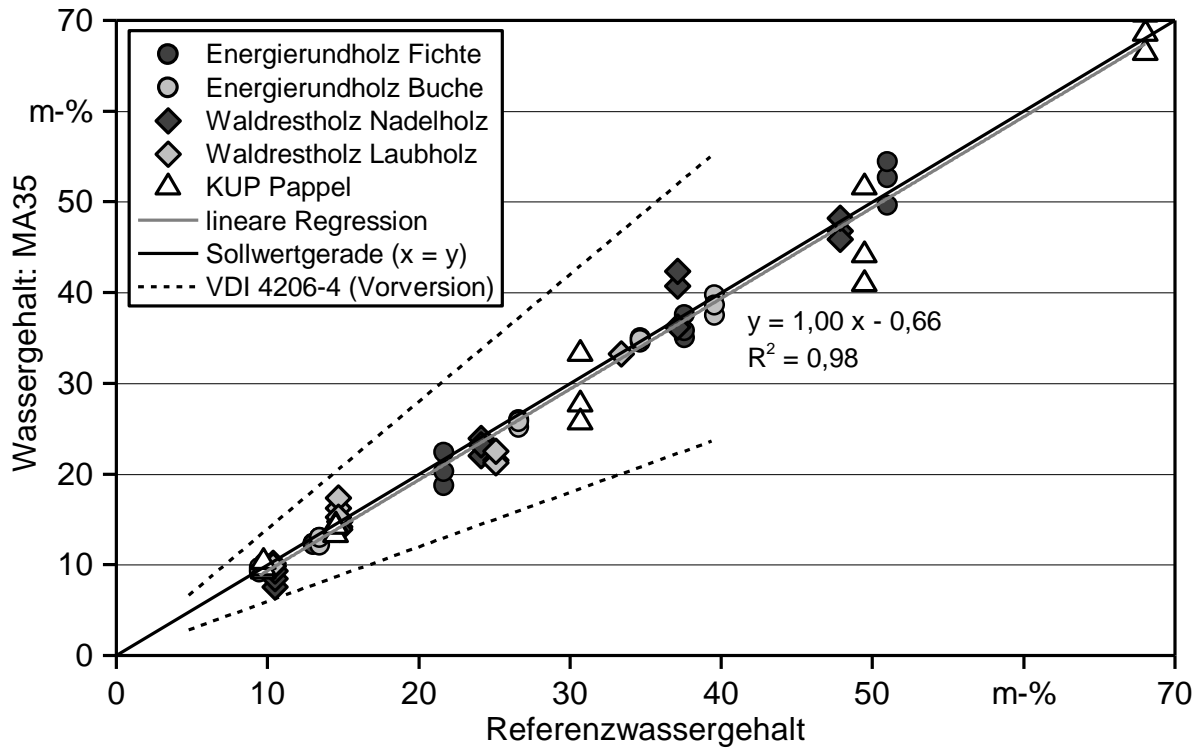


Abbildung 10: Wassergehaltsmessungen des MA35 im Vergleich zur Referenzmethode

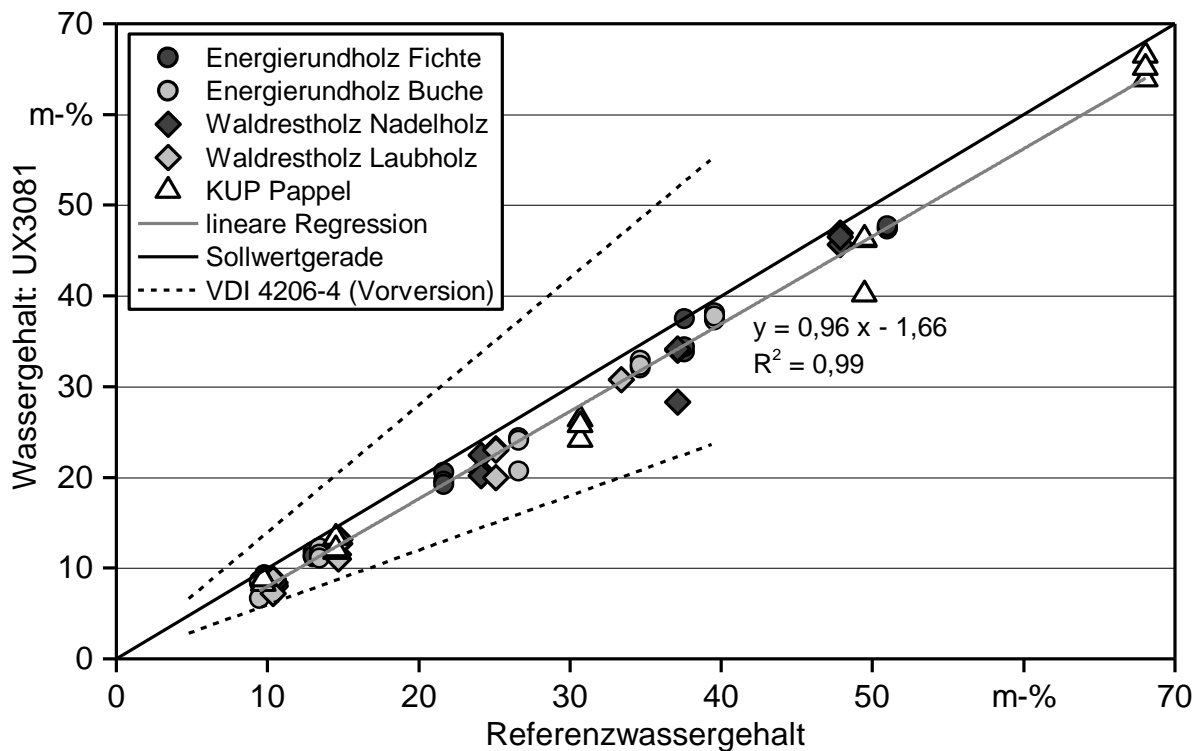


Abbildung 11: Wassergehaltsmessungen des UX3081 im Vergleich zur Referenzmethode

A&P Instruments UX3081

Analog zum Infrarottrockner MA35 von Sartorius wiesen auch die Messwerte des UX3081 von A&P Instruments eine geringe Streuung auf, sowie eine Regressionsgerade, die neben einem hohen Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,99$) nahe an der Sollwertgerade lag (Abbildung 11, Tabelle 4). Der Messbereich lag ebenfalls bei 0 bis 100 m-%.

Alle Werte lagen innerhalb der Anforderungen ($\pm 40\%$) gemäß der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 [52]. Alle Messungen mit dem UX3081 zeigten allerdings eine kontinuierliche Unterschätzung des tatsächlichen Wassergehalts; die mittlere Abweichung lag über alle Sortimente bei $-2,6\text{ m-\%}$ ($\pm 1,7$). Es wird daher davon ausgegangen, dass in der hier dargestellten Versuchsreihe eine unvollständige Trocknung der Proben stattfand. Die Trocknungstemperatur des UX3081 war auf 105 °C festgelegt worden. Eine Einstellung auf eine höhere Temperatur könnte hier zu einem besseren Messergebnis führen, allerdings besteht dann die Gefahr, dass zusätzlich zum Wasser auch leicht flüchtige Bestandteile aus der Probe entweichen könnten [43]. Dies wiederum würde einen zusätzlichen Massenverlust bedeuten und könnte somit die Genauigkeit der Wassergehaltsbestimmung ebenfalls beeinträchtigen.

Zusätzliche Bemerkungen zu den beiden Infrarottrocknern

Mit beiden Infrarottrocknern können Messungen über den gesamten Wassergehaltsbereich von 0 bis 100 m-% durchgeführt werden. Damit liegen sie im Vorteil gegenüber den meisten anderen in dieser Versuchsreihe betrachteten Geräten. Auch zeigten die Infrarottrockner die geringsten Schwankungen in den Messwerten (Tabelle 4) und eine sehr hohe Genauigkeit. Allerdings haben selbst frische Hackschnitzel selten Werte $> 55\text{ m-\%}$. Die Praxisrelevanz für die Messung extrem hoher Wassergehalte kann somit für die Anwendung der Geräte auf dem Hackschnitzelmarkt hinterfragt werden. Folgende allgemeine Kritikpunkte sind zusätzlich zu bemerken:

Bei einem Wassergehalt von 10 m-\% betrug die Messdauer der beiden Infrarottrockner ca. 15 min. Bei 35 m-\% erhöhte sich die Messdauer um das Dreifache. Allgemein empfiehlt sich, die Trocknungszeit bei gleicher Temperatur automatisch so lange zu verlängern, bis Gewichtskonstanz erreicht wird. Folglich ist zu diskutieren, ob die Infrarottrockner bei einem hohen Wassergehalt noch als Schnellbestimmungsgeräte bezeichnet werden können. Nichtsdestotrotz ist die Messung immer noch deutlich rascher als beim Referenzverfahren (Trockenschrank). Zur Beurteilung, ob eine Lieferung ans Heizwerk angenommen oder abgewiesen wird, sind sie jedoch nur bedingt einsetzbar.

Neben der Messdauer ist die geringe Probenmenge als Kritikpunkt zu nennen. Bei sehr homogenen Brennstoffen, wie sie in der Versuchsreihe verwendet wurden, stellte dies kein Problem dar. Obwohl pro Wassergehaltsstufe nur maximal 2 Wiederholungen gemessen wurden ($n = 3$), blieb die Streuung der einzelnen Messwerte sehr gering (MA35: $2,1\text{ m-\%}$, UX3081: $1,7\text{ m-\%}$). Die etwas geringere Standardabweichung des UX3081 ist womöglich auf die größere Probenmenge im Gegensatz zum MA35 zurückzuführen. Durch die sehr geringe Probenmenge im Gramm-Bereich ist aber eine sehr gute Homogenisierung der zu untersuchenden Hackschnitzelcharge oder eine sehr hohe repräsentative Probenzahl entscheidend. Dies lässt sich in der Praxis bei inhomogenen Brenn-

stoffen schwer umsetzen. Folglich haben die beiden Geräte ihre Stärke eventuell in anderen Bereichen, z. B. bei Analysen im Labor oder bei der Pelletierung (vgl. Abschnitt 4.4).

Schaller humimeter BL2 und humimeter BLA

Beide Messgeräte der Firma Schaller, das humimeter BL2 und das humimeter BMA, bieten dem Nutzer voreingestellte Kalibrierkurven zur Auswahl. Die Kennlinien „Hackgut“, „Grobhackgut“ und „Industriehackgut“ beziehen sich dabei auf die Partikelgröße der zu untersuchenden Hackschnitzel (vgl. Abschnitt 3.3.2). Eine bebilderte Beschreibung im Handbuch hilft dem Anwender bei der Auswahl der richtigen Kennlinie. So konnten im Falle der hier dargestellten Versuchsreihe alle Hackschnitzelsortimente anhand der tatsächlichen Partikelgrößenverteilung (Tabelle 3) und dem Bildvergleich eindeutig der Kennlinie „Hackgut“ zugeordnet werden.

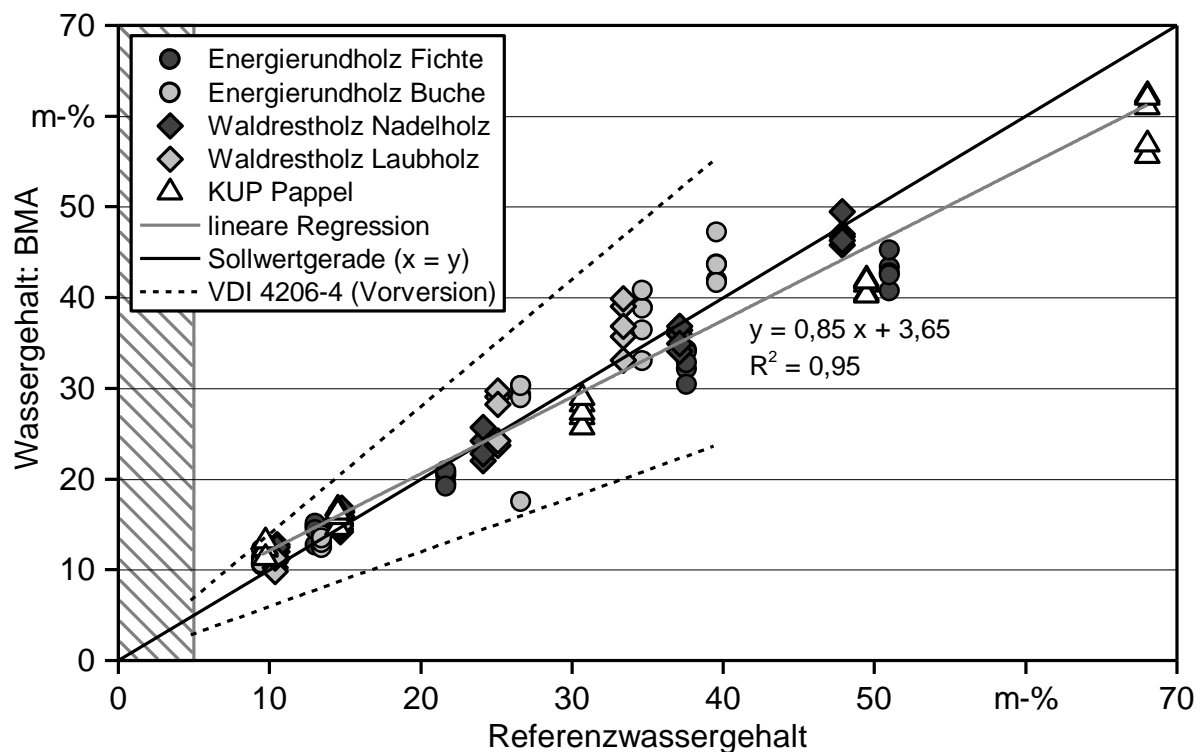


Abbildung 12: Wassergehaltsmessungen des humimeter BMA im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Im Gegensatz zu den beiden Infrarottrocknern ist der Messbereich des humimeter BMA von Schaller auf einen Wassergehalt von 5 bis 70 m-% beschränkt. Dieser ist jedoch als praxisrelevant für Holzhackschnitzel sowie für die meisten anderen biogenen Festbrennstoffe anzusehen. Über alle Sortimente hinweg lag die mittlere absolute Abweichung vom Referenzwert bei -0,5 m-% ($\pm 4,0$ m-%, Tabelle 4). Die maximale Abweichung eines einzelnen Messwertes betrug -12,4 m-% (Abbildung 12). Im Vergleich zu den Infrarottrocknern wurden zudem unterschiedliche Messgenauigkeiten in Bezug auf die ver-

wendeten Sortimenten beobachtet. So lagen die Werte für Waldrestholz aus Nadelholz durchweg nahe der Sollwertgerade. Energierundholz aus Buche sowie Waldrestholz aus Laubholz wurden tendenziell überschätzt, Energierundholz aus Nadelholz und KUP-Hackschnitzel dagegen eher unterschätzt. Alle Messwerte des Humimeter BMA lagen innerhalb der vorgeschlagenen $\pm 40\%$ Messabweichung nach VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion).

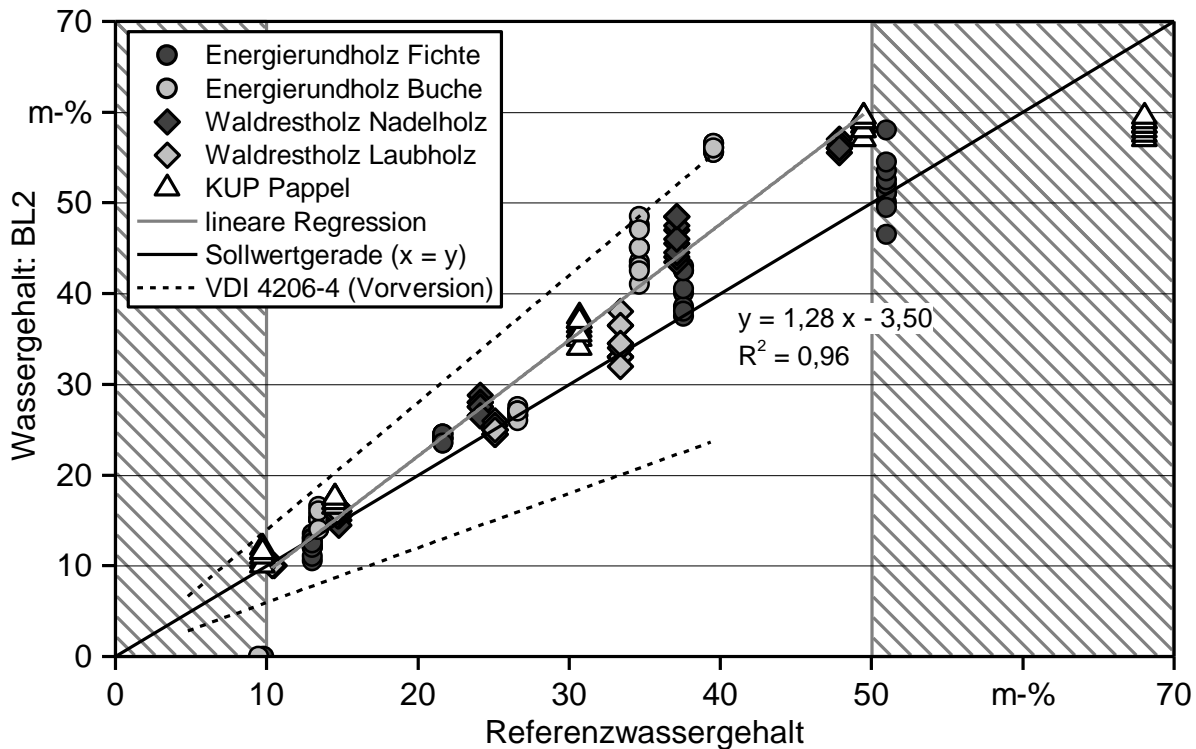


Abbildung 13: Wassergehaltsmessungen des Humimeter BL2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Die Einstechlanze Humimeter BL2 weist von allen betrachteten Messgeräten den kleinsten Messbereich auf. Dieser liegt laut Hersteller zwischen 10 m-% und 50 m-% (Tabelle 4). Das Gerät ist somit dennoch für die meisten Hackschnitzelsortimente als praxisrelevant zu bewerten. Sehr frische Hackschnitzel (> 50 m-%) könnten den maximalen Messbereich des BL2 überschreiten. Dies trifft jedoch auf die übrigen Einstechlanzen zu.

Messungen, die unterhalb von 10 m-% lagen, konnten in dieser Versuchsreihe nicht in die Bewertung des Gerätes mit einbezogen werden. In zwei Fällen wurde zudem bereits bei einem Referenzwassergehalt von 10,4 m-% (WR Laub) und 10,5 m-% (WR Nadel) kein sinnvoller Wert mehr angezeigt (Angabe auf Messanzeige: 0 m-%). Diese Werte wurden ebenfalls nicht in die Gesamtbewertung (mittlere Abweichung, Regressionsberechnung) mit einbezogen.

Die mittlere Abweichung des BL2 lag über alle Sortimente hinweg bei +3,8 m-% ($\pm 4,7$, Tabelle 4). Die Abweichung nahm mit steigendem Wassergehalt zu (Abbildung 13). Die in der VDI 4206 Blatt 4 vorgeschlagene maximale Messwertabweichung (± 40 % vom Referenzwert) konnte bis auf bei wenigen Einzelmessungen eingehalten werden. Analog zum BMA zeigte sich auch beim BL2 eine Abhängigkeit der Messgenauigkeit von dem jeweiligen Hackschnitzelsortiment (Nadelholz, hartes Laubholz, KUP).

Doser AD22-CMS22

Das AD22-CMS22 von Doser hat einen Messbereich von 0 bis 50 m-% und ist damit analog dem humimeter BL2 als praxisrelevant für die meisten Hackschnitzelsortimente zu bewerten. Bezüglich der mittleren Abweichung zeigten sich bei steigendem Wassergehalt keine klareren Trends (siehe Abbildung 14).

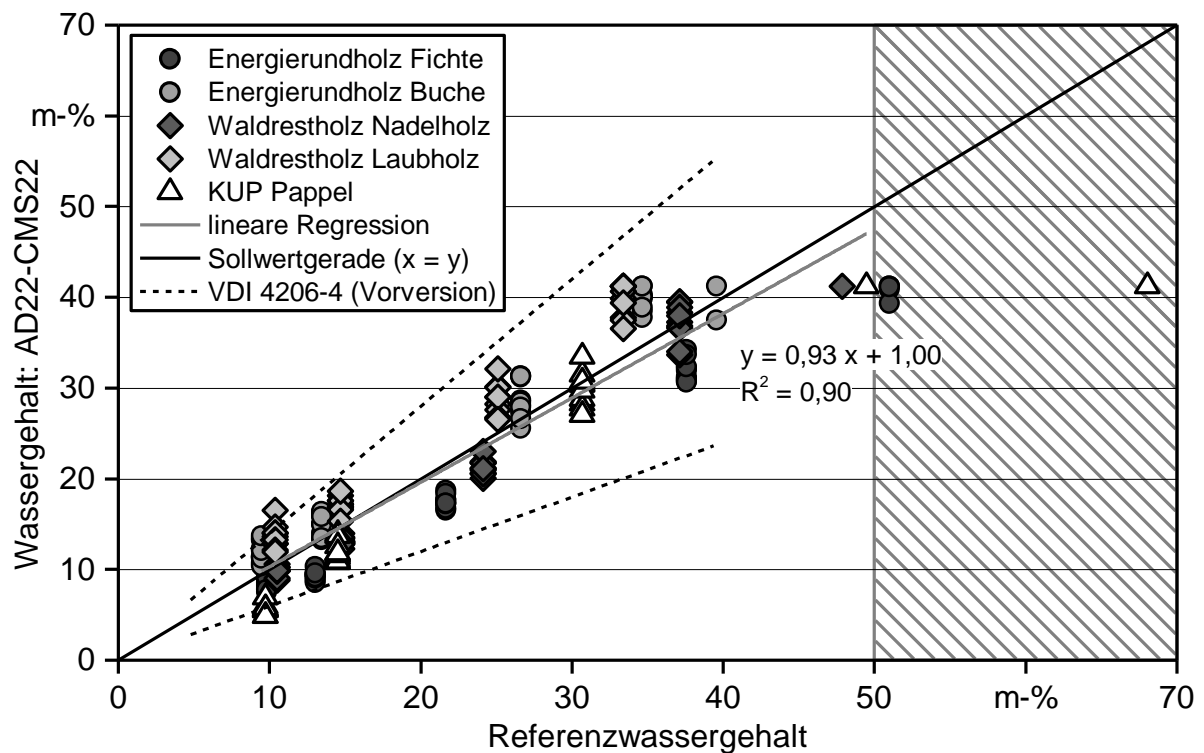


Abbildung 14: Wassergehaltsmessungen des AD22-CMS22 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Dennoch wurden auch mit dem AD22-CMS22 die besten Ergebnisse mit Waldrestholz aus Nadelholz erzielt, wohingegen Energierundholz aus Buche und Waldrestholz aus Laubholz tendenziell eher überschätzt, Energierundholz aus Nadelholz tendenziell eher unterschätzt wurde.

Trotz eines relativ weiten angegebenen Messbereichs von bis zu 50 m-% zeigte das Gerät in dieser Versuchsreihe keine Messwerte oberhalb von 41 m-% an. Eine Verringerung der Messbereichsangabe könnte daher empfehlenswert sein. Mit einer mittleren

absoluten Abweichung von -0,7 m-% zeigte das Messgerät eine sehr hohe Messgenauigkeit (Tabelle 4). Die größte maximale Abweichung eines Einzelwerts vom Referenzwert betrug -8,3 m-%. Somit zeigte das AD22-CMS22 die niedrigste Einzelwertabweichung im Vergleich zu den übrigen Messgeräten.

Die vorgeschlagene maximale Messwertabweichung von $\pm 40\%$ nach VDI 4206 Blatt 4 konnte nur im niedrigen Wassergehaltsbereich von Einzelwerten nicht eingehalten werden. Das Messgerät bietet neben der voreingestellten Kalibrierung die Möglichkeit, eine benutzerdefinierte Kalibrierkurve zu hinterlegen. Dadurch könnte der Einfluss des Sortiments auf die Messgenauigkeit noch einmal deutlich verringert werden.

Ahlborn Almemo Feuchtefühler

Der Messbereich des Almemo Feuchtefühlers der Firma Ahlborn liegt bei 0 bis 50 m-% und ist damit analog zu den übrigen Einstechlanzen als praxisrelevant für die meisten Hackschnitzelsortimente einzuordnen. Im Mittel lag die Abweichung der Messwerte vom Referenzwert bei +1,5 m-% ($\pm 4,2$, Tabelle 4). Die geringsten Abweichungen wurden bei den Messungen an Pappel- und Walrestholz hackschnitzeln aus Nadelholz festgestellt. Die maximale absolute Abweichung betrug über 17 m-% (Abbildung 15).

Das Gerät zeigte, wie auch das humimeter BL2, höhere Messabweichungen mit steigendem Wassergehalt. Auch hinsichtlich der Sortimente konnte dieselbe Tendenz wie beim humimeter BL2 oder beim AD22-CMS22 beobachtet werden. Die vorgeschlagene maximale Messwertabweichung von $\pm 40\%$ nach VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion) wurde von Einzelmessungen sowohl im niedrigen als auch im hohen Wassergehaltsbereich teilweise überschritten.

Greisinger GMH3851

Der Messbereich des Leitfähigkeitsverfahrens GMH3851 liegt bei 0 bis 50 m-% und ist damit analog zu den übrigen Einstechlanzen als praxisrelevant für die meisten Hackschnitzelsortimente einzuordnen. Das GMH3851 zeigte im Mittel eine vergleichsweise niedrige mittlere Messabweichung von 0,7 m-% ($\pm 4,9$, Tabelle 4). Die maximale Abweichung eines einzelnen Messwertes vom Referenzwert lag bei diesem Messgerät bei +20,9 m-% (Abbildung 16). Analog dem BL2 und dem Almemo nimmt die Messabweichung bei höheren Wassergehalten zu ($> 30\%$). Ebenso zeigt sich auch hier wieder eine Abhängigkeit vom Sortiment, wobei die besten Ergebnisse wieder mit Waldrestholz aus Nadelholz erzielt wurden.

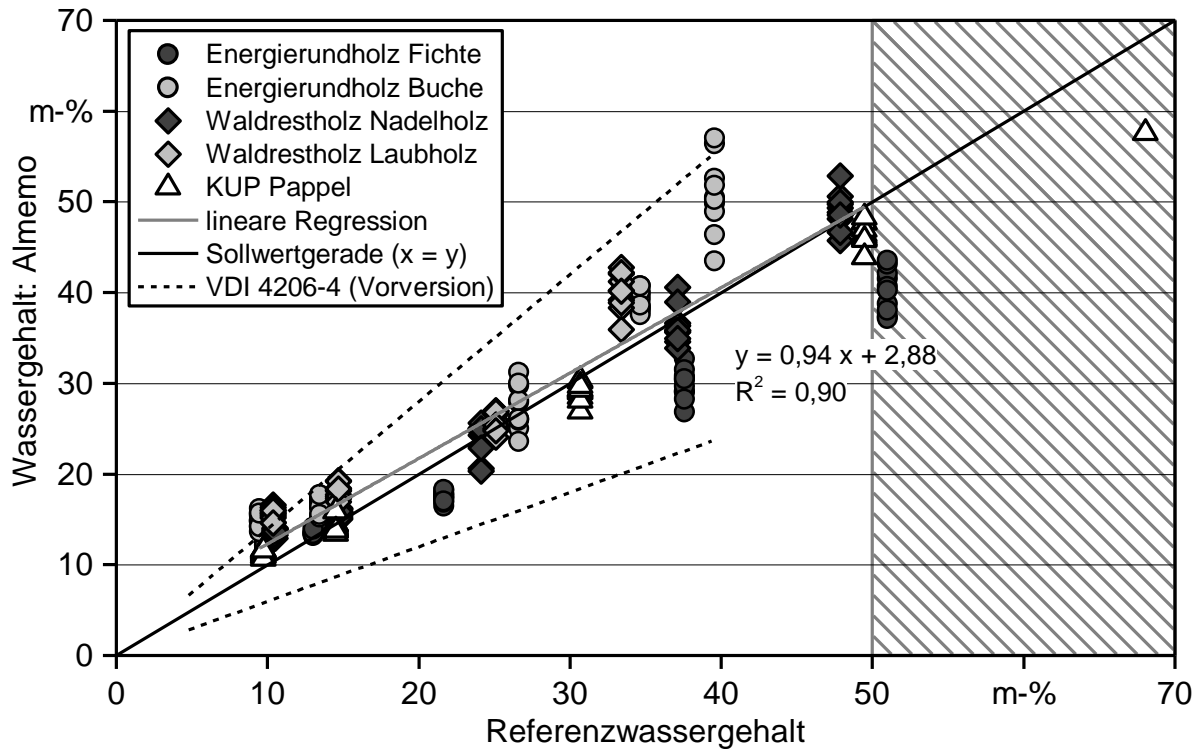


Abbildung 15: Wassergehaltsmessungen des Almemo im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

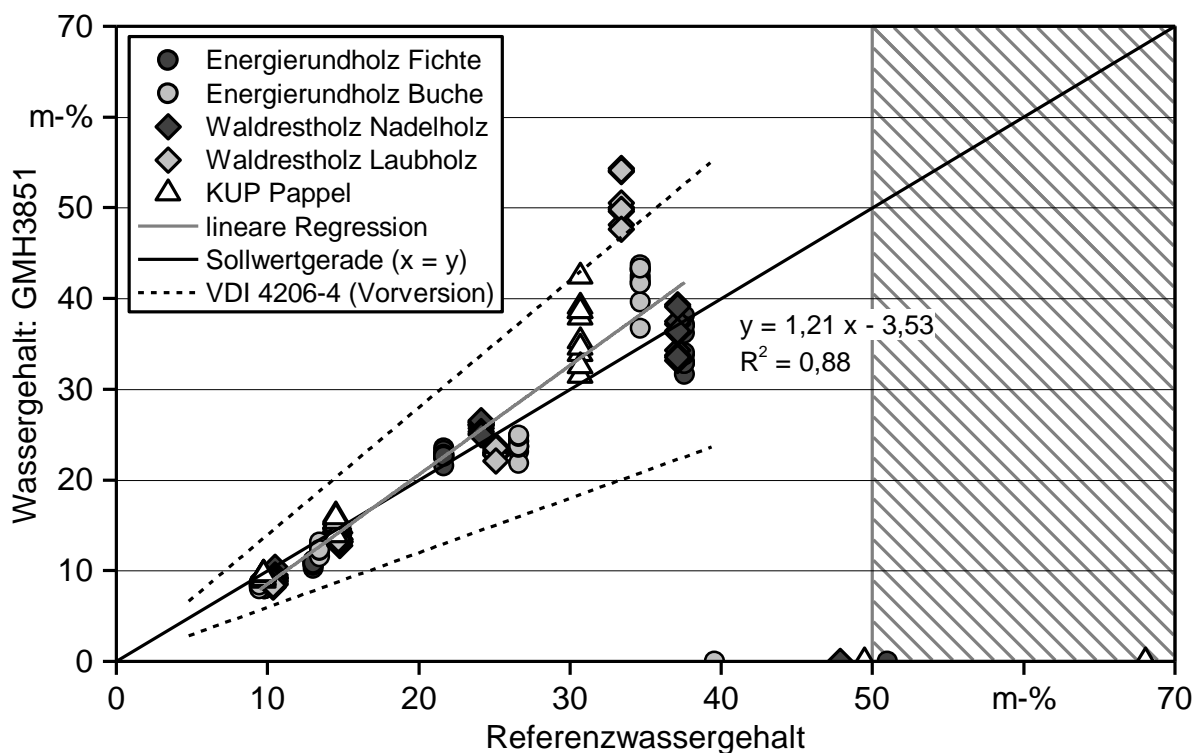


Abbildung 16: Wassergehaltsmessungen des GMH3851 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Zu bemerken ist, dass bei Wassergehalten ab ca. 40 m-% mit dem GMH3851 in dieser Versuchsreihe nur noch „Error-Messungen“ auf dem Display angegeben wurden, d. h. das Messgerät zeigte keinen verwendbaren Wert an. Diese Messungen sind in Abbildung 16 als 0 m-% dargestellt. Der Hersteller gibt an, dass Werte ab 40 m-% nur einen Näherungswert darstellen. In der hier dargestellten Versuchsreihe kann der Messbereich von 40 bis 50 m-% jedoch somit nicht bestätigt werden. Trotz der Error-Messungen lagen alle Messungen (abgesehen von den Werten für Waldrestholz aus Laubholz bei einem Referenzwassergehalt von 33,4 m-%) innerhalb der in der Vorversion zur VDI 4206 Blatt 4 vorgeschlagenen Messabweichung von $\pm 40\%$.

Gann Hydromette HT85T

Als weiteres Leitfähigkeitsverfahren wurde die Hydromette HT85T von Gann in die Messreihen mit aufgenommen. Der Messbereich der Hydromette liegt bei 4 bis 50 m-%. Im Mittel liegen die Werte bei 1,9 m-% ($\pm 3,7$) absolut vom Referenzwert (siehe Tabelle 4, Abbildung 17). Diese Genauigkeit änderte sich mit steigendem Wassergehalt nur wenig. Die größte maximale Abweichung eines einzelnen Messwertes betrug -10,6 m-%.

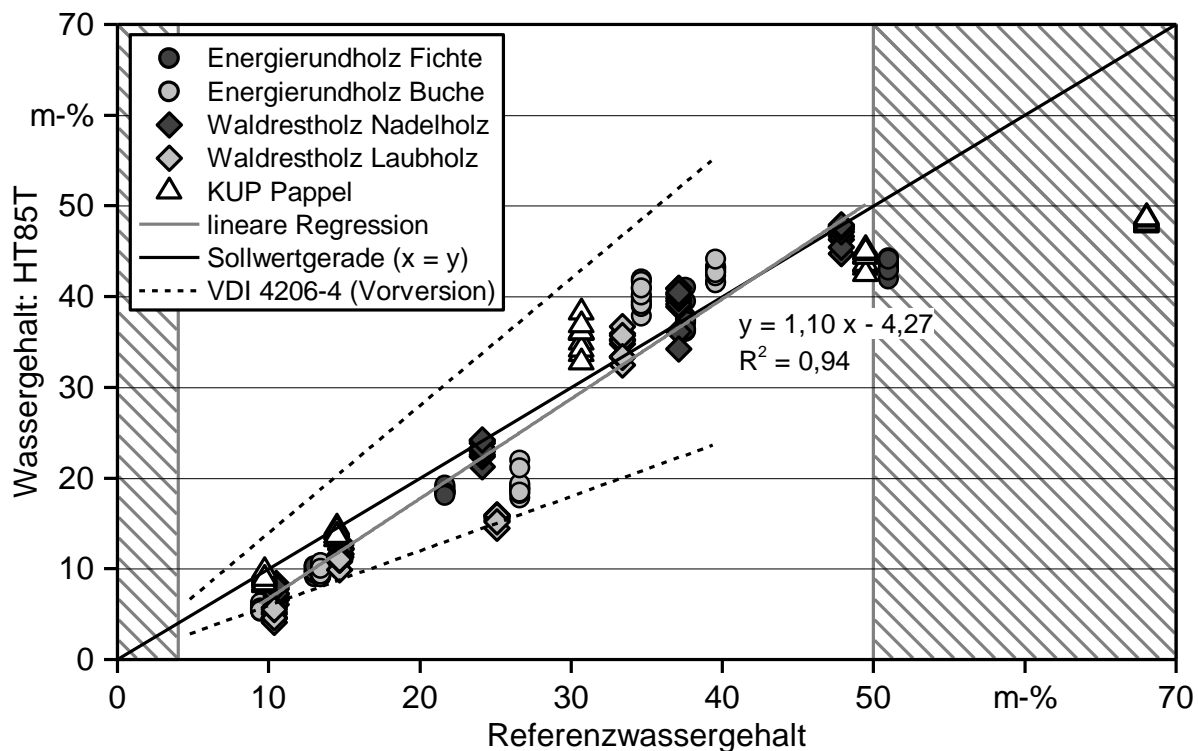


Abbildung 17: Wassergehaltsmessungen des HT85T im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Die Messwerte für Hackschnitzel aus Nadelholz und KUP lagen relativ nahe an der Sollwertgerade. Die Messwerte für hartes Laubholz wurden zunächst tendenziell unter-, bei höheren Wassergehalten tendenziell überschätzt. Da die Einstellung nach der Holzart erfolgte, konnte bei der Auswahl der Kalibrierkurve nicht nach Energierundholz oder

Waldrestholz unterschieden werden. Abgesehen von 2 Messreihen am Waldrestholz aus Laubholz lagen alle Messwerte innerhalb der vorgeschlagenen maximalen Messwertabweichung von $\pm 40\%$ gemäß VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion).

IMKO HD2

Der Messbereich des HD2 von IMKO liegt bei 0 bis 50 m-%. In der hier durchgeführten Messreihe wurde mit den voreingestellten Kalibrierungen über alle Sortimente eine mittlere Abweichung von $-1,6\text{ m-%}$ ($\pm 5,1$) gemessen (Tabelle 4, Abbildung 18). Analog zu den meisten elektrischen Verfahren zeigten sich Abhängigkeiten vom Sortiment. Ein Vergleich mit den vorgeschlagenen Anforderungen von $\pm 40\%$ nach der VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion) zeigt gute Übereinstimmung bei Referenzwerten $> 20\text{ m-%}$, führte jedoch zu Überschreitungen bei $< 20\text{ m-%}$.

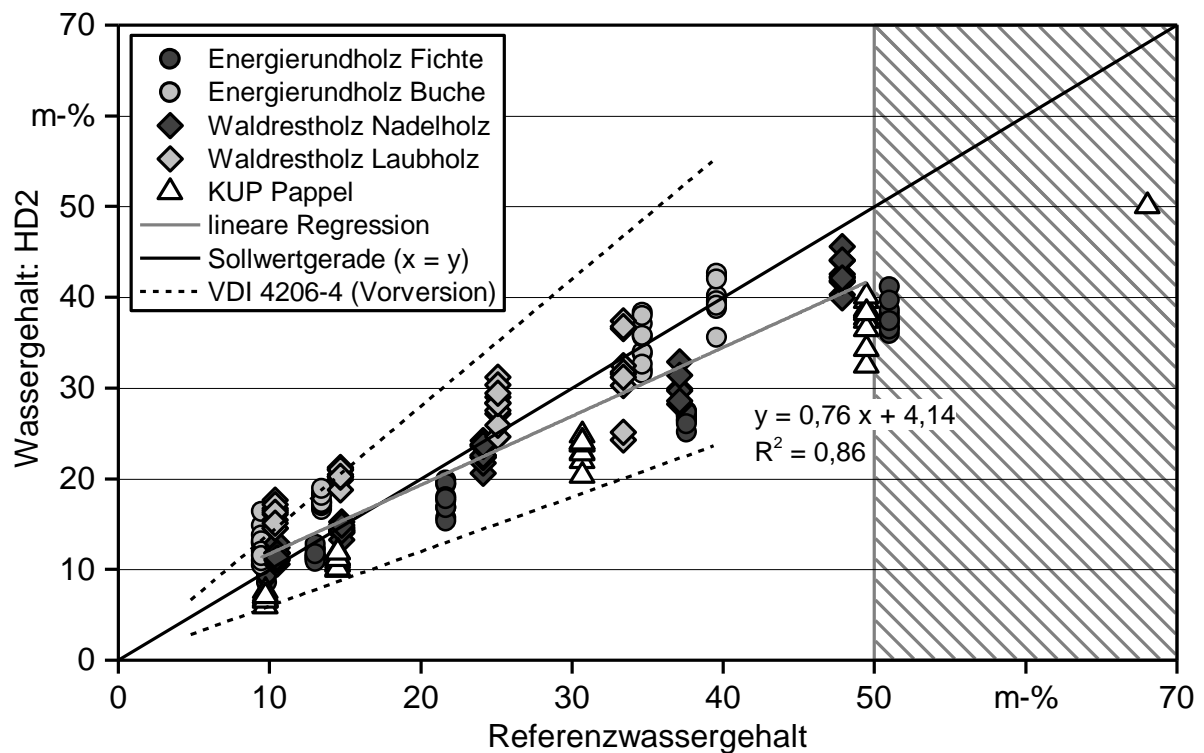


Abbildung 18: Wassergehaltsmessungen des HD2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

Für die Messungen wurde die Kennlinie „normal“ gewählt. Eine spezielle Kalibrierkurve für Holzhackschnitzel gab es zum Zeitpunkt der Messdurchführung noch nicht. Das Messgerät findet bisher hauptsächlich Anwendung in der Bodenfeuchtemessung, bietet aber die Möglichkeit, eine benutzereigene Kalibrierkurve im Messgerät zu hinterlegen. Dadurch könnte, wie auch beim AD22-CMS22, der Einfluss des Sortiments auf die Messgenauigkeit des Messgeräts verringert werden. Die gesammelten Ergebnisse wurden mit dem Messgerätehersteller diskutiert. Auf der Grundlage der gesammelten elektrischen Werte und der gemessenen Wassergehalte wurde die Kalibrierung des

Messgeräts seitens des Herstellers überarbeitet, weshalb mittlerweile auch holzart-spezifische Kalibrierkurven für das Messgerät zur Verfügung stehen.

4.2.2 Einfluss des Wassergehalts auf die Messgenauigkeit

Abbildung 19 zeigt einen direkten Vergleich der Messgenauigkeit aller untersuchten Messgeräte über deren individuellen Wassergehaltsbereich. Dabei wird deutlich, dass die hohe Genauigkeit des Referenzverfahrens von keinem der untersuchten Messgeräte erreicht wird. Insgesamt zeigte der Infrarottrockner MA35 die höchste Messgenauigkeit und die im Mittel geringste Streuung (Abbildung 19, Tabelle 4). Unter den elektrischen Verfahren zeigte das AD22-CMS22 die geringste Abweichung eines Einzelwerts vom Referenzwert. Allerdings wird die Messgenauigkeit dieses Messgeräts bei den Bewertungsmerkmalen „mittlere Abweichung“ und „Streuung“ vom BMA noch übertroffen (Abbildung 19, Tabelle 4).

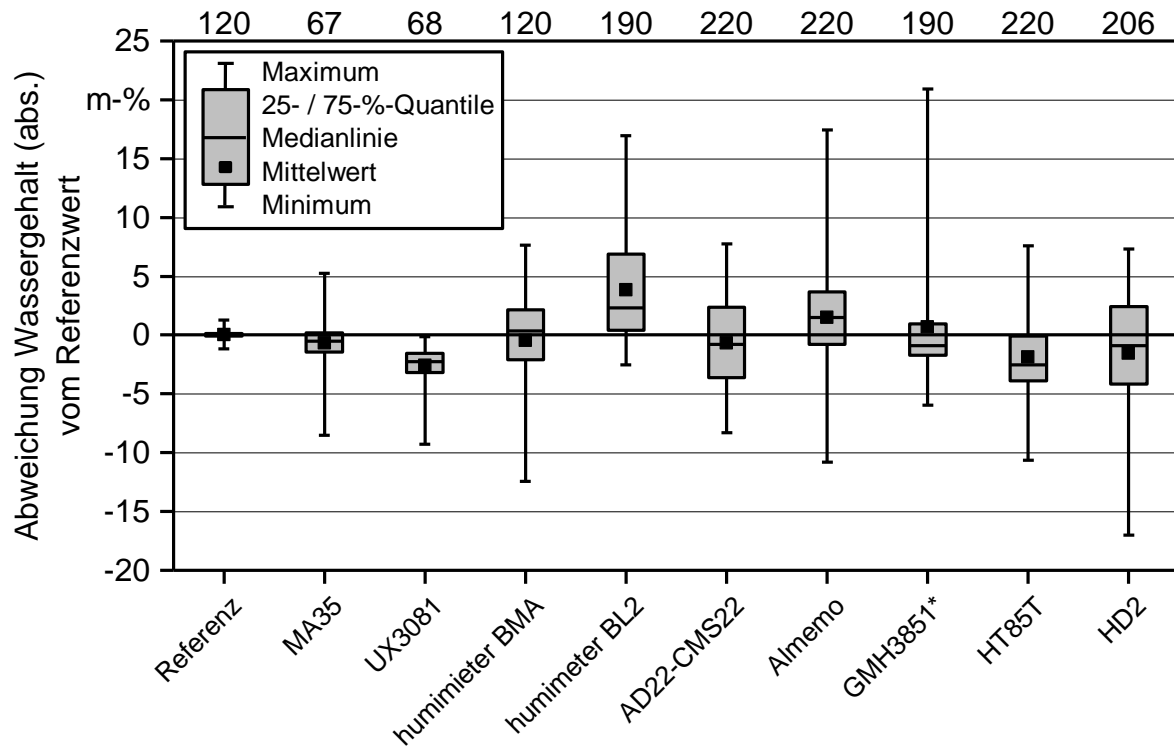


Abbildung 19: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert (*Error-Messungen und Messungen außerhalb des jeweiligen Messbereichs wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)

Bei Wassergehalten < 25 m-% lagen weit mehr als 50 % aller Messwerte in einem Messbereich mit einer Abweichung von ± 5 m-% (absolut) (Abbildung 20). Die maximale Abweichung lag in einem Wertebereich zwischen -6,4 und 7,3 m-% (absolut). Somit kann für alle Messgeräte bei niedrigen Wassergehalten von einer hohen Genauigkeit ausgegangen werden.

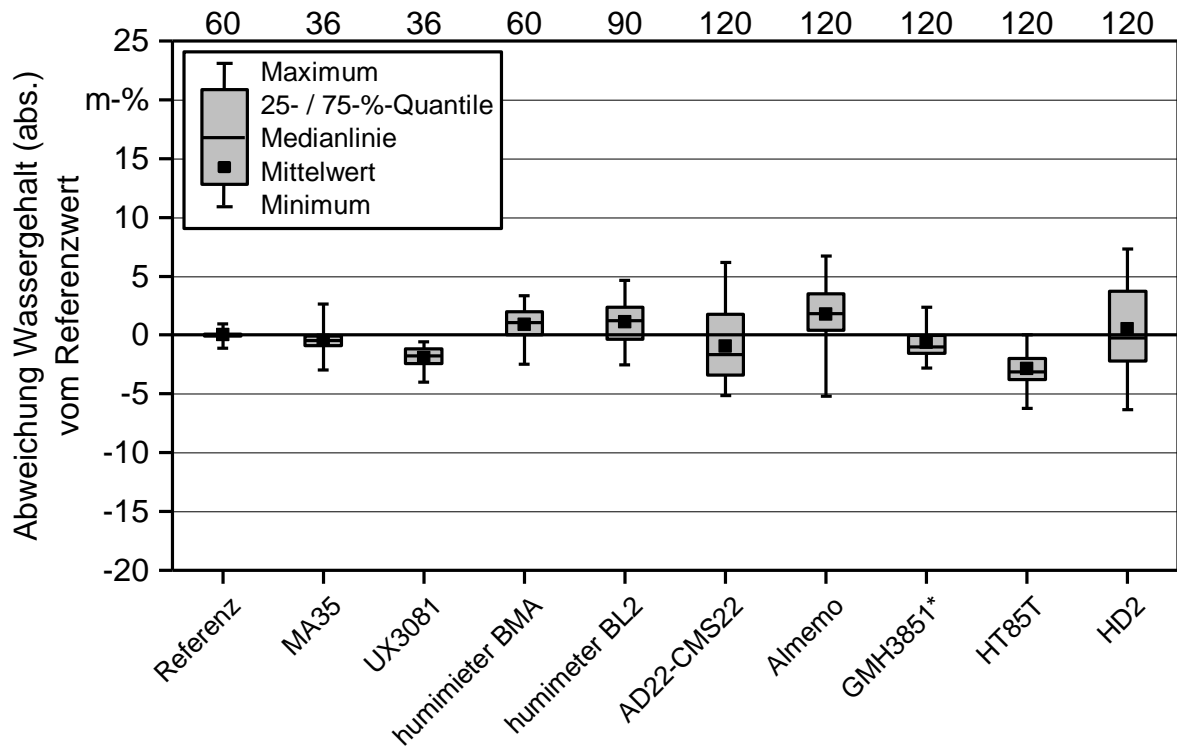


Abbildung 20: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs < 25 m-% (Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)

Bei Wassergehalten > 25 m-% lag die maximale Abweichung vom Referenzwert zwischen -17,0 und 20,9 m-% (absolut). Besonders bei den elektrischen Messverfahren stieg die Streuung der Abweichungen stark an. Bei allen Geräten lagen mindestens 50 % aller Messwerte noch in einem Messbereich ± 10 m-% (absolut) vom Referenzwert (Abbildung 21). Folglich ist die Genauigkeit der Messgeräte und damit ihre Einsetzbarkeit für einen hohen Wassergehaltsbereich auf den jeweiligen Anwendungsfall kritisch zu hinterfragen.

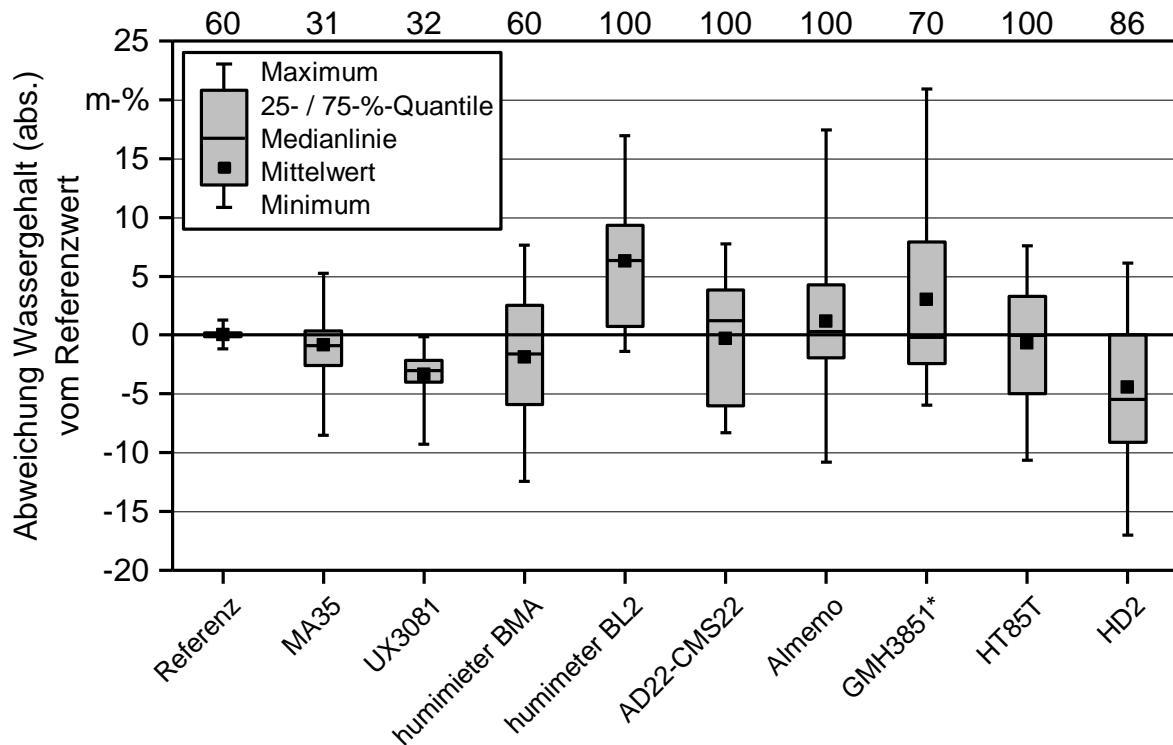


Abbildung 21: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs >25 m-% (*Error-Messungen wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)

4.2.3 Einfluss des Hackschnitzelsortiments auf die Messgenauigkeit

Bei den Messungen mit den elektrischen Verfahren wurde ein starker Zusammenhang zwischen den gemessenen Schüttdichten und den durchschnittlichen Abweichungen der Messwerte vom Referenzwert festgestellt ($R = 0,94$; $p \leq 0,05$; Pearson Korrelation). Durchschnittlich zeigten alle Messgeräte die höchste Genauigkeit bei den Messungen mit den Waldrestholzhackschnitzeln aus Nadelholz. Dieses Sortiment ist mit 89 % der am häufigsten produzierte Waldhackschnitzelbrennstoff in Bayern [32].

Pappelhackschnitzel und Fichtenhackschnitzel haben niedrigere Schüttdichten im Vergleich zu Waldrestholz aus Nadelholz. Der gemessene Wassergehalt bei diesen Sortimenten wurde von den elektrischen Verfahren durchschnittlich unterschätzt. Waldrestholz aus Laubholz und Energierundholz aus Buche hatten höhere Schüttdichten im Vergleich zu Waldrestholz aus Nadelholz. Der Wassergehalt dieser Sortimente wurde bei den Messungen tendenziell überschätzt (siehe Abbildung 22). Eine angepasste Kalibrierung der Messgeräte auf die jeweiligen Sortimente würde daher den Einfluss der Schüttdichte bzw. der Holzart verringern und somit die Messgenauigkeit erhöhen.

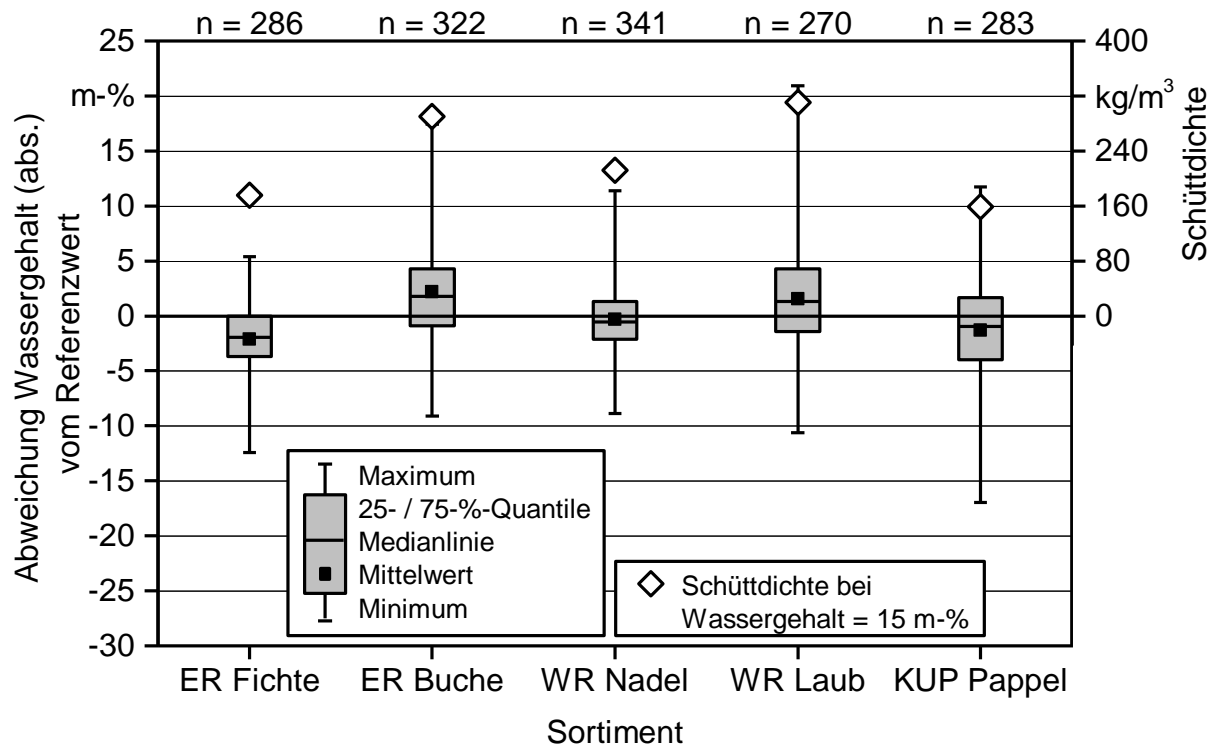


Abbildung 22: Einfluss der Schüttdichte (auf einem einheitlichen Wassergehalt von 15 m-%) der einzelnen Sortimente auf die Messgenauigkeit der Messgeräte (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)

4.3 Exkurs: Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit dem Wöhler HF550 Holzfeuchtemessgerät / FW550 Feuchtwaaage

Das Schnellbestimmungsgerät der Firma Wöhler Technik GmbH war zum Zeitpunkt der Versuchsreihe mit den mobilen Messgeräten (Abschnitt 4.2) noch nicht auf dem Markt verfügbar. Geräte dieses Herstellers sind aber bereits für die Wassergehaltsbestimmung an Scheitholz für den Schornsteinfegereinsatz eignungsgeprüft. Die in der Projektlaufzeit auf den Markt gebrachte Variante stellt dazu eine funktionale Ergänzung dar. Wegen der bereits gegebenen Verbreitung des Basisgeräts wurde im Projekt entschieden, dass auch dieses Verfahren im Rahmen einer zusätzlichen Versuchsreihe bewertet werden sollte. Diese Versuchsreihe ist aber aufgrund der unterschiedlichen Sortimente nur bedingt mit den Ergebnissen der Versuchsreihe in Abschnitt 4.2 vergleichbar.

Das Messgerät besteht aus dem Holzfeuchtemessgerät HF550 in Kombination mit der Feuchtwaaage FW550 für Schüttgüter (nachfolgende als HF550/FW550 bezeichnet). Das Holzfeuchtemessgerät HF550 ist sowohl für die Messung des Wassergehalts von Scheitholz als auch von Schüttgütern konzipiert. Es misst nach dem dielektrischen Messprinzip und gibt wählbare Messkurven vor. So kann z. B. zwischen Hackschnitzeln und Pellets unterschieden werden. Für die Messung von Schüttgütern wird der zylindrische Behälter der Feuchtwaaage (FW550) befüllt (siehe Abbildung 23). Durch die integrierte Gewichtsmessung erkennt das Gerät automatisch, wann die benötigte Brennstoffmasse für die gewählte Messung erreicht ist.

Der mögliche Messbereich des HF550/FW550 liegt bei 2 bis 41,0 m-% und bietet eine Auflösung von 0,1 m-%. Das Messgerät kann den Messwert als Feuchte und als Wassergehalt wiedergeben. Der Hersteller gibt an, dass das Gerät eine Messgenauigkeit von ± 40 % vom Messwert innerhalb des vorgegebenen Messbereichs aufweist, gemäß der Anforderung für eignungsgeprüfte Schnellbestimmungsgeräte für den Wassergehalt von Schüttgütern nach der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 [52].

4.3.1 Material und Methoden

Für den Versuchsaufbau wurde abweichend von den Versuchsreihen aus den Kapiteln 4.2 und 5 zufällig anfallende Hackschnitzelsortimente unterschiedlicher Partikelgrößen und Pellets verwendet. Als Probenmaterial wurde dabei v. a. auf Brennstofflieferungen an das Heizwerk des TFZ zurückgegriffen. Vor jeder Messreihe wurde das jeweilige Brennstoffsortiment analog dem Vorgehen in Abschnitt 4.1.2 vorkonditioniert. Hierzu wurde die Probe zunächst in luftdichte Kunststoffsäcke umgefüllt und für mindestens 24 Stunden bei 4 °C in einer Kühlkammer gelagert. Ziel dieses Vorgehens war es, mögliche Inhomogenität im Wassergehalt zwischen den Partikeln auszugleichen. Anschließend wurden die Proben aus der Kühlung entnommen. Nach dem Erreichen der Raumtemperatur wurde die Probe aus den Kunststoffsäcken entleert, homogenisiert und anschließend nach DIN EN ISO 14780 [23] geteilt. So konnte die Gesamtprobe auf die benötigte Probenmenge reduziert werden (vgl. Abschnitt 4.1.2).



Abbildung 23: Messdurchführung und Messgerät: Wöhler HF550/FW550

Die Messungen mit dem HF550/FW550 erfolgten nach Angaben des Herstellers. Vor jeder Messung wurde die Waage des Messgeräts zunächst genullt. Danach wurde der Messzylinder solange mit Probenmaterial befüllt, bis das Display die Nachricht „Probenmenge ausreichend“ angab (Abbildung 23). Der Wassergehalt kann danach direkt vom Display abgelesen werden. Zusätzlich kann er auch im Gerät gespeichert werden.

Die Probe wurde anschließend direkt in eine Aluschale umgefüllt und für die Referenzmessung des tatsächlichen Wassergehalts eingewogen. Die Referenzwassergehaltsbestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 18134-2 [22]. Insgesamt wurde je Material die Messung viermal wiederholt ($n = 5$).

Anschließend wurde die restliche Probe analog dem Vorgehen in den Kapiteln 4.2 und 5 bei Raumtemperatur auf niedrigere Wassergehaltsstufen getrocknet. Nach dem jeweiligen Trocknungsschritt wurden die Proben, wie oben beschrieben, zunächst erneut für 24 Stunden luftdicht gelagert, homogenisiert und anschließend gemessen.

Bei Messungen mit Pellets wurde die Kalibrierkurve „Pellets“ ausgewählt. Da Pellets schon niedrige Wassergehalte aufweisen, wurde jede Pelletprobe nur einmal gemessen. Im Fall von Hackschnitzeln wurde die Kalibrierkurve „Hackschnitzel“ verwendet.

4.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurden 8 Sortimente untersucht (Tabelle 5). Unter diesen befanden sich sowohl Hackschnitzel als auch Pellets.

Tabelle 5: Referenzwassergehaltswerte (in m-%) nach Sortiment und Spezifikation für die Versuchsreihe mit dem HF550/FW550

Sortiment	Spezifikation	35–41 m-%	25–35 m-%	15–25 m-%	< 15 m-%
Hackschnitzel	Energierundholz (P31S)	42,2* 37,3	-	19,7	-
	Waldrestholz (P45)	50,2*	27,9	20,4	-
	Waldrestholz (P45S)	45,3 *	-	19,2	13,1
	Pappel (P31)	40,3	29,4	-	14,3
	Pappel (P31)	43,5*	-	19,7	-
Holzpellets	k. A.	-	-	-	10,8
	ENplus A1	-	-	-	6,7
Pellets	Sonnenblumenspelzen	-	-	-	10,8

* Messwerte außerhalb des möglichen Messbereich

Als Hackschnitzel kamen Proben aus Energierundholz und Waldrestholz (jeweils Mischungen vornehmlich aus Nadelholz), sowie Hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb (KUP Pappel) zum Einsatz. Zudem wurden zwei Sortimente Holzpellets und einmal Pellets aus Sonnenblumenspelzen analysiert. Je Hackschnitzelsortiment wurden maximal 3 Wassergehaltsstufen gemessen, bei den Pellets jeweils nur eine (Tabelle 5). Die Referenzwassergehalte deckten dabei einen Messbereich von 6,7 bis 50,2 m-% ab, wobei Proben außerhalb des Gerätemessbereichs ($> 41,0$ m-%) nicht weiter berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden 85 Messungen durchgeführt.

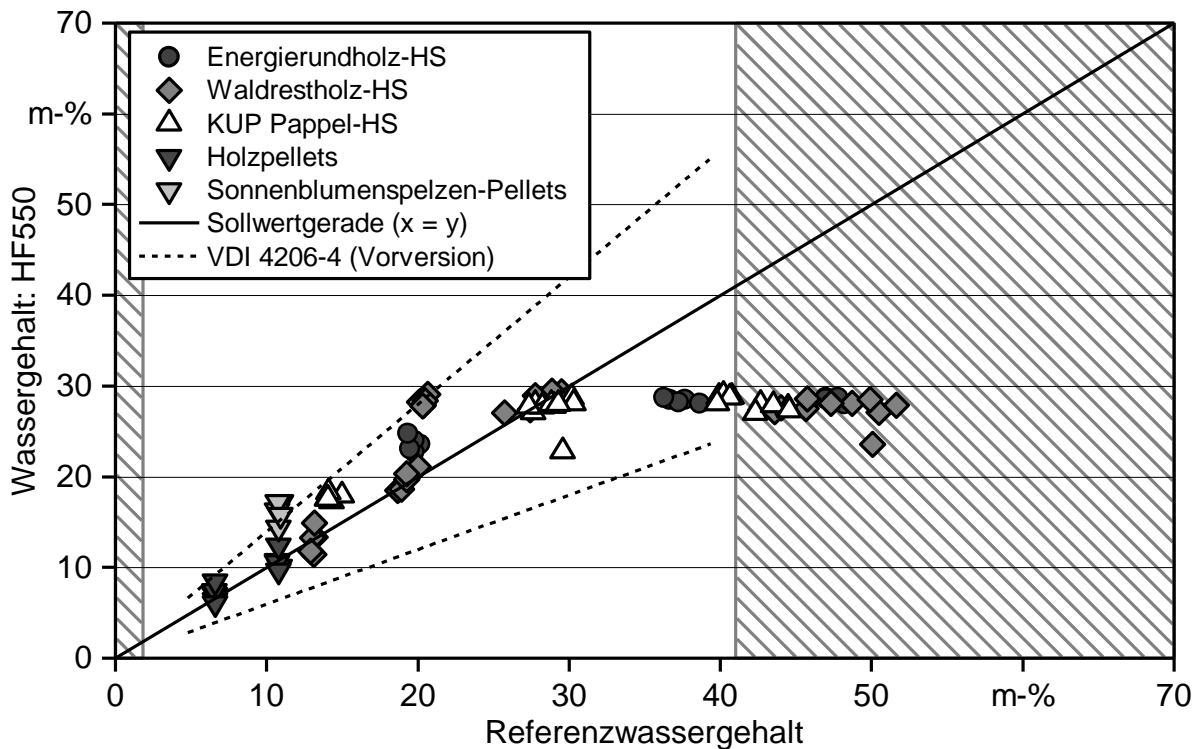


Abbildung 24: Wassergehaltsmessungen der HF550/FW550 im Vergleich zur Referenzmethode (HS = Hackschnitzel, schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des möglichen Messbereichs)

Durchschnittlich lag die mittlere Abweichung der HF550/FW550 bei $-0,1$ m-% ($\pm 5,2$). Die maximale Streuung eines Einzelwertes lag bei $-12,0$ m-% (absolut) vom Referenzwert (Abbildung 24). Die Maximalabweichung von 40 % vom Messwert nach der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 konnte mit den verwendeten Sortimenten bis auf wenige Einzelmessungen eingehalten werden. Einzige Ausnahme innerhalb des Messbereichs bildeten die Pellets aus Sonnenblumenspelzen. Diese zählen jedoch auch nicht zu den Brennstoffen, auf die das Gerät ausgelegt ist, noch sind sie für die Eignungsprüfung nach VDI 4206 Blatt 4 vorgesehen.

Auffällig war, dass von dem Messgerät kein Messwert oberhalb eines Wassergehalts von 30 m-% angegeben wurde (Abbildung 24). Dies war der höchste ablesbare Messwert, der von dem Gerät angezeigt wurde, obwohl der Messbereich laut Herstelleranga-

be erst bei 41,0 m-% enden sollte. Besonders deutlich wird dies, wenn die mittlere Messabweichung auf unterschiedliche Wassergehaltsstufen hin analysiert wird (Abbildung 25). Dabei lagen die Messwerte der Wassergehaltsstufe 25 bis 41 m-% nahezu durchweg unterhalb des Referenzwerts. Die geringste Messwertabweichung wurde bei der niedrigsten Wassergehaltsstufe (< 15 m-%) festgestellt.

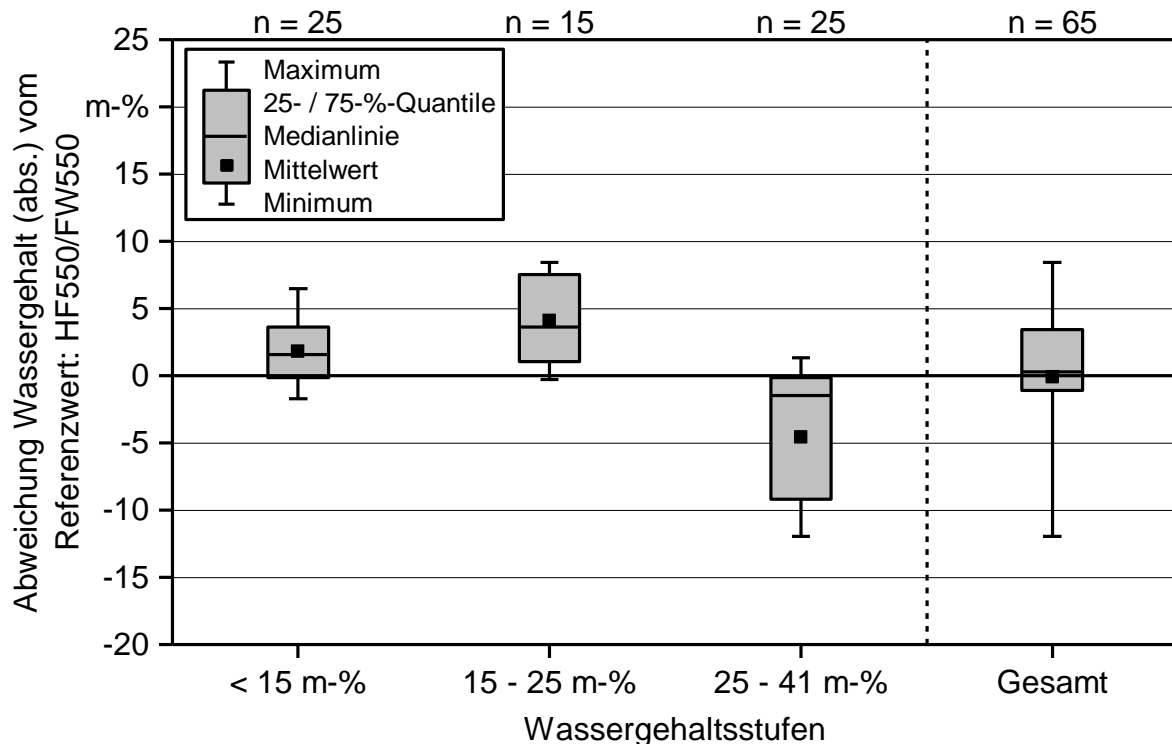


Abbildung 25: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 vom Referenzwert, getrennt nach unterschiedlichen Wassergehaltsstufen

Bei den drei untersuchten Hackschnitzelsortimenten wurde die höchste Genauigkeit bei Hackschnitzeln aus Waldrestholz festgestellt (Abbildung 26). Bei den Hackschnitzeln aus Energierundholz und KUP wurde der Wassergehalt dagegen jeweils tendenziell unterschätzt. Analog zu unterschiedlichen Schüttdichten, die einen Einfluss auf kapazitive Messungen haben können (vgl. Abschnitt 4.2.3), hat dies aber vor allem daran gelegen, dass für Waldrestholz keine Probe in dem kritischen Messbereich von 30 bis 40 m-% des Referenzwassergehalts lag, für Energierundholz und KUP dagegen schon.

Die Messwerte der Pellets lagen auf einem ähnlichen Niveau wie die der Waldrestholz-hackschnitzel (Abbildung 26). Allerdings hatten die Messungen zu den handelsuntypischen Pellets aus Sonnenblumenspelzen einen starken Einfluss auf die mittlere Messwertabweichung gehabt. Rechnet man diese heraus, liegt die mittlere Abweichung für Holzpellets bei 0,2 m-% (absolut).

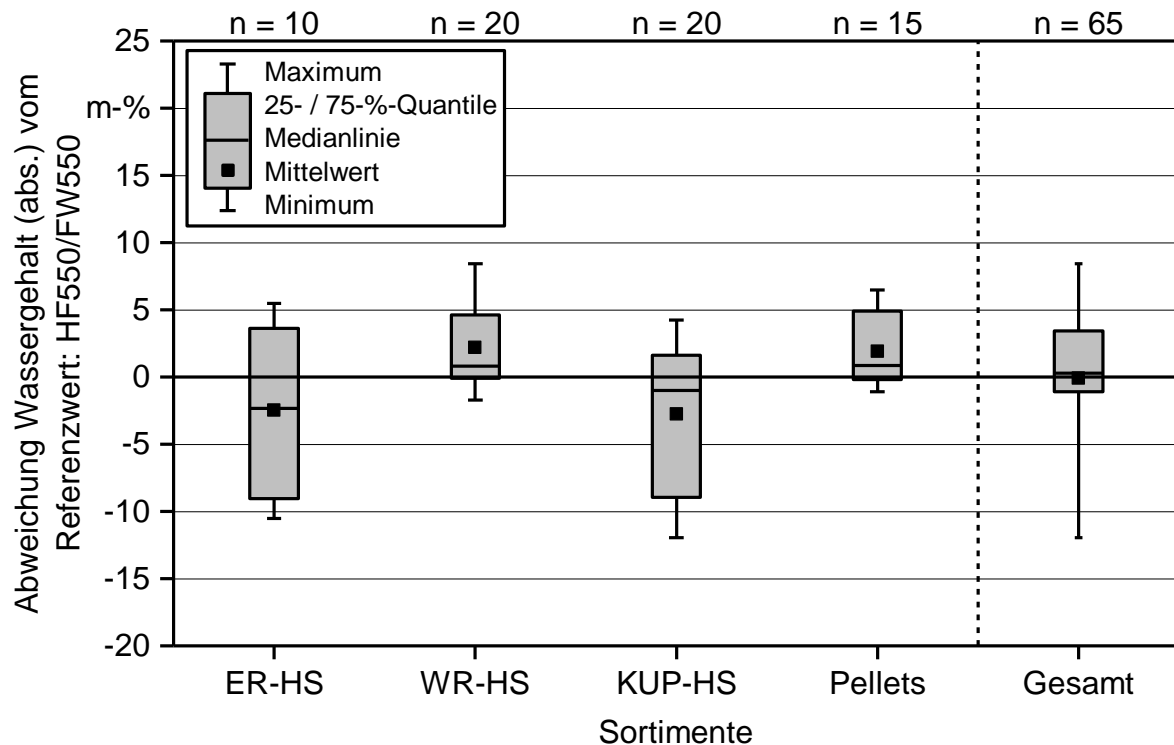


Abbildung 26: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 unterschiedlicher Sortimente vom Referenzwert (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb, HS = Hackschnitzel)

Die Ergebnisse wurden mit dem Messgerätehersteller diskutiert. Auf ihrer Grundlage wurde eine nachvollziehbare Ursache für die Messabweichung im oberen Wassergehaltsbereich erkannt und die Kalibrierung wurde wiederholt. Laut Hersteller können nun auch Messergebnisse > 30 m-% vom Messgerät zuverlässig angezeigt werden.

Zusammenfassend stellt das Holzfeuchtemessgerät HF550 in Kombination mit der Feuchtwage FW550 von Wöhler ein handliches und bedienungsfreundliches Messgerät dar, welches für den mobilen Einsatz gut geeignet ist. Bei den gebräuchlichen Hackschnitzelsortimenten und handelsüblichen Pellets kann es eine hohe Messgenauigkeit bieten. Ein direkter Vergleich der Messgenauigkeit mit den anderen manuellen Messgeräten kann aufgrund der untersuchten unterschiedlichen Sortimente und Wassergehalte nicht gezogen werden. Für den Einsatz in einem hohen, erntefrischen Wassergehaltsbereich ist das Messgerät weniger geeignet. Auch kann die relativ kleine Zylinderform bei der Befüllung mit Grobhackschnitzeln nachteilig sein.

Eine erneute Überprüfung des Gerätes nach den erfolgten Änderungen war im laufenden Vorhaben nicht mehr möglich.

4.4 Zusammenfassende Bewertung der manuellen Messgeräte

Die hohe Messgenauigkeit der Referenzmethode (Trockenschrank) wurde erwartungsgemäß von keiner der untersuchten Schnellbestimmungsmethoden erreicht. Im niedrigen Wassergehaltsbereich < 25 m-% lagen jedoch für alle Geräte 50 % der Messwerte in einem Bereich von ± 5 m-% vom Referenzwert (absolut). Die mittlere Abweichung über alle Messwerte lag zwischen $-0,5$ und $3,8$ m-%. Nichtsdestotrotz wurden je nach Gerät, Messbereich und Sortiment Einzelmessungen mit Abweichungen von 8 bis 20 m-% vom Referenzwert festgestellt.

Die untersuchten Infrarottrockner überzeugten primär durch die hohe Messgenauigkeit und die geringe Streuung der Messwerte bei homogenen Brennstoffen. Besonders das MA35 zeigte trotz der sehr geringen untersuchten Probenmenge die geringste Abweichung zum Referenzwert. Zudem bieten die Infrarottrockner die Vorteile, dass keine Kalibrierkurven gewählt werden müssen und es keine Einschränkungen bezüglich des Messbereichs (0–100 m-%) gibt.

Als schnelle Entscheidungshilfe, wenn z. B. im Falle eines zu hohen Wassergehalts eine Hackschnitzelcharge in einem Heizwerk nicht angenommen werden kann, sind die untersuchten Infrarottrockner aufgrund der höheren Messdauer und der benötigten hohen Probenzahl dagegen weniger geeignet. Auch für mobile Einsatzzwecke kommen diese Messgeräte aufgrund der zu erwartenden Inhomogenität der Brennstoffe weniger in Frage. Bei hohen Wassergehalten stellt sich zudem die Frage, ob noch von einer Schnellbestimmung gesprochen werden kann. Die Geräte punkten somit aufgrund ihrer hohen Genauigkeit, einfachen Handhabbarkeit und im Vergleich zur Trockenschrankmethode deutlich schnelleren Analyse. Ihr Einsatzzweck könnte vor allem bei Laboranalysen, z. B. für die Brennstoffanalytik einer eingeschickten Brennstoffprobe oder bei der Konditionierung von Brennstoffen für die Pelletierung in kleineren Pelletwerken, Anwendung finden.

Die untersuchten elektrischen Verfahren sind gut für mobile Einsatzzwecke geeignet. Ihr Messbereich liegt i. d. R. zwischen 5 und 50 m-% und ist damit jedoch (bis auf das Humimeter BMA) für sehr frische Brennstoffe > 50 m-% nur bedingt geeignet. Für die meisten am Heizwerk anfallenden Hackschnitzelsortimente ist der Messbereich der Geräte aber als praxisrelevant zu bewerten. Die Messwerte können mit Hilfe der Einstechlanzen innerhalb weniger Sekunden wiedergegeben werden, wodurch eine rasche Einordnung der Brennstoffe möglich ist. Beide elektrisch messenden Standgeräte sind etwas aufwändiger zu bedienen als die Einstechlanzen, bieten aber zusätzliche Hilfestellungen bei der Bedienung. Die feste Probenmenge und die automatische Verdichtung der Brennstoffe durch das Humimeter BMA helfen ebenso wie das Signal „Füllstand erreicht“ des HF550/FW550, mögliche Anwenderfehler zu minimieren. Hierdurch wird die Bedienung der Geräte zwar aufwendiger, allerdings zeigen beide Standgeräte unter den elektrischen Verfahren auch sehr hohe Messgenauigkeiten.

Im Vergleich zu den Infrarottrocknern, vor allem aber im Vergleich zum Referenzverfahren, war die Messgenauigkeit der elektrischen Verfahren deutlich geringer. Diese wird vornehmlich von dem zu messenden Wassergehaltsbereich, aber auch von externen

Größen wie der Temperatur und dem zu messenden Hackschnitzelsortiment (z. B. über dessen Schüttdichte) beeinflusst. In den vorliegenden Untersuchungen wurden die Messgeräte und die Hackschnitzelsortimente am selben Ort gelagert. Ein möglicher Einfluss schwankender Temperaturen auf das Messergebnis kann somit ausgeschlossen werden. Der Einfluss der Schüttdichte bzw. des Sortiments kann, je nach Gerät, über die Wahl einer passenden Kalibrierfunktion minimiert werden. Die Hersteller müssen dabei jedoch einen Kompromiss zwischen universellen Kalibrierkurven und speziell auf individuelle Hackschnitzelsortimente angepasste Kalibrierkurven finden. Je spezifischer die Kalibrierkurven, desto größer ist die Genauigkeit der Geräte. Gleichzeitig erhöht sich aber auch die Gefahr von Bedienungsfehlern seitens des Anwenders, wenn z. B. eine unpassende Kalibrierkurve ausgewählt wurde. Einen anwendungsfreundlichen Kompromiss hat z. B. die Firma Schaller gefunden. Bei ihren Messgeräten sind Kennlinien hinterlegt, die sich an die europäische Norm DIN EN 14961 [11] (Vorgängernorm der DIN EN ISO 17225 [13] [14]) anlehnt. Eine bebilderte Beschreibung im Handbuch hilft dem Anwender zusätzlich bei der Auswahl der passenden Kennlinie. Beim Messgerät von Gann erfolgte die Einstellung nach der Holzart. Andere Messgeräte (AD22-CMS22 und HD2) erlauben die Erstellung eigener Kalibrierfunktionen, indem sie den unkalibrierten Rohwert ausgeben.

Gerade bei den elektrischen Messgeräten schwanken Einzelwerte aller Geräte teilweise sehr stark. Aufgrund der großen Streuung, v. a. bei den Einstecklanzen, ist daher eine große Anzahl an Messwerten notwendig. Durch eine kurze Messdauer lassen sich diese jedoch im Feld rasch realisieren. Dennoch ist die Praxisrelevanz der Messgeräte abhängig von dem gewünschten Einsatzzweck. Zur korrekten Bestimmung des tatsächlichen Wassergehalts für Abrechnungszwecke kann für die meisten Geräte nur bei langfristigen Lieferverträgen und bei gleichbleibenden Liefermaterialien davon ausgegangen werden, dass sich die Schwankungen in den Messungen über die Vielzahl der Chargen im Mittel ausgleichen. Für Abrechnungszwecke bietet sich daher weiterhin die Trocknung einer repräsentativen Hackschnitzelprobe im Trockenschrank an. Für ein externes Audit im Fall einer Zertifizierung nach *ENplus* sollte ebenso die Trockenschrankmethode vorgezogen werden.

Dennoch bieten sich mehrere Einsatzzwecke für die Schnellbestimmungsmethoden, z. B. zur raschen Einschätzung, ob eine an den Kunden gelieferte Charge zu nass oder zu trocken für die jeweilige Feuerung ist, an. Ebenso sollte die Genauigkeit ausreichend sein für das interne Qualitätsmanagement, z. B. um den Erfolg von Aufbereitungsprozessen zu dokumentieren. Schlussendlich sind die Geräte gerade für die Abschätzung der Brennstoffqualität im Rahmen der wiederkehrenden Überprüfung von Kleinfeuerungsanlagen seitens des Schornsteinfegerhandwerks interessant. Hierzu ist jedoch für jedes Gerät eine Eignungsprüfung gemäß der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 4 erforderlich.

5 Online-Schnellbestimmung des Wassergehalts von Hackschnitzeln

Für die Schnellbestimmung des Wassergehalts an großen Heiz(kraft)werken, die einen hohen Brennstoffbedarf benötigen, ist die Messung mit manuellen Messgeräten analog zu der Messung mittels Trockenschrank aufgrund der hohen Probenzahl mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden (vgl. Kapitel 4). Die kontinuierliche Messung mittels Online-Messverfahren an bewegtem Gut, z. B. an Förderbändern oder Förderschnecken vor der Hackschnitzelfeuerung, bietet hier eine geeignete Alternative. Dabei geht es weniger um die Abschätzung, ob eine Charge zu hohe Wassergehalte für die jeweilige Feuerung beinhaltet und ob diese bei Anlieferung abgelehnt werden sollte, sondern vielmehr um die arbeitsexensive Bestimmung des Wassergehalts der gesamten Charge und damit um die Möglichkeit, die Brennstoffe nach dem Energiegehalt der Hackschnitzeln vor dem Kessel abzurechnen. Zudem kann die Verbrennungsführung automatisch an den jeweiligen Brennstoff angepasst werden. Bei kontinuierlichen Messverfahren ist kein zusätzlicher Arbeitsaufwand durch die Probenahme notwendig, da die Messungen über die gesamten Chargen automatisch erfolgen.

In der hier dargestellten Versuchsreihe wurden die Messgenauigkeit und damit die Praxistauglichkeit von ausgewählten Online-Messverfahren überprüft.

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Auswahl verwendeter Messgeräte

Für die Versuchsreihe konnten vier Messgeräte leihweise von den jeweiligen Herstellern bezogen werden (Tabelle 6). Alle vier Messgeräte messen elektrisch.

Tabelle 6: Messbereich und Messprinzip der untersuchten Sensoren

Anbieter und Messinstrument	Messbereich	Messprinzip
ACO Automation Components: AMMS-0-1-2-0	0–50 m-%	Kapazitive Hochfrequenzmessung
Schaller GmbH: humimeter BLO	10–55 m-%	Elektrische Leitfähigkeit
Franz Ludwig GmbH: FL-Digi Smart	0–50 m-%	Mikrowellen Feuchtemessung
SWR Engineering Messtechnik GmbH: M-Sens 2	0–39,4 m-%	Kapazitive Hochfrequenzmessung

Das **AMMS-0-1-2-0** der Firma ACO misst den Wassergehalt über das physikalische Messprinzip der Kapazitätsbestimmung im Hochfrequenzstrefeld (27 MHz). Der Mess-

bereich liegt laut Herstellerangaben bei 0 bis 50 m-% Wassergehalt. Die Kalibrierung kann entweder manuell oder über eine Kalibriersoftware erfolgen.

Das Messgerät der Franz Ludwig GmbH mit der digitalen Auswerteeinheit **FL-Digi Smart** mit angeschlossener Mikrowellen-Feuchte-Messsonde BASIC kann über einen Messbereich von 0 bis 50 m-% messen. Eine Kalibrierung erfolgt ebenfalls über ein Messprogramm.

Die Messung mittels **humimeter BLO** von der Firma Schaller GmbH kann in einem Wassergehaltsbereich von 10 bis 55 m-% erfolgen. Für die Messungen ist ein Mindestdruck von 20 N/dm² des Sensors auf die Hackschnitzel notwendig. Dieses Messgerät ist bereits fertig kalibriert und direkt einsatzbereit. Wie auch bei den Messgeräten humimeter BMA und humimeter BL2 sind die Kennlinien „Hackgut“, „Grobhackgut“ und „Industriehackgut“ bei der Messung an Hackschnitzeln wählbar (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Das **M-Sens 2** der SWR Engineering Messtechnik GmbH misst kapazitiv im Hochfrequenzbereich. Der Messbereich dieses Sensors liegt bei 0 bis 65 m-% Feuchte, d. h. bei 0 bis 39,4 m-% Wassergehalt. Vor der Verwendung des Messgeräts ist eine Kalibrierung erforderlich.

5.1.2 Versuchsbrennstoffe und Versuchsdurchführung

Um den Vorgaben zur Messdurchführung der Hersteller gerecht zu werden, wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der eine Messung im kontinuierlichen Strom nachbildet. Hierfür wurden alle Messgeräte in einem eigens konstruierten Messkanal eingebaut (siehe Abbildung 27). Durch diesen Messkanal können Hackschnitzel bei gleichbleibender Geschwindigkeit mit Hilfe eines Stempels manuell über bzw. unter den jeweiligen Messkopf eines Sensors geschoben werden. Der Transport erfolgt seitlich (Abbildung 27). Das AMMS-0-1-2-0, das FL-Digi Smart und das M-Sens 2 wurden in den Boden des Kanals integriert. Aufgrund der Mindestdruckanforderung von 20 N/dm² wurde das humimeter BLO über eine Öffnung in der Oberseite des Messkanals auf die Hackschnitzel gedrückt. Um einen möglichen Einfluss eines Messgeräts auf ein anderes auszuschließen, wurde während jeder Messung jeweils nur 1 Messgerät untersucht. Alle weiteren Messgeräte blieben ausgeschaltet.

Für die Messungen wurden zwei Nadelholzsortimente untersucht, Hackschnitzel aus Waldrestholz und aus Energierundholz (Abbildung 27a). Drei der vier Sensoren (AMMS, FL-Digi Smart, M-Sens 2) wurden vor der Versuchsreihe auf die verwendeten Hackschnitzelsortimente hin kalibriert. Pro Messgerät gab es somit jeweils 2 Kalibrierkurven. Das humimeter BLO war dagegen durch voreingestellte Kennlinien direkt einsatzfähig.

Für die individuellen Kalibrierungen der Sensoren waren pro Sortiment mindestens 2 Messpunkte notwendig, d. h. ein niedriger und ein hoher Wassergehalt mit dem jeweils dazugehörigen elektrischen Wert. Hierzu wurden sowohl frische als auch vorgetrocknete Hackschnitzel verwendet. Die elektrischen Werte für die Kalibrierung wurden direkt bei dem Vorversuch ausgelesen. Der tatsächliche Wassergehalt wurde über die Ofentrock-

nung im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-2 bestimmt [22]. Aus den Daten (elektrischer Wert, tatsächlicher Wassergehalt) berechnet die Software des jeweiligen Sensors eine eigene Kalibrierkurve.

Wie schon bei der Versuchsreihe mit den manuellen Messgeräten (vgl. Kapitel 4) sollten je Sortiment fünf Wassergehaltsstufen analysiert werden (erntefrisch, 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%). Der gewünschte Zielwassergehalt wurde analog dem Vorgehen mit den manuellen Messgeräten erreicht, indem die Hackschnitzel stufenweise in „Trocknungsboxen“ bei Raumluft getrocknet wurden (siehe Abbildung 27a und vgl. Abschnitt 4.1.2).

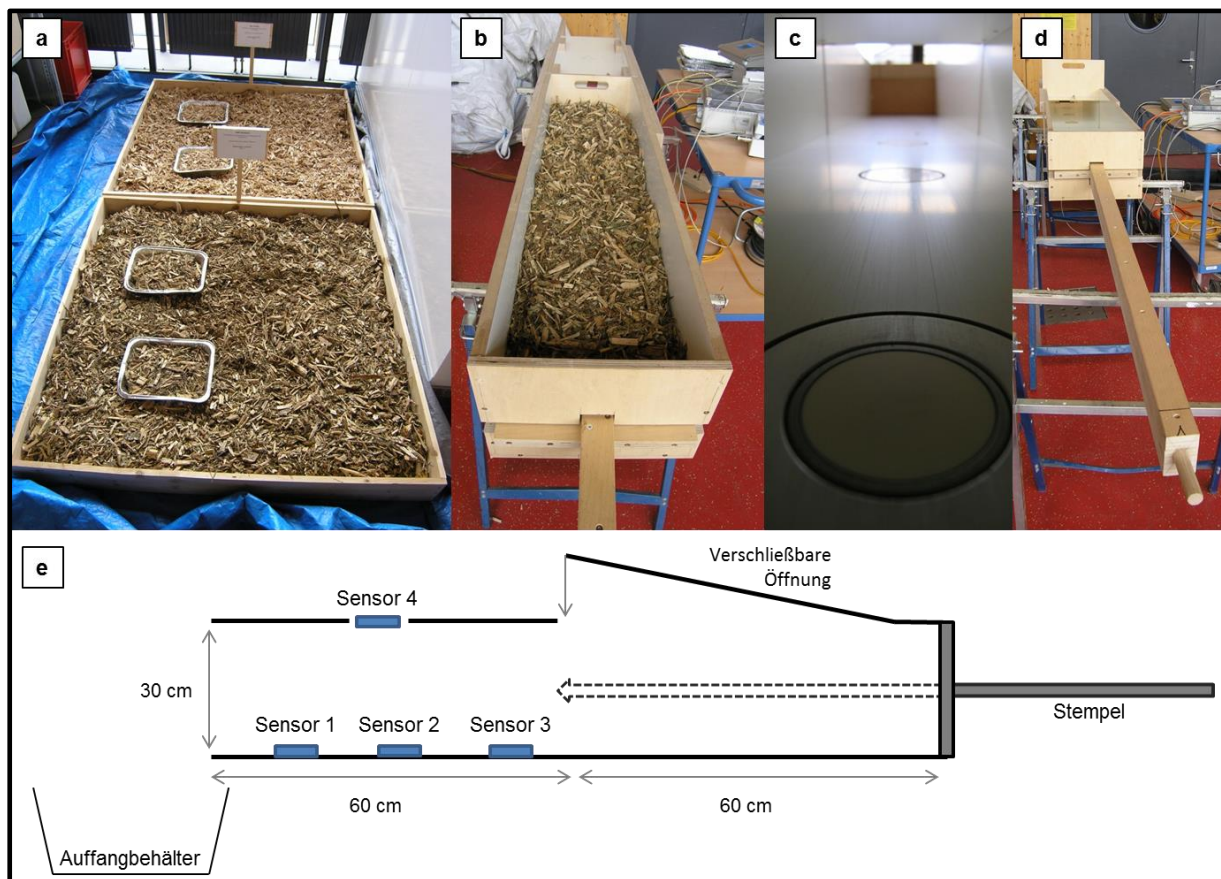


Abbildung 27: Versuchsaufbau: (a) untersuchte Hackschnitzelsortimente: Hackschnitzel aus Waldrestholz (Vordergrund) und Energierundholz (Hintergrund), (b) Messkanal befüllt mit Hackschnitzel, (c) Anbringung der Sensoren im Messkanal, (d) geschlossener Messkanal mit Stempel und (e) schematischer Aufbau des Versuchs

Bei Erreichen der gewünschten Wassergehaltsstufe wurden die Hackschnitzel eines Sortiments in einen luftdichten Plastiksack verpackt und für mindestens 24 Stunden bei 4 °C in einer Kühlkammer gelagert. Hierdurch konnten Schwankungen im Wassergehalt zwischen einzelnen Partikeln ausgeglichen werden. Anschließend wurden die Proben aus

der Kühlung genommen. Nach dem Angleichen der Hackschnitzel an die Raumtemperatur wurde die Probe aus den Kunststoffsäcken entleert und homogenisiert.

Die Messungen mit den Sensoren folgten jeweils demselben Vorgehen. Nach der Homogenisierung wurden die Hackschnitzel über eine verschließbare Öffnung von oben in den Messkanal gefüllt und gleichmäßig verteilt (siehe Abbildung 27b). Danach wurde die Öffnung verschlossen. Anschließend wurde das Material bei konstanter Geschwindigkeit mit Hilfe eines Stempels manuell über den jeweils aktiven Sensor geschoben. Die Aufzeichnung des elektrischen Wertes erfolgte dabei alle 2 Sekunden. Die Hackschnitzel wurden in einem Auffangbehälter unter dem Messkanal gesammelt. Nach Ende des Versuchs wurde die Probe erneut in den Kanal gefüllt und die Messung wiederholt. Der Messvorgang wurde je Sortiment, Sensor und Wassergehaltsstufe dreimal durchgeführt ($n = 3$). Nachdem die Messungen mit allen vier Sensoren durchgeführt waren, wurden Einzelproben zur Bestimmung des Referenzwassergehalts nach DIN EN ISO 18134-2 [22] gezogen ($n = 8$).

Von jedem Brennstoffsortiment wurde zusätzlich vor Beginn der Messreihe eine Siebanalyse nach DIN EN ISO 17827-1 [19] und eine Schüttdichtebestimmung nach DIN EN ISO 17828 [20] durchgeführt.

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Beide untersuchten Sortimente ließen sich nach DIN EN ISO 17225-1 [13] in die Partikelklasse P31 einteilen. Eine Einteilung nach Teil 4 der Norm war nur beim Energierundholz möglich (P45S), da der Feinanteil dieses Sortiments unter 10 m-% lag. Der Feinanteil lag dagegen beim Waldrestholz aufgrund höherer Anteile an Nadeln bzw. an kleinen Ästen deutlich über 10 m-%. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde bei den Messungen mit dem Humimeter BLO die Kennlinie „Hackschnitzel“ für beide Sortimente gewählt.

Tabelle 7: Mittlere Referenzwassergehalte in m-% (\pm Standardabweichung) bei den Messungen mit den Online-Messgeräten

Stufe	Energierundholz	Waldrestholz
1	48,5 ($\pm 0,5$)	Keine Messung
2	32,0 ($\pm 0,5$)	31,1 ($\pm 0,6$)
3	Keine Messung	24,4 ($\pm 0,5$)
4	18,0 ($\pm 0,3$)	16,1 ($\pm 0,1$)
5	11,5 ($\pm 0,1$)	11,4 ($\pm 0,1$)

Mit einer Schüttdichte von 211 kg/m^3 (Waldrestholz) und 185 kg/m^3 (Energierundholz, jeweils bei einem Wassergehalt von 15 m-%) lagen die Hackschnitzel in einem typischen Wertebereich für das jeweilige Sortiment [41]. Die Ergebnisse der Referenzwassergehalte

te der beiden Hackschnitzelsortimente und der jeweiligen Wassergehaltsstufe sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Beim Energierundholz wurde die dritte Wassergehaltsstufe (25 m-%) durch zu schnelles Trocknen in den Trocknungsboxen übersprungen. Das Waldrestholz wurde dagegen nicht mehr im erntefrischen Zustand geliefert, d. h. die Hackschnitzel hatten bereits bei der ersten Messreihe einen Wassergehalt von nur 31,1 m-%. Pro Sortiment wurden daher Messungen an jeweils nur vier Wassergehaltsstufen untersucht. Die gemessenen Wassergehalte deckten einen Bereich von 11,4 bis 48,5 m-% ab.

5.2.1 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit vom Sortiment

Nachfolgende Tabellen und Abbildungen zeigen die Wassergehalte und deren Abweichungen vom Referenzwert bei der Messung mit den vier Online-Messverfahren. Zunächst werden die Ergebnisse in Abhängigkeit des zu messenden Sortiments betrachtet. Anschließend werden die Geräte hinsichtlich der zu messenden Wassergehaltsstufe bewertet.

Aus Tabelle 8 und Abbildung 28 geht hervor, dass die mittleren Wassergehalte bei den Messungen mit Energierundholzhackschnitzeln nahe an die Werte der Referenzmethode herankommen. Einzelwerte können stark abweichen. Die höchste Genauigkeit erreichte das AMMS-0-1-2-0 mit einer mittleren Abweichung von -0,2 m-%. Die geringste maximale Abweichung aller Einzelwerte zeigte das humimeter BLO.

Tabelle 8: Übersicht über die Anzahl der Einzelmessungen und die durchschnittliche Messgenauigkeit der untersuchten Online-Messgeräte, getrennt nach Sortiment

Sortiment	Messinstrument	Anzahl der Messungen (<i>n</i>)	Mittlere Abweichung in m-% (± Standardabweichung)
Energierundholz	AMMS	623	-0,2 (±3,5)
	BLO	160	-2,6 (±3,5)
	FL-Digi Smart	330	0,8 (±6,5)
	M-Sens 2	410	-0,6 (±4,0)
Waldrestholz	AMMS	525	0,4 (±2,3)
	BLO	160	0,1 (±2,1)
	FL-Digi Smart	322	1,3 (±7,9)
	M-Sens 2	514	0,6 (±3,9)

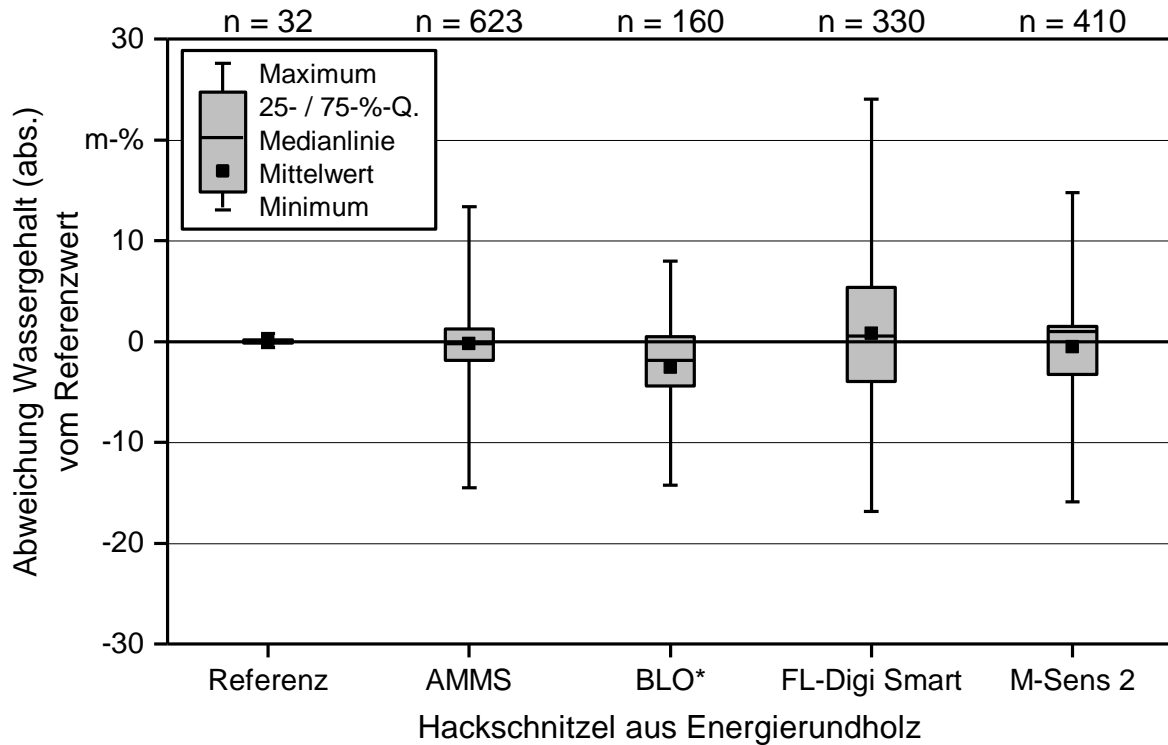


Abbildung 28: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Energierundholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)

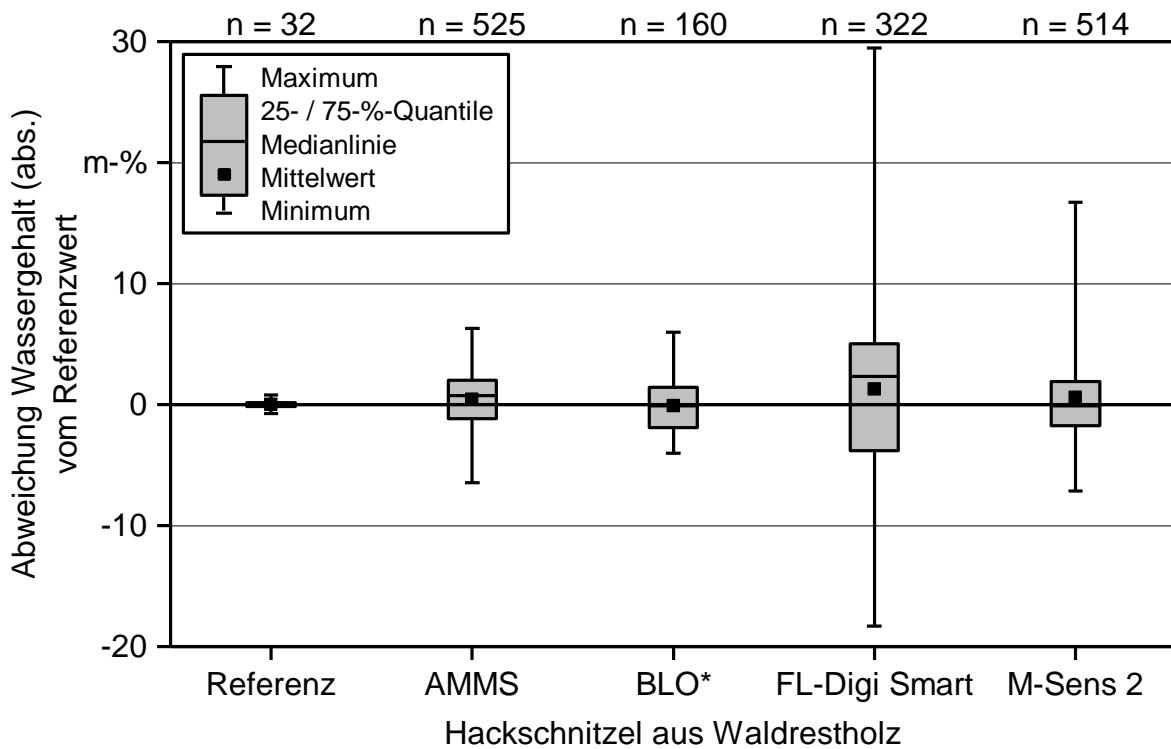


Abbildung 29: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Waldrestholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)

Bei den Messungen mit den Waldrestholz hackschnitzeln wurde ebenfalls über alle Messgeräte eine niedrige mittlere Abweichung vom Referenzwert, jedoch eine sehr hohe Streuung der Einzelmesswerte festgestellt. Die insgesamt höchste Genauigkeit hatte in diesem Fall das humimeter BLO von Schaller (mittlere Abweichung vom Referenzwert, niedrigste maximale Abweichung, Tabelle 8, Abbildung 29). Die mittlere Abweichung des BLO vom Referenzwert lag dabei bei 0,1 m-% ($\pm 2,1$).

Auch die übrigen Messgeräte erreichten im Mittel eine sehr hohe Messgenauigkeit. Insgesamt lagen knapp 50 % aller Messungen in einem Messbereich von ± 5 m-% vom Referenzwert. Somit kann durch eine hohe Anzahl an Messungen die teilweise sehr hohe Abweichung von Einzelmessungen ausgeglichen werden. Für eine kontinuierliche Messung müssen demnach je Messgerät sinnvolle Intervalle zur Mittelwertbildung gewählt werden.

Für die hier dargestellte Versuchsreihe wurden zwei Sortimente aus Nadelholz gewählt. Schon die Ergebnisse mit den ebenfalls elektrisch messenden, manuellen Messgeräten (Kapitel 4) hatten eine starke Abhängigkeit dieser Verfahren von dem jeweiligen Sortiment gezeigt. Vor allem die Messung an harten Laubhölzern kann dabei stark vom Referenzwert abweichen. Dies muss auch für die Online-Messgeräte angenommen werden. Folglich ist die korrekte Wahl einer geeigneten, sortimentspezifischen Kalibrierkurve oder die Erstellung einer eigenen Kalibrierung durch eigene Messwerte zu empfehlen.

5.2.2 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit von der Wassergehaltsstufe

Analog zu den Messungen mit den manuellen Messgeräten wurde die Genauigkeit der Online-Messgeräte in Abhängigkeit der jeweiligen Wassergehaltsstufe analysiert. Hierbei zeigte sich, wie schon bei den meisten manuellen Messgeräten, eine abnehmende Genauigkeit der Messungen bei steigendem Wassergehalt (vgl. Kapitel 4). Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 30 bis Abbildung 33) zeigen die Messwerte der vier Online-Messverfahren in den vier untersuchten Wassergehaltsstufen (< 15 m-%, 15–25 m-%, 25–35 m-% und 35–50 m-%).

Das **AMMS-0-1-2-0** zeigte im Vergleich zu den übrigen Messgeräten die niedrigsten mittleren Abweichungen je Wassergehaltsstufe (Abbildung 30). Lediglich bei Wassergehalten < 15 m-% war das humimeter BLO noch präziser (Abbildung 31). Die höchste Messgenauigkeit hatte das AMMS bei Referenzwerten bis 25 m-%, wobei fast alle Messwerte ± 5 m-% um den tatsächlichen Wert schwankten. Oberhalb 25 m-% stieg die Streuung der Messwerte an, die mittlere Abweichung lag aber weiterhin nahe dem Referenzverfahren. Auch befanden sich selbst bei hohen Wassergehalten immer noch deutlich mehr als 50 % aller Messwerte in einem Messbereich von ± 5 m-% vom Referenzwert. Die maximale Abweichung eines Einzelwertes betrug -14,5 m-% (bei einem Wassergehalt von 48,5 m-%). Somit erscheint das Messgerät bei einer guten Kalibrierung für alle Wassergehaltsstufen und Sortimente empfehlenswert.

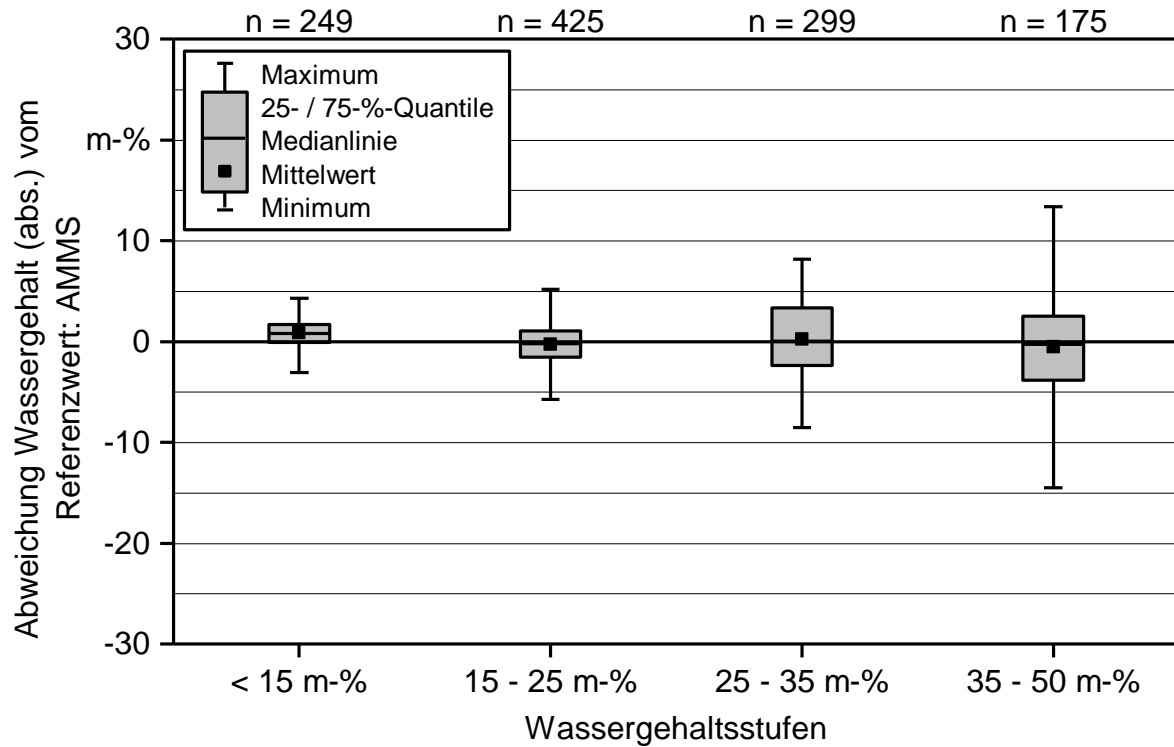


Abbildung 30: Abweichung der Messwerte des AMMS-0-1-2-0 (ACO Automation Components) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

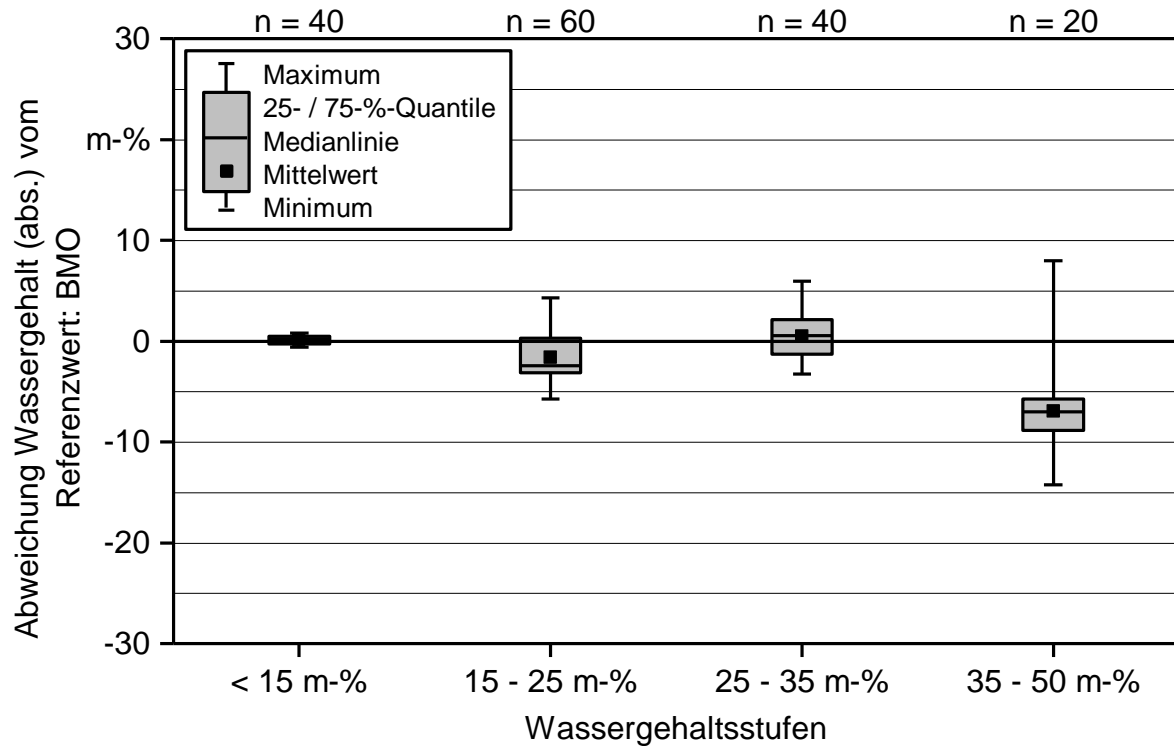


Abbildung 31: Abweichung der Messwerte des BLO (Schaller GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

Die Einzelmessungen des **humimeter BLO** zeigten bis zu einem Wassergehalt von 32,0 m-% von allen Messgeräten die geringste Streuung (Abbildung 31). Besonders in der niedrigsten Wassergehaltsstufe (< 15 m-%) waren die Messabweichungen minimal. Bis zu einem Wassergehalt von < 35 m-% kann dieses Messgerät daher empfohlen werden. Bei der Messung des Wassergehalts im hohen Messbereich (48,5 m-%, Energie-rundholz) kam es allerdings mit dem hier untersuchten Brennstoff zu einer mittleren Abweichung von -7 m-%. Die insgesamt maximale Abweichung eines Einzelwertes betrug für das BLO -14,2 m-%. Dabei sollte beachtet werden, dass ein direkter Vergleich mit den anderen Messgeräten nur bedingt möglich ist, da das humimeter BLO auf voreingestellte Kalibrierkurven zurückgreift, während alle weiteren Messgeräte direkt auf die zwei Sortimente hin kalibriert wurden. Insgesamt wurde der Wassergehalt mit dem humimeter BLO in den meisten Fällen im Mittel zuverlässig bestimmt.

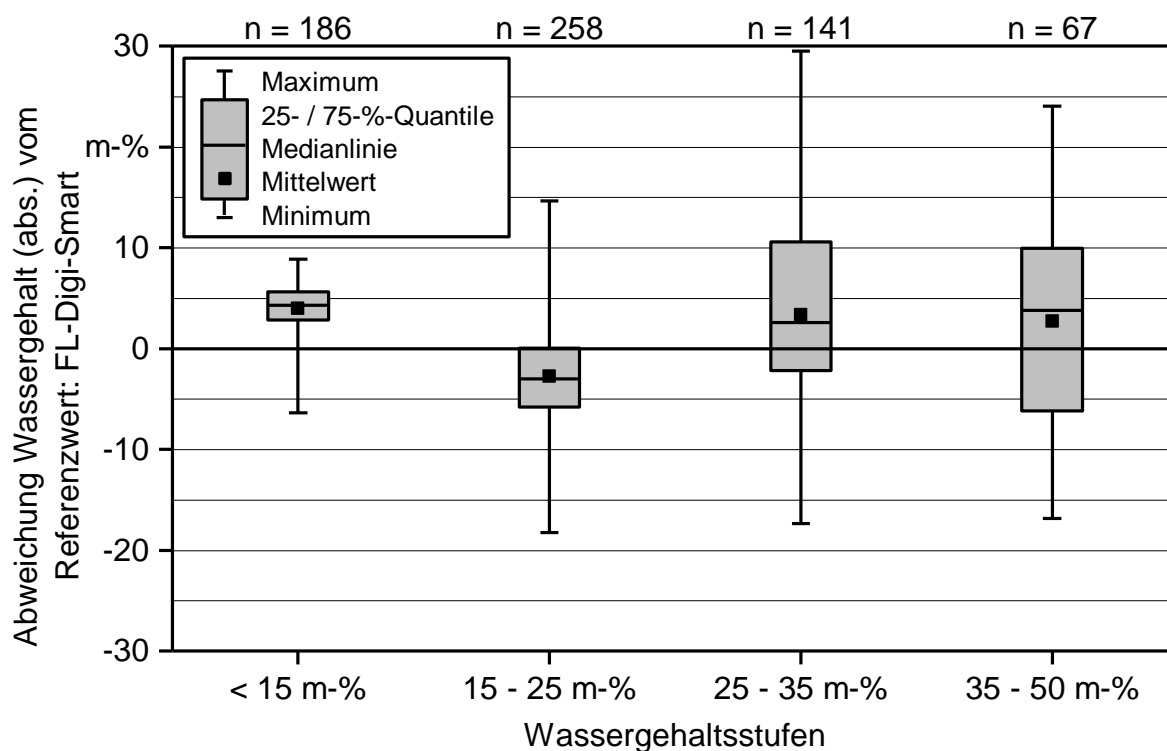


Abbildung 32: Abweichung der Messwerte des FL-Digi Smart Basic (Franz Ludwig GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

Die Messungen der vier Wassergehaltsstufen mit dem **FL-Digi Smart** sind in Abbildung 32 dargestellt. Ungefähr 50 % aller Messwerte streuen um ± 10 m-% um den Referenzwert. Die geringste Streuung der Messwerte wurde bei der niedrigsten Wassergehaltsstufe (< 15 m-%) festgestellt. Auch hinsichtlich der mittleren Abweichung zeigte das FL-Digi Smart eine etwas geringere Präzision im Vergleich zu den anderen Messgeräten. Diese lag jedoch in jedem Fall unter ± 5 % vom Referenzwert.

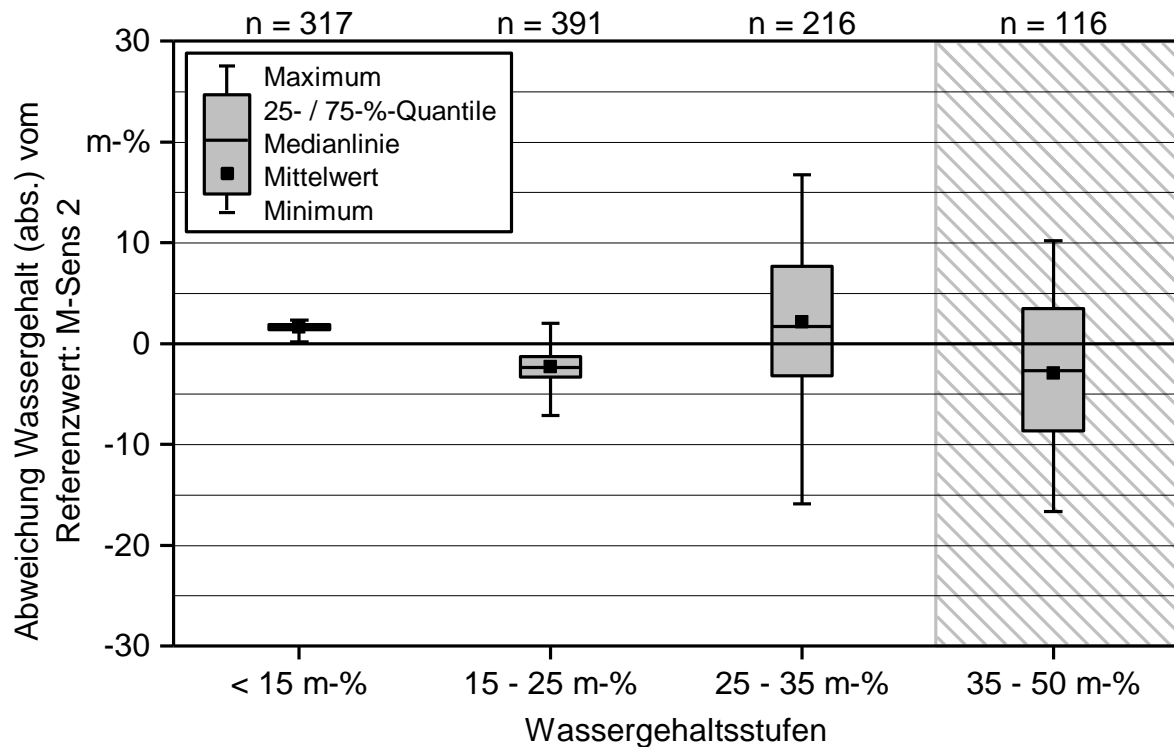


Abbildung 33: Abweichungen der Messwerte des M-Sens 2 (SWR Engineering Messtechnik GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen (schraffierter Bereich: Messbereich überschritten, Messung in den Berechnungen nicht berücksichtigt)

Der mögliche Messbereich des **M-Sens 2** reicht von 0 bis 39,4 m-%. Die Messungen der höchsten Wassergehaltsstufe (Referenzwassergehalt: 48,5 m-%) sind daher schraffiert dargestellt (siehe Abbildung 33). Da sie sich außerhalb des Messbereichs befinden, wurden sie bei den Berechnungen zur allgemeinen Messgenauigkeit nicht berücksichtigt (Tabelle 8). Auch bei diesem Messgerät zeigte sich eine steigende Streuung der Messwerte mit steigendem Wassergehalt. Die mittlere Abweichung lag ebenfalls unterhalb von ± 5 % vom Referenzwert. Analog zu den drei anderen Messgeräten werden bei höheren Wassergehalten mehr Einzelmessungen benötigt, um die im Mittel stärkeren Schwankungen ausgleichen zu können.

5.3 Zusammenfassende Bewertung der Online-Messgeräte

Zusammenfassend kann für alle vier kontinuierlich messenden Online-Verfahren eine geringe mittlere Abweichung vom jeweiligen Referenzwert festgestellt werden. Hierbei ist vor allem eine ausreichend hohe Anzahl an Einzelmessungen je Mittelwertbildung erforderlich, da Einzelwerte teilweise erheblich vom tatsächlichen Wassergehalt abweichen können. Da die Geräte für die kontinuierliche Messung ausgelegt sind, ist eine hohe Anzahl an Messwerten jedoch problemlos zu gewährleisten.

Die Genauigkeit der Messgeräte hängt von der zu messenden Wassergehaltsstufe und dem jeweiligen Sortiment ab. Die höchste Messgenauigkeit in der hier dargestellten Studie hatte der Sensor AMMS-0-1-2-0 (Energierundholz) und das Humimeter BLO (Waldrestholz). Es wird deutlich, dass analog zu den manuellen Messgeräten auch bei den Online-Messverfahren neben einer hohen Anzahl an Messwiederholungen eine gute Kalibrierung ausschlaggebend für einen guten Messwert ist. Eine materialspezifische Kalibrierung ist dabei empfehlenswert. Zu bemerken ist dabei, dass Sortimente, die bei den Untersuchungen der manuellen Messgeräte zu höheren Abweichungen geführt haben, z. B. Hackschnitzel aus hartem Laubholz, in dieser Studie nicht betrachtet wurden.

Insgesamt konnte mit allen Messgeräten im Mittel ein gutes Ergebnis erzielt werden. Dabei könnten die Geräte vor allem im niedrigen Wassergehaltsbereich auch für Abrechnungszwecke verwendet werden, falls die zu messende Charge im Materialfluss genau zuordbar ist. Für die Anpassung der Verbrennungseinstellungen eines Heizkessels an einen schwankenden Wassergehalt sollte die Präzision ebenfalls ausreichend sein.

Zusammenfassung

Schwankungen im Wassergehalt von Holzhackschnitzeln stellen eine Herausforderung für Brennstoffproduzenten, für Brennstoffhändler und für die Betreiber von Hackschnitzelfeuerungen dar. Eine akkurate und schnelle Wassergehaltsbestimmung ist dabei an vielen Schnittstellen bei der Produktion und bei dem Vertrieb der Brennstoffe ausschlaggebend. Als Standardmethode kommt i. d. R. die Wassergehaltsbestimmung mittels Trocknung der Brennstoffe im Trockenofen nach DIN EN ISO 18134-2 zum Einsatz. Diese Methode ist sowohl zeit- als auch arbeitsintensiv. Neu entwickelte gravimetrische oder elektrische Messverfahren könnten sinnvolle Alternativen für eine schnelle und akkurate Wassergehaltsbestimmung sein.

Fokus der hier dargestellten Studie lag daher auf der Überprüfung der Messgenauigkeit von Schnellbestimmungsmethoden für den Wassergehalt von Holzhackschnitzeln mittels manueller Messgeräte und mittels kontinuierlich messender Online-Bestimmungsverfahren.

Schnellbestimmung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln mit manuellen Messgeräten

Für die Überprüfung der Messgenauigkeit vorhandener praxisrelevanter Schnellbestimmungsverfahren für den Wassergehalt von Holzhackschnitzeln wurden in einer ersten Versuchsreihe neun manuelle Messgeräte getestet. Diese umfassten zwei Infrarottrockner, drei dielektrische Verfahren, drei Leitfähigkeitsverfahren und ein TDR (time domain reflectometry)-Verfahren. Für die Versuche kamen fünf Hackschnitzelsortimente (Waldrestholz aus Nadel- und Laubbäumen, Energierundholz aus Buche und Fichte sowie Hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb) mit jeweils fünf Wassergehaltsstufen (frisch, 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%) zum Einsatz.

Die mittlere Abweichung der Geräte vom Referenzwert (DIN EN ISO 18134-2) lag zwischen 0,1 m-% ($\pm 3,5$ m-%, Standardabweichung) und 4,0 m-% ($\pm 4,7$ m-%). Beste Resultate lieferte dabei der Infrarottrockner MA35. Beide getesteten Infrarottrockner verwenden für die Bestimmungen nur eine kleine Probenmenge. Da Hackschnitzel i. d. R. einen sehr heterogenen Brennstoff darstellen, könnten weniger genaue Messverfahren, die jedoch eine größere Probenmenge einschließen oder eine große Probenanzahl in kurzer Zeit ermöglichen, die Messgenauigkeit erhöhen. Die Messgenauigkeit der elektrischen Geräte war niedriger als die der Infrarottrockner. In vielen Fällen nahm die Messgenauigkeit mit steigendem Wassergehalt ab. Wenn möglich, sollten passende Kalibrierkurven gewählt oder individuelle Kalibrierkurven erstellt werden.

Das in einer zusätzlichen Messreihe untersuchte HF550/FW550 ist analog der Geräte aus Versuchsreihe 1 ebenfalls für den mobilen Einsatz gut geeignet. Bei geläufigen Hackschnitzelsortimenten und handelsüblichen Pellets kann es eine ähnliche Messgenauigkeit wie die elektrisch messenden Verfahren aus Versuchsreihe 1 bieten.

Die hohe Genauigkeit des Referenzverfahrens nach DIN EN ISO 18234 konnte von keinem der Geräte erreicht werden. Für Abrechnungszwecke sind die Messgeräte demnach

nur bedingt geeignet. Nichtsdestotrotz können die meisten Geräte für ausgewählte Zwecke, z. B. für eine interne Qualitätssicherung oder bei der Frage, ob eine Brennstoffcharge als zu feucht für die jeweilige Feuerung zu bewerten ist, empfohlen werden. Die Messabweichung der meisten Geräte lag zudem in einem Bereich von $\pm 40\%$ des Referenzverfahrens. Dieser Bereich wird in der aktuellen Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 als Anforderung an die Eignungsprüfung der Geräte für die Beurteilung von Holzbrennstoffen bei der wiederkehrenden Begutachtung von Kleinfeuerungsanlagen nach VDI-Richtlinie 4207 diskutiert. Neben der internen Qualitätssicherung könnte hierin ein weiteres Anwendungsgebiet für die mobilen Messgeräte liegen.

Schnellbestimmung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln mit kontinuierlich messenden Online-Verfahren

In einer weiteren Versuchsreihe zur Wassergehalts-Schnellbestimmung an Holzhackschnitzeln wurden vier kontinuierlich messende Verfahren bewertet. Die Messungen erfolgten an zwei Hackschnitzelsortimenten (Waldrestholz und Energierundholz aus Nadelholz) bei fünf Wassergehaltsstufen. Die Ergebnisse zeigen, dass analog zu den mobilen Messgeräten eine gute Kalibrierung ausschlaggebend für einen genauen Messwert ist. Somit kann eine materialspezifische Kalibrierung die Abweichungen vom Referenzwert verringern. Zudem wurde festgestellt, dass die Einzelmesswerte bei niedrigen Wassergehalten geringer um den Referenzwert streuen als bei hohen Wassergehalten. Die höchste Messgenauigkeit wurde für das Sortiment „Energierundholz“ mit dem Sensor AMMS-0-1-2-0 der Firma ACO gemessen. Beim Sortiment „Waldrestholz“ war dies mit dem Humimeter BLO der Firma Schaller der Fall.

Bei allen Messverfahren zeigte sich aber auch, dass einzelne Messungen sehr hohe Abweichungen aufweisen können. Eine ausreichend hohe Anzahl an Einzelmessungen muss somit zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, um einen sicheren Messwert zu erhalten. Aufgrund der kontinuierlichen Messung ist dies jedoch mit allen Messgeräten möglich. Bei einer hohen Anzahl an Messungen könnten die Geräte demnach sogar zu Abrechnungszwecken verwendet werden, vorausgesetzt, die Einzelcharge ist im Materialfluss gut abgrenzbar. Vor allem für die Regelung der Verbrennungsführung am Kessel sollten die Geräte gut geeignet sein.

Summary

Varying moisture contents in wood chips may present a challenge for fuel producers, fuel distributors and boiler operators. Accurate and on-time moisture content determination is crucial at many points during production and distribution. However, the standardized method for moisture content determination, i. e. oven drying according to DIN EN ISO 18134-2, consumes both time and labor. Newly developed gravimetric or electric methods may be suitable alternatives to provide a rapid and accurate moisture content determination.

Therefore the focus of this study was to test rapid determination methods for the moisture content of wood chips. Tests were made with manual instruments and with continuously measuring online-devices.

Rapid determination of moisture content of wood chips with manual instruments

During a first measuring campaign, nine manual devices for rapid moisture content determination of wood chips were selected for the analysis of instrument accuracy. The selection included two infrared driers, three capacitive devices, three electrical conductivity devices and one time domain reflectrometer (TDR). Measurements were done with five different wood chip assortments, i. e. with wood chips from conifer and deciduous forest residues, wood chips from energy roundwood of Norway spruce and European beech and wood chips from short rotation coppice of European poplar. For each assortment, measurements were performed at five different moisture content levels, i. e. with fresh wood chips with a moisture content of 45–55 w-%, 35 w-%, 25 w-%, 15 w-% and 10 w-%.

Mean deviation of the rapid moisture content determination devices from the reference value (moisture content determination according to DIN EN ISO 18134-2) ranged from 0.1 w-% (± 3.5 w-% standard deviation, SD) and 4.0 w-% (± 4.7 w-% SD). Highest instrument accuracy was achieved with the infrared dryer MA35. However, both infrared dryers use very small sample sizes for moisture content determination. As fuel quality of wood chips is usually very heterogeneous in large shipments, less accurate but more rapid instruments that allow for larger sample sizes or a higher number of samples within a short period of time could lead to overall higher accuracy for the assessment of a given lot.

Accuracy of electric devices was lower compared to the infrared driers. Thereby, instrument accuracy was usually higher at lower levels of moisture content. Moreover, accuracy could also depend on the wood chip assortment. If possible, devices should be calibrated to the selected wood chip assortment or a suitable calibration should be pre-selected.

During a second measuring campaign, the capacitive measuring HF550/F550 of Wöhler GmbH was analyzed additionally. Instrument accuracy was comparable to the accuracy of the other electric devices from the first measuring campaign.

Overall, the high accuracy of the reference method according to DIN EN ISO 18134-2 could not be met by any of the rapid determination devices. Thus, these instruments are only partly suitable for fuel sales. However, all tested devices are deemed suitable for internal quality management systems or for rough assessment of fuel quality at heating plants, e. g. to test whether a wood chip shipment should be rejected due to exceeding moisture content. Moreover, deviation from the reference value was below $\pm 40\%$ for most devices. The $\pm 40\%$ limit is currently under consideration as requirement according to VDI 4206 (part 4) for the accuracy of performance approved instruments for wood chip moisture content determination during the recurrent monitoring of small furnaces in Germany (VDI 4207). This might be an interesting field of application for these devices in the near future in Germany.

Rapid determination of moisture content of wood chips with continuous measuring online-devices

During a third measuring campaign, the accuracy of four rapid measuring online-devices for the moisture content of wood chips was tested. Analyses were performed with two wood chip assortments, i. e. with forest residues and energy roundwood from coniferous trees at five moisture content levels, respectively. Results indicate that the online-devices should be calibrated for the respective wood chip assortment applied. Similar to manual instruments, accuracy of the online-devices was higher at low levels of moisture content. Highest accuracy was determined for the AMMS-0-1-2-0 (ACO) for wood chips from energy roundwood and for the humimeter BLO (Schaller) for wood chips from forest residues.

For all online-devices a high number of measurements per fuel shipment is recommended as single values, could deviate strongly from the reference value. However, with all devices, a high number of measurements can be achieved easily. Thus, these devices might also be considered suitable for fuel sales, provided that measurements can be assigned to individual wood chip deliveries. Moreover, these devices are deemed suitable for controlling boiler settings according to changes in fuel moisture content.

Quellenverzeichnis

- [1] A&P INSTRUMENTS (2016): Bedienungsanleitung Feuchtemessgeräte Serie UX3001. Detmold: A&P Instruments, 16 Seiten
- [2] AHLBORN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH (2016): Handbuch. Ausführung AL-MEMO Materialfeuchtefühler FH A696-GF1. 9. Aufl. Holzkirchen: Ahlborn Mess- und Regeltechnik GmbH, 3 Seiten
- [3] BÖHM, T. (2006): Verfahren zur Bestimmung physikalischer Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes biogener Festbrennstoffe. Dissertation. Freising: Technische Universität München, 208 Seiten
- [4] BRÜGGEMANN, C.; BRÜGGER, E.; DÖRR, I.; HANSEN, H.; KRAPF, G.; KRÄMER, G.; KUPTZ, D.; LANGER, S.; STANEV, A.; SCHMOECKEL, G.; ZELINSKI, V. (2015): Hackschnitzelheizungen. Was muss aktuell beachtet werden? 2. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 34 Seiten
- [5] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (2017): Erneuerbare Energien: Förderbare – automatisch beschickte – Biomasseanlagen (Stand 4.4.2017). Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 33 Seiten
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV). Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 4, vom 01.02.2010, S. 38–56
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Gemeinsames Ministerialblatt, Nr. 25–29, S. 511–607
- [8] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Beschlossen durch das Bundeskabinett am 14.11.2016. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB), 91 Seiten
- [9] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2015): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2016. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). BMWi nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. (Stand Februar 2017). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 44 Seiten
- [10] 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 & Bioenergy*, Jg. 30, Nr. 11, S. 935–943
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN EN 14961-1. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikation und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. April 2010. Berlin: Beuth Verlag, 58 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2012): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistungen bis 500 kW. Oktober 2012. Berlin: Beuth, 30 Seiten

- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. September 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 62 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Einteilung von Holzhackschnitzeln. September 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015): DIN EN ISO 16948. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. September 2015. Berlin: Beuth-Verlag, 18 Seiten
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015): DIN EN ISO 16968. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen. September 2015. Berlin: Beuth-Verlag, 16 Seiten
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015): prEN ISO 18125 (Entwurf). Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Dezember 2015. Berlin: Beuth-Verlag, 126 Seiten
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 16994. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor. Dezember 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 20 Seiten
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 17827-1. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe – Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber. Oktober 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 17828. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Mai 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 18 Seiten
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 18122. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. März 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 18134-2. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren. September 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 12 Seiten
- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): prEN ISO 14780 (Entwurf). Biogene Festbrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung. Januar 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 22 Seiten
- [24] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (2016): Handbuch für die ENplus-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4. Version 1.0. (Stand: 01.09.2016). Berlin: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI), 21 Seiten
- [25] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. Berichte aus dem TFZ, Nr. 46. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 141 Seiten, ISSN 1614-1008

- [26] DOSER MESSTECHNIK GMBH & Co. KG (2016): Bedienungsanleitung AD22-CMS22. Füssen: Doser Messtechnik GmbH & Co. KG, 7 Seiten
- [27] ELLNER-SCHUBERTH, F.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2010): Partikelemissionen aus Kleinf Feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 22. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 134 Seiten, ISSN 1614-1008
- [28] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015): Verordnung (EU) 2015/1189 der Kommission vom 28. April 2015 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Festbrennstoffkesseln. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg 58, Nr. L 193 vom 21. Juli 2015, S. 100–114
- [29] EUROPÄISCHES PARLAMENT; RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2015): Richtlinie (EU) 2015/2193 des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in die Luft. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, Nr. L 313 vom 28.11.2015, S. 1–19
- [30] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (2015) Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. 12. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 51 Seiten
- [31] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (2016). Hackschnitzel-Heizungen – Was muss aktuell beachtet werden? 2. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 34 Seiten
- [32] GAGGERMEIER, A.; FRIEDRICH, S.; HIENDLMEIER, S.; ZETTINING, C. (2014): Energieholzmarkt in Bayern 2012 – Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 128 Seiten
- [33] GANN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH (2002): Bedienungsanleitung. GANN Hydromette HT 85 T. Gerlingen: Gann Mess- und Regeltechnik GmbH, 57 Seiten
- [34] GHM MESSTECHNIK GMBH-STANDORT GREISINGER (2016): Betriebsanleitung. GMH 3851. Version 2.1. Regenstauf: GHM Messtechnik GmbH, 22 Seiten
- [35] HOFMANN, N.; MENDEL, T.; SCHULMEYER, F.; KUPTZ, D.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2017): Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. Biomass & Bioenergy, article in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.022>
- [36] IMKO GMBH (2011): Bedienungsanleitung. HD2-Handmessgerät. Ettlingen: IMKO GmbH, 27 Seiten
- [37] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [38] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2014): Holzhackschnitzel für Kleinf Feuerungsanlagen. Produktion definierter Quellen nach DIN EN ISO 17225-4. Schule und Beratung, Nr. 11/12, S. 31–35

- [39] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2014): Qualität aus Bayern. Physikalische Eigenschaften von Waldhackschnitzeln nach DIN EN 17225. LWF aktuell, Jg. 21, Nr. 6(103), S. 8–11
- [40] KUPTZ, D.; MACK, R.; RIST, E.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2016): Wirkung der Aufbereitungskette auf das Verbrennungsverhalten in Holzfeuerungen. IN: NUSSBAUMER, T. (Hrsg.) (2016): 14. Holzenergie-Symposium: Verwendungsoptionen und neue Entwicklungen. Zürich: Verenum, S. 121–133, ISBN 3-908705-31-2
- [41] KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K.; DIETZ, E.; TUROWSKI, P.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2015): Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Berichte aus dem TFZ, Nr. 40. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 316 Seiten, ISSN 1614-1008
- [42] REISINGER, K.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; NÜRNBERGER, K. (2009): Schnellbestimmung des Wassergehalts im Holzsplit. Vergleich marktgängiger Messgeräte. Berichte aus dem TFZ. Nr. 16. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, ISSN 1614-1008, 109 Seiten
- [43] SAMUELSSON, R.; BURVALL, J.; JIRJIS, R. (2006): Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. Biomass & Bioenergy, Jg. 30, Nr. 11, S. 929–934
- [44] SARTORIUS LAB INSTRUMENTS GMBH & CO. KG (2014): Betriebsanleitung – Sartorius Moisture Analyzer. Modell MA35 – Elektronischer Feuchtebestimmer. Göttingen: Sartorius Corporate Administration GmbH, 33 Seiten
- [45] SCHALLER GMBH (2014): Bedienungsanleitung. Messgerät zur Wassergehaltsbestimmung von Biomasse. humimeter BMA, Version 1.9. Fünffing bei St. Ruprecht an der Raab: Schaller GmbH, 20 Seiten
- [46] SCHALLER GMBH (2014): Bedienungsanleitung. Universal-Messgerät zur Wassergehaltsbestimmung von Biomasse. humimeter BL2, Version 1.2. Fünffing bei St. Ruprecht an der Raab: Schaller GmbH, 20 Seiten
- [47] SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; MACK, R.; ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. (2017): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers. Biomass Conversion and Biorefinery, published online, DOI 10.1007/s13399-017-0249-7
- [48] SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2012): Fuel indexes: A novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels. Energy & Fuels, Jg. 26, Nr. 1, S. 380–390
- [49] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e. V. (2006): VDI 2066 Blatt 1: Messen von Partikeln – Staubmessung in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. November 2006. Berlin: Beuth-Verlag, 111 Seiten
- [50] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (2010): VDI 4206 Blatt 1: Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der gasförmigen Emissionen und Abgasparameter. August 2010. Berlin: Beuth-Verlag, 54 Seiten

-
- [51] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (2015): VDI 4206 Blatt 2: Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der partikelförmigen Emissionen. Februar 2015. Berlin: Beuth-Verlag, 36 Seiten
- [52] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (2016): VDI 4206 Blatt 4 (1. Vorversion vom 29.07.2016): Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der Feuchte von Holzbrennstoffen. September 2016. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), 20 Seiten
- [53] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (2016): VDI 4207 Blatt 2: Messen von Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messen an Anlagen für feste Brennstoffe. Juli 2016. Berlin: Beuth-Verlag, 86 Seiten
- [54] WIRKNER, R.; WITT, J.; SEYFERT, U. (2010): BioNorm II – Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards, Specific Targeted Research or Innovation Project, Final Report. Leipzig: German Biomass Research Centre (DBFZ), European Commission (EC), 118 Seiten
- [55] WOLF, C.; KLEIN, D.; WEBER-BLASCHKE, G.; SCHULZ, C. (2015): Treibhausgasvermeidung durch Wärme aus Holz. LWF-Merkblatt, Nr. 34. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 3 Seiten

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

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 Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen 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
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbau szenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantensorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio - Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für baye-rische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor



ISSN 1614-1008