Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel (HackZert)

Teilvorhaben 1: HackZert – Entwicklung des Zertifizierungsprogramms

Teilvorhaben 2: HackZert – Entwicklung des Zertifizierungsprogramms, Experimentelle Unterstützung

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)

Teilvorhaben 2: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Förderkennzeichen:

22025514 (DEPI)

22030314 (TFZ)

Laufzeit:

01.02.2015 bis **31.10.2016**

Monat der Erstellung:

03/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht

I Ziele

Der Hackschnitzelmarkt in Deutschland steht durch die Anforderungen der 1. Bundesimmissionsschutz-Verordnung (1. BImSchV) vor großen Herausforderungen. Um den strengen Emissionsgrenzwerten zu begegnen, sind kesselseitige und brennstoffseitige Maßnahmen erforderlich. Das Verbundvorhaben „HackZert“ hat sich die Entwicklung eines praxistauglichen Programms zur Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln zum Ziel gesetzt, um den Herstellern von Hackschnitzelkesseln, den Betreibern der Feuerungsanlagen und den Produzenten und Händlern von Hackschnitzeln einen vertrauenswürdigen Standard für einen störungs- und emissionsarmen Betrieb von Hackschnitzelfeuerungen zu geben.

1. Aufgabenstellung

Um das Gesamtziel der Entwicklung eines in der Praxis umsetzbaren Zertifizierungssystems für Hackschnitzel zu erreichen, wurden mehrere aufeinander aufbauende Teilaufgaben definiert:

- Untersuchung der Anbieter- und Nachfrageseite im deutschen Hackschnitzelmarkt
- Definition von normkonformen und marktfähigen Qualitätsklassen von Hackschnitzeln
- Vergleichende Untersuchungen von Schnellmessgeräten zur Bestimmung des Wassergehaltes von Holzhackschnitzeln
- Vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Hackschnitzelqualitäten hinsichtlich der Verbrennungsemissionen
- Vergleichende Untersuchungen der für die wiederkehrende Überprüfung durch den Schornsteinfeger verwendeten eignungsgeprüften Abgasmessgeräte
- Entwicklung eines wirksamen, kostengünstigen und leistungsfähigen Zertifizierungsprogramms zur Bereitstellung von qualitätsgesicherten Hackschnitzeln
- Information von Marktakteuren über Brennstoffanforderungen und die Brennstoffzertifizierung

Die Anforderungen an den Brennstoff Holzhackschnitzel wurden in drei Expertenbefragungen unter Federführung des DEPI ermittelt. Zwei Umfragen waren an die Hersteller von Hackschnitzelkesseln gerichtet und eine an Betreiber von Hackschnitzelheizungen. Es wurden zwanzig Hersteller persönlich per E-Mail nach dem Einfluss einzelner Faktoren auf den störungsfreien Anlagenbetrieb und auf die Emissionen bei der Verbrennung befragt.

Die Betreiber von Hackschnitzelfeuerungen wurden ausschließlich über einen Online-Fragebogen befragt. Insgesamt wurden über 800 Anlagenbetreiber kontaktiert. Davon wurden 500 Betreiber von Hackschnitzelfeuerungen über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) angeschrieben, 250 Betreiber aus Bayern über das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) und 50 Betreiber aus Niedersachen über das 3-N Kompetenzzentrum Göttingen.

Die Befragung der Anbieterseite wurde gemeinsam mit den Verbundprojekten QualiS und OptiChip durchgeführt. Die Ergebnisse der Befragungen wurden im technischen Projektbeirat diskutiert und zur Festlegung von sechs zertifizierungsfähigen Qualitätsklassen genutzt.

Die Arbeiten zur Wassergehaltsbestimmung erfolgten am TFZ. Ziel der Untersuchungen war es, die Messgenauigkeit von praxisüblichen Schnellbestimmungsmethoden für den Wassergehalt durch Vergleichsuntersuchungen zu ermitteln und Empfehlungen für die Verwendung dieser Geräte in der Praxis auszusprechen. Insgesamt wurden zehn manuelle Messgeräte (Infrarottrocknung, kapazitive Messverfahren, etc.) und vier kontinuierlich im bewegten Gutstrom messende Geräte verglichen. Zum Einsatz kamen Hackschnitzelsortimente aus Waldrestholz (Laub- und Nadelholz), Energierundholz (Fichte und Buche) und Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantage (KUP), jeweils mit bis zu fünf unterschiedlichen Wassergehaltsstufen.

Im Rahmen einer Fallstudie wurden die Probenahmen an einer Lagermiete und bei Lieferung der Brennstoffe an ein Heizwerk begleitet. Aus den Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen zur repräsentativen Probenahme großer heterogener Hackschnitzelchargen ableiten.

Bei den am TFZ durchgeführten 23 Verbrennungsversuchen wurden die Emissionen (CO, NO_X und Gesamtstaub) bei der Verbrennung unterschiedlicher Hackschnitzelqualitäten in zwei verschiedenen Kesseln (50 kW und 100 kW) unter Volllast gemessen und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in Beziehung zu der Brennstoffqualität gesetzt und bewertet. Daneben wurde die Messgenauigkeit für CO und Gesamtstaub von vier für die wiederkehrende Abgasmessung des Schornsteinfegerhandwerks zugelassenen Messverfahren mit dem Referenzverfahren nach VDI 2066 überprüft. Hierzu wurden zehn zusätzliche Verbrennungsversuche bei Voll- und Teillast durchgeführt.

Für die Entwicklung des Handbuchs zur Zertifizierung, in dem die Anforderungen an zertifizierte Produkte und Unternehmen festgelegt sind, wurden fünf verschiedene Produktionsstätten durch DEPI-Mitarbeiter besucht und hinsichtlich der Qualitätssicherungsmaßnahmen und Produktqualität analysiert. Die Produktproben wurden im Labor des TFZ untersucht.

Zur Information der Markteilnehmer wurden die Internetseite www.enplus-hackschnitzel.de sowie mehrere Newsletter vom DEPI erstellt und zwei Informationsveranstaltungen durchgeführt.

2. Stand der Technik

2.1. Hackschnitzelmarkt in Deutschland

Der Hackschnitzelmarkt in Deutschland besteht aus vielen kleinen, regional und lokal ausgerichteten Teilmärkten. Ausgeprägt sind diese Märkte in Süddeutschland. In Nord- und Ostdeutschland ist die Händlerdichte eher gering. Eine Marktanalyse der FNR ergab, dass es im Jahr 2006 deutschlandweit ca. 160 Brennstofflieferanten gab, die Holzhackschnitzel zur energetischen Nutzung im Angebot hatten und dass ca. 15.000 Hackgutzentralheizungen verbaut waren. Aktuellere Angaben für das Bundesgebiet liegen nicht vor.

2.2. Normung und Zertifizierung

Bisher haben sich deutsche Unternehmer, die Hackschnitzel mit definierten Eigenschaften produzieren wollten, hauptsächlich an der österreichischen Norm ÖNorm M 7133 orientiert. Im Jahr 2010 trat die europäische Produktnorm für Hackschnitzel EN 14961-4 in Kraft, die sich jedoch nicht auf dem Markt etablieren konnte. Im September wurde die weltweit gültige Produktnorm ISO 17225-4 in Deutschland übernommen. Folgende Normen sind hinsichtlich der Definition der Brennstoffeigenschaften von Hackschnitzeln und hinsichtlich der Qualitätssicherung bei der Bereitstellung relevant:

- Die Produktnorm DIN EN ISO 17225-4 legt Grenzwerte für die wesentlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Brennstoffen fest und definiert vier Qualitätsklassen.
- Die Qualitätssicherungsnorm DIN EN 15234-4 trat im Jahr 2010 in Kraft. Sie beschreibt ein Verfahren zur Entwicklung von Maßnahmen zur Eigenüberwachung entlang der gesamten Bereitstellungskette von Hackschnitzeln.
- Die Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001 definiert Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme. Ziel ist es, Prozesse und Abläufe im Unternehmen so zu organisieren, dass die Qualität der bereitgestellten Produkte und Dienstleistungen dauerhaft garantiert und gesteigert werden kann.

Bislang gibt es in Deutschland zwei Zertifizierungssysteme für Holzhackschnitzel, die sich im Markt jedoch nicht durchsetzen konnten:

- RAL Umweltzeichen 153 („Blauer Engel“): Die im RAL-UZ 153 festgelegten Brennstoffanforderungen bestehen aus Vorgaben der EN 14961-4 und eigenen Werten. Darüber hinaus werden strenge Vorgaben an die Nachhaltigkeit gestellt (Verwendung von zertifizierten Rohstoffen, Trocknungswärme aus regenerativen Quellen, Effizienz der Trocknung…). Es werden keine Vorgaben hinsichtlich des internen Qualitätsmanagements gemacht. Bislang ist kein Unternehmen aus der Hackschnitzelbranche zertifiziert.
- RAL Gütezeichen 451: Das RAL-GZ 451 wird durch die Gütegemeinschaft Brennholz e. V. vergeben. Derzeit gehören der Gütegemeinschaft acht Mitglieder an. Das Gütezeichen wurde primär für die Zertifizierung von Scheitholz entwickelt, wird aber auch an einige Mitglieder für Hackschnitzel verliehen. Hinsichtlich der Hackschnitzelqualität werden Vorgaben für die Korngrößenverteilung, den Wassergehalt und den Aschegehalt gemacht.

Bereitstellung von Hackschnitzeln

Die Bereitstellungsketten für Hackschnitzeln unterscheiden sich hinsichtlich des Aufbereitungsgrades. Bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln mit definierter Qualität spielen die folgenden Prozesse eine Rolle:

- Hacken: Das Hacken erfolgt im Waldbestand, an der Waldstraße, an einem zentralen Hackplatz oder außerhalb des Waldes, wie z. B. auf einem Unternehmergelände oder direkt an einem Heizkraftwerk. Neben der Wahl des Rohmaterials spielen u.a. die Schärfe der Messer sowie, je nach Bauart, die eingesetzten Siebe für die Qualität der produzierten Hackschnitzel eine Rolle.

- Trocknen: Durch Trocknung der Hackschnitzel wird der Heizwert erhöht. Außerdem können Substanzabbau, das Risiko der Selbstentzündung und die Gefahr der Ausbreitung von Schimmelpilzen minimiert oder sogar ausgeschlossen werden. Die Trocknung von Hackschnitzeln kann entweder natürlich oder technisch erfolgen. Die natürliche Trocknung kann durch eine Bodentrocknung, natürliche Konvektion oder Selbsterwärmung erfolgen. Für die technische Trocknung sind drei gängige Trocknertypen auf dem Markt: Schubwendetrockner, Bandtrockner und Trommeltrockner.
- Sieben: Durch Siebung kann eine definierte Partikelgrößenverteilung erreicht sowie Fremdmaterial und Grünanteil abgeschieden werden. Die Siebung findet zumeist auf dem Betriebshof des Aufbereiters statt. Siebanlagen werden in Plansiebe, Trommelsiebe, Scheiben- und Sternsiebe unterteilt.
- Lagerung und Transport: Die logistischen Prozesse können ebenfalls einen gravierenden Einfluss auf die Qualität der Hackschnitzel haben. Bei der Lagerung von Hackschnitzeln unter freiem Himmel und dem Transport ohne Abdeckung kommt es durch Niederschlag zu einer Reduzierung des Heizwertes und bei längeren Lagerzeiten zu Substanzabbau. Beim Transport besteht zudem die Gefahr dass sich die Hackschnitzel entmischen und der Feinanteil in der Ladung nach unten sinkt. Hackschnitzelwerden in der Regel mit Sattelkippern, Schubbodenfahrzeugen oder Wechselcontainern transportiert.

2.3. Abrechnung von Hackschnitzellieferungen

Bis jetzt hat sich auf dem deutschen Markt keine einheitliche Abrechnungsmethode durchgesetzt. Unter Berücksichtigung der Baumart und des Wassergehaltes wird meist nach dem Volumen oder dem Gewicht abgerechnet. Außerdem kann nach der in den Hackschnitzeln gespeicherten Energie oder der bei der Verbrennung erzeugten Energiemenge abgerechnet werden. Bei der letzten Möglichkeit besteht für den Hackschnitzellieferanten die Gefahr, dass er aufgrund einer schlecht eingestellten Kesselsteuerung einen relativ niedrigen Erlös erzielt. Eine einheitliche Abrechnungsmethode ermöglicht einen wirtschaftlichen Vergleich verschiedener Angebote und erhöht somit die Transparenz im Markt. Die Abrechnung nach dem Energiegehalt der Hackschnitzel gibt dem Betreiber einen wirtschaftlichen Anreiz, seine Anlage optimal einzustellen, was zu einer effizienteren Verbrennung sowie zu reduzierten Emissionen führt. Die Schwankungen von Kosten und Qualitäten auf dem deutschen Markt sind erheblich.

2.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Parallel zu dem Verbundvorhaben „HackZert“ wurden weitere Forschungsaktivitäten zur Einhaltung der Stufe 2 der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) durchgeführt. Die meisten Arbeiten wurden über den Förderschwerpunkt „Nachwachsende Rohstoffe“ des BMEL gefördert und über den durch die FNR geleiteten „Ausschuss zur Lenkung und Koordinierung von Maßnahmen zur Weiterentwicklung von automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlagen für feste Biobrennstoffe zur Einhaltung der Emissionsanforderungen der 2. Stufe der 1. BImSchV“ des BMEL koordiniert. Die Aktivitäten umfassen neue Erkenntnisse zu dem Zusammenspiel von Brennstoff, Feuerung

und Emission, aber auch über primäre und sekundäre technologische Neuerungen und über den Einfluss des Benutzerverhaltens.

Das Themenfeld „Brennstoffqualität“ wird in der Lenkungsausschuss-AG „Qualitätssicherung und Normung“ (Leitung: TFZ) behandelt. Hierbei sind neben dem Verbundprojekt „HackZert“ die beiden Verbundprojekte „qualiS“ und „OptiChip“ zu nennen:

- qualiS – Brennstoffqualifizierung und Qualitätsmanagement in der Hackschnitzelproduktion
- OptiChip – Optimierung der Emissionen von Holzhackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen durch geeignete Brennstoffauswahl und Verbrennungsführung

Die drei Verbundprojekte „HackZert“, „qualiS“ und „OptiChip“ wurden in übergreifenden Sitzungen der AG „Qualitätssicherung und Normung“ aufeinander abgestimmt. Hierbei wurden Synergien und Möglichkeiten zur Zusammenarbeit aufgezeigt und die Ergebnisse gemeinsam diskutiert. So hat z. B. das DEPI die im Projekt „qualiS“ durchgeführten Untersuchungen zu den Qualitätssicherungsmaßnahmen bei zwei Hackschnitzelanbietern begleitet. Die Umfrage von Hackschnitzelproduzenten („HackZert“ Teilvorhaben 1) wurde gemeinsam mit dem Projekt „qualiS“ durchgeführt. Zudem wurden die Feuerungsversuche in den drei Verbundprojekten aufeinander abgestimmt, um größtmögliche Synergien der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Programmentwicklung im Projekt „HackZert“ wurde durch die akkreditierte Zertifizierungstelle HW-Zert begleitet. Im Projektbeirat waren Kesselhersteller, Hackschnitzelanbieter und der Zentralinnungsverband der Schornsteinfeger vertreten.

II Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse zur Marktevaluierung wurde bereits im 1. Forschungsbericht „HackZert - Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel, Anforderungen an die Brennstoffqualität und Methoden zur schnellen Bestimmung des Wassergehalts“ veröffentlicht Im Folgenden werden die weiteren Projektergebnisse vorgestellt.

1.1. Zertifizierungsfähige Eigenschaftsklassen

Die Definition der zertifizierungsfähigen Eigenschafts-, bzw. Qualitätsklassen erfolgte auf Grundlage der internationalen Produktnorm für Holzhackschnitzel zur energetischen Nutzung, der DIN EN ISO 17225-4. Sie berücksichtigt dabei die Ergebnisse aus der Marktevaluierung und der Diskussionen mit dem Projektbeirat (Kesselhersteller, Forstbetriebe, Hackschnitzelaufbereiter, Zentralinnungsverband der Schornsteinkehrer) sowie den Analyseergebnissen unterschiedlicher Hackschnitzelsortimente. Tabelle 1 zeigt die Analyseergebnisse der Proben aus den Unternehmensbesuchen. In vielen Fällen entsprachen die ermittelten Eigenschaftsklassen nicht den Erwartungen der Produzenten. Durch Verbesserungen im Qualitätsmanagement und vor allem der Eigenüberwachung ist dennoch davon auszugehen, dass die Einhaltung der Klassengrenzen einschließlich der Verschärfung der Grenzwerte für den Feinanteil und die maximalen Länge erreicht werden kann.

Tabelle 1: Analyseergebnisse

Probe	Wassergehalt in m-%	Aschegehalt in m-%	Feinanteil in m-%	Max. Länge in mm	Qualitäts-klasse	Größen-klasse
A 1	26,7	2,6	4,1	140	EN*plus* B	P31S
B 1	29,8	1,7	8,1	159	EN*plus* B	P45S
B 2	21,7	0,6	6,3	159	EN*plus* A2	P45S
C1	7,6	0,3	2,0	133 [a)]	EN*plus* A1	P31S
D 1	20,7	1,1	2,0	137	EN*plus* A2	P31S
E 1	26,7	0,5	2,3	240	keine	P45
E 2	14,2	4,9	15,2	170	keine	P31
F 1	10,0	1,3	3,5	144	EN*plus* A2	P31S
F 2	12,9	2,2	10,0	100	EN*plus* B	P45S

[a)] Bis zu zwei Partikel mit einer Querschnittsfläche kleiner 0,5 mm^2 dürfen die maximale Länge überschreiten.

Aus den 36 nach Norm möglichen Eigenschaftsklassen hinsichtlich der Parameter Aschegehalt, Wassergehalt und Partikelgrößenverteilung wurden sechs marktgängige Sortimente als zertifizierungsfähige Produktklassen destilliert. EN*plus*-Hackschnitzel definiert dabei die Hackschnitzeleigenschaften für die Qualitätsklassen EN*plus* A1, EN*plus* A2 und EN*plus* B jeweils in den Partikelgrößenklassen P31S und P45S. Die Unterteilung der Qualitätsklassen erfolgt normkonform durch die zulässigen Gehalte an Asche und Wasser (Tabelle 2).

Tabelle 2: Eigenschaftsklassen nach EN*plus*-Hackschnitzel

Eigenschaft	Einheit	EN*plus* A1	EN*plus* A2	EN*plus* B
Wassergehalt [a)]	m-%	≥ 8 bis ≤ 25	≤ 35	ist anzugeben
Aschegehalt [b)]	m-%	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Heizwert [a)]	kWh/kg	Ist anzugeben		
Partikelgröße [c)]		P31S oder P45S		
Grobanteil [d)]	m-%	≤ 6 in P31S (> 45 mm) und ≤ 10 in P45S (> 63 mm)		
Feinanteil (< 3,15 mm)	m-%	≤ 5	≤ 8	≤ 10
Maximale Länge[e)]	mm	120 (für P31S) 150 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)

[a)] Anlieferungszustand [b)] wasserfreier Zustand [c)] Hauptanteil ≥ 60 %, in P31S: 3,15 - 31,5 mm, in P45S: 3,15 - 45 mm [d)] maximaler Querschnitt in P31S: 4 cm^2, in P45S: 6 cm^2 [e)] in einer Probe von 10 l dürfen höchstens zwei Stücke mit einer Querschnittsfläche < 0,5 cm^2 sein

Unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit wird der zulässige Feinanteil in den Qualitätsklasse EN*plus* A1 und EN*plus* A2 abgesenkt, um die Staubbelastung bei Lagerung und Logistik sowie die Verbrennungsemissionen zu begrenzen. Die Normvorgabe von zehn Masseprozent Feinanteil wird für die Qualitätsklasse EN*plus* A1 auf fünf Massenprozent und für die Klasse EN*plus* A2 auf acht Massenprozent reduziert.

Eine weitere Eingrenzung der Normvorgabe betrifft die maximal zulässige Partikellänge, um einerseits das Risiko einer Störung in der Hackschnitzelzuführung durch Überlängen zu mindern und andererseits eine gleichmäßigere Verbrennung durch eine homogenere Partikelgrößenverteilung im Glutbett zu erzielen. In der Qualitätsklasse EN*plus* A1 wird die maximal zulässige Länge für die Partikelgrößenklasse P31S von 150 mm auf 120 mm begrenzt. In Kombination mit der Partikelgrößenklasse P45S liegt die maximale zulässige Länge bei 150 mm (Normvorgabe: 200 mm).

Außerdem wird erstmals ein Mindestwassergehalt für Hackschnitzel festgelegt. Hackschnitzel der Qualitätsklasse EN*plus* A1 müssen mindestens einen Wassergehalt von 8 m-% aufweisen. Hackschnitzel unter 8 m-% können zu ineffizienten Verbrennungen führen, indem sie zu früh entzünden und die Verbrennung nicht in der Brennkammer erfolgt. Außerdem können zu trockene Hackschnitzel zu gefährlichen Störungen, wie z. B. Rückbrand führen, wenn die Feuerungen auf einen feuchteren Brennstoff ausgerichtet und eingestellt sind.

EN*plus* B entspricht der Normklasse B1 und schließt damit die Nutzung von Gebrauchtholz aus.

1.2. Abrechnung von Hackschnitzellieferungen

Der Großteil aller Hackschnitzellieferungen wird bislang in Schüttraummetern und ohne Bestimmung des durchschnittlichen Wassergehalts abgerechnet. Damit einher gehen Manipulationsmöglichkeiten durch den Lieferanten und eine geringe Transparenz hinsichtlich der gelieferten Brennstoffenergie. Teilweise wird auch eine Abrechnung nach gelieferter Wärmemenge der Hackschnitzelfeuerung vereinbart. Dadurch geht die Effizienz der

Feuerungsanlage mit in den Wert der Lieferung ein und Anlagenbetreiber haben nur einen geringen Anreiz, die Effizienz ihrer Feuerung zu verbessern. Mit der Umstellung auf eine massen- und heizwertbezogene Abrechnung wird eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Hackschnitzelangebote und auch gegenüber anderen Brennstoffen geschaffen.

Die Abrechnung nach dem Energiegehalt der Hackschnitzel erfordert die Kenntnis der Liefermenge in Gewichtseinheiten, des durchschnittlichen Wassergehalts der Lieferung und des atro-Heizwerts der Hackschnitzel. Die Liefermenge kann durch Wiegung vor und nach Beladen des Lieferfahrzeugs bestimmt werden. Für die Bestimmung des durchschnittlichen Wassergehalts ist eine repräsentative Probe Voraussetzung, deren Wassergehalt im Labor bestimmt werden kann. Der atro-Heizwert ist abhängig von der Holzart, schwankt aber nur gering zwischen 5,0 und 5,2 kWh/kg, so dass hier mit Standardwerten gerechnet werden kann.

Aus der Liefermenge und dem Wassergehalt wird die gelieferte Energiemenge rechnerisch bestimmt. Dazu ist nach den Bestimmungen des Handbuchs zur Zertifizierung (siehe Anlage 1, „Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln“) ein atro-Heizwert von 5,0 kWh/kg einheitlich für alle Holzarten oder der gemessene atro-Heizwert aus der Laboranalyse des zertifizierten Produkts anzusetzen, sofern die Holzartenzusammensetzung des Rohstoffs unverändert ist.

Zertifizierte Unternehmen müssen ihren Kunden diese Abrechnungsmethode anbieten. Sie kann in Form von massebezogener Liefermenge einer vorher vereinbarten Wassergehaltsklasse oder mit Angabe des gemessenen durchschnittlichen Wassergehalts der gelieferten Charge erfolgen.

1.3. Anleitung zur Probenahme

Die Unternehmensbesuche haben gezeigt, dass kaum ein Hackschnitzelproduzent oder -aufbereiter über systematische Prüfpläne zur Prozess- und Produktüberwachung verfügt. Eine repräsentative Probenahme nach den Bestimmungen der Norm DIN EN 14778 wird sowohl von den besuchten Unternehmen als auch den im Projektbeirat vertretenen Experten als zu aufwändig für die betriebliche Praxis eingeschätzt.

Im Zuge des Projekts wurde deshalb in Abstimmung mit Vertretern des ISO Normungsgremiums für die Erarbeitung einer vereinfachte Probenahme (geplant: ISO 21945 "Solid biofuels – Simplified sampling method for small scale applications and stores") eine bebilderte Anleitung zur vereinfachten Probenahme erstellt. Diese ist dem Schlussbericht als Anlage 2 „Anleitung zur Probenahme für ENplus-Hackschnitzel“ beigefügt.

1.4. Zertifizierungsprogramm EN*plus*-Hackschnitzel

Im Rahmen des Vorhabens wurde das Zertifizierungsprogramm EN*plus*-Hackschnitzel entwickelt. Die wesentlichen Arbeitsergebnisse sind:

- das Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln
- die Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel
- die markenrechtlich geschützte Wort-Bild-Marke „EN*plus*-Hackschnitzel“
- die Internetseite www.enplus-hackschnitzel.de

- Antragsunterlagen und Produktmeldeformulare
- Checklisten und Vorlagen für Inspektionen und Konformitätsbewertungen
- Anforderungen an Laborprüfungen

Das Handbuch und die Anleitung sind dem Bericht als Anlagen 1und 2 beigefügt. Das Zertifizierungsprogramm wurde auf der Fachtagung „Moderne Holzbrennstoffe – Qualität und Logistik“ im Rahmen der RENEXPO im Oktober 2016 in Augsburg offiziell vorgestellt und gestartet. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung konnten bereits fünf Hackschnitzelanbieter nach EN*plus*-Hackschnitzel zertifiziert werden.

1.5. Methoden zur Schnellbestimmung des Wassergehalts

Die Messgenauigkeit der im Teilvorhaben 2 des Verbundprojektes „HackZert“ analysierten Schnellbestimmungsmethoden für den Wassergehalt in Holzhackschnitzeln zeigt, dass die Genauigkeit des Referenzverfahrens (Trockenschrank) i. d. R. nicht erreicht wird. Zudem zeigen sich gerade bei elektrisch messenden Verfahren teils deutliche Unterschiede aufgrund der verwendeten Sortimente. Die Messgeräte wurden bezüglich ihrer Tauglichkeit für Abrechnungszwecke, für das interne Qualitätsmanagement und für die Messung der Brennstoffqualität bei der wiederkehrenden Messung von Hackschnitzelfeuerungen durch den Schornsteinfeger bewertet. Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse findet sich in Anlage 3 „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel, detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2“. Hier wird auch eine Fallstudie zur Probenahme für die Wassergehaltsbestimmung beim Hackschnitzelproduzenten sowie bei Anlieferung an das Heizwerk beschrieben.

Erste Ergebnisse wurden bereits auf der Europäischen Biomassekonferenz 2016 in Amsterdam, auf dem 49. Forest Mechanisation Symposium in Warschau (2016), auf der Mitteleuropäischen Biomassekonferenz 2017 in Graz sowie während des 20. Arbeitskreis Holzfeuerungen des TFZ 2016 in Straubing vorgestellt.

1.6. Bewertung der Verbrennungseigenschaften von Holzhackschnitzeln

Die für die Verbrennungsversuche geforderte Brennstoffqualität nach EN*plus* konnte seitens der Brennstoffproduzenten größtenteils eingehalten werden. Auch stimmten in den meisten Fällen die Angaben zur Brennstoffqualität seitens der Produzenten mit den tatsächlichen Messungen überein.

Beide im Versuch verwendeten Kessel konnten mit Hackschnitzeln nach EN*plus* die Grenzwerte für CO der Stufe 2 der 1. BImSchV einhalten. Dagegen konnten ausreichend geringe Partikelemissionen nicht mit Sicherheit gewährleistet werden, wenn zur Messung die Referenzmessmethode der Staubkonzentrationsbestimmung ohne Abzug der Messunsicherheit angewendet wurde. Auch eine nachträgliche Anpassung der Kessel brachte dabei in den Versuchen im Rahmen des Projekts „HackZert“ keine besseren Ergebnisse.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die bisherigen Kriterien bzw. Parameter der Brennstoffnorm DIN EN ISO 17225-4, wie die Partikelgrößenverteilung, der Aschegehalt, der Wassergehalt und der Feingehalt, nur bedingt für die Beurteilung der Brennstoffe geeignet sind und dass die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen damit nicht ausreichend

genau abgeschätzt werden können. Vor allem hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen kann trotz hoher Brennstoffqualität bisher keine Gewährleistung zur Einhaltung der Stufe 2 Grenzwerte der 1. BImSchV gegeben werden. Erste Ansätze sind jedoch aus den hier vorliegenden Messdaten ableitbar. So zeigt sich, dass für die hier verwendeten Kleinfeuerungsanlagen der Wassergehalt optimalerweise nicht über 25 m-% liegen sollte (EN*plus* A1). Bezüglich der partikelförmigen Emissionen scheinen Aschegehalte von < 0,5 m-% sinnvoll zu sein, um die Emissionen in Richtung des 20-mg-Grenzwertes der Stufe 2 der 1. BImSchV abzusenken. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass der Aschegehalt nur bedingt geeignet ist, partikelförmige Emissionen konkret abzuschätzen.

Nach Abschluss der drei Projekte „OptiChip“, „qualiS“ und „HackZert“ werden die gesammelten Ergebnisse in einer Gesamtauswertung aller Feuerungsversuche analysiert, um weitere Erkenntnisse auf einer breiteren Datenbasis gewinnen zu können. Die Veröffentlichung dieser Gesamtauswertung ist nach Projektende in der Schriftenreihe „Berichte aus dem TFZ“ für den Sommer/Herbst 2017 vorgesehen. Teile der Ergebnisse wurden zudem bereits für die Veröffentlichung in dem Peer-review-Journal „Biomass Conversion and Biorefinery“ angenommen.

Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse findet sich in Anlage 3 „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel, detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2“.

1.7. Messgenauigkeit der Schornsteinfegermessgeräte

Es wurden vier Schornsteinfegermessgeräte (Gerät A bis D) mit dem Referenzverfahren nach VDI 2066/VDI 4206 bezüglich des gemessenen Gesamtstaubs bzw. mit einer Gasanalyse bezüglich der gemessenen CO-Emissionen verglichen. Hinsichtlich des CO-Gehaltes im Abgas überzeugten drei der vier Kaminkehrermessgeräte, lediglich ein Gerät unterschätzte den CO-Gehalt.

Für den Gesamtstaubgehalt im Abgas wurden zunächst beide Referenzmessstellen in der Abgasmessstrecke miteinander verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erzielt wurde. Aufgrund der schwankenden Anteile des Staubgehaltes, welcher durch das Spülen der Probenahmesonde ermittelt wurde, erfolgte für den weiteren Vergleich eine pauschale Korrektur aller Messwerte ohne Spülungsanteil um 15 %. Die Geräte A und D zeigten ähnliche Gesamtstaubgehalte wie das Referenzverfahren. Das Gerät B unterschätzt den Gesamtstaubgehalt deutlich, außer bei den Versuchen mit Holzpellets als Brennstoff. Das Gerät C zeigte deutliche Streuungen der Gesamtstaubgehalte im Abgas und es reagierte zum Teil empfindlich bei geänderter Vorauswahl des Messbereichs.

Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse findet sich in Anlage 3 „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel, detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2“.

2. Verwertung

Nach Abschluss des Projektes wird das Zertifizierungsprogramm implementiert. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung wurden bereits fünf Anbieter von Hackschnitzeln erfolgreich zertifiziert. Mit „EN*plus*-Hackschnitzel“ liegt damit nach „EN*plus*-Pellets“ und „EN*plus*-Briketts“ die dritte EN*plus*-Qualitätszertifizierung für Holzbrennstoffe vor. Die drei Zertifizierungen profitieren wechselseitig von ihrer Bekanntheit und dem erreichten Marktvertrauen. Die Einnahmen aus der Zertifizierung und Zeichennutzung stärken die wirtschaftliche Basis des DEPI und ermöglichen zukünftig ein an Multiplikatoren gerichtetes Marketing für moderne, qualitätsgesicherte Holzbrennstoffe unter dem Überbegriff EN*plus*.

Die im DEPV organisierten Kesselhersteller unterstützen die Zertifizierung und geben ihren Hackschnitzelkesseln Freigaben für die jeweils geeigneten Qualitätsklassen. Dazu sind Aufkleber für neu ausgelieferte Kessel in Vorbereitung, die den Bekanntheitsgrad von EN*plus* und der damit verbundenen Qualitätsklassen steigern werden und so die Nachfrage nach der Zertifizierung erhöhen. Die Etablierung der Brennstoffstandards für Hackschnitzel unterstützt weitere Entwicklungen zur Optimierung von Hackschnitzelheizungen.

Durch die Koordination der Verbundprojekte wurde die vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Einrichtungen gestärkt.

3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Projektlaufzeit wurde ein Entwurf von „Güte- und Prüfbestimmungen für Holzhackschnitzel“ der Gütegemeinschaft Holzbrennstoffe & Holzhackschnitzel e. V. bekannt.

Neben der Brennstoffqualität wurden in den über den Förderschwerpunkt „Nachwachsende Rohstoffe“ geförderten Projekten weitere Möglichkeiten zur Einhaltung der Stufe 2 der 1. BImSchV betrachtet. Vor allem der Austausch zwischen den drei Verbundprojekte „HackZert“, „qualiS“ und „OptiChip“ ermöglicht erhebliche Synergie in Hinblick auf brennstoff- und feuerungstechnische Maßnahmen zur Emissionsminderung.

Eine vorläufige Gesamtbetrachtung der Feuerungsversuche der drei Verbundprojekte bestätigt, dass die in gängigen Normen verwendeten Qualitätsparameter und Brennstoffklassen noch nicht ausreichen, um das erwartete Emissionsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen ausreichend sicher abschätzen zu können. Eine umfassende Gesamtauswertung aller Versuche erfolgt nach Abschluss der Projekte im Frühjahr/Sommer 2017. Zusätzlich zu den drei Verbundprojekten „HackZert“, „qualiS“ und „OptiChip“ wird diese Gesamtauswertung auch Ergebnisse zweier weiterer über das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) geförderten Projekte zum Verbrennungsverhalten von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um die Projekte:

- Projekt „Einfluss von Baumart, Lagerung und Aufbereitung auf die Brennstoffqualität und das Emissionsverhalten von KUP-Hackschnitzeln“
- Projekt „Versorgung des Nahwärmenetzes am TFZ mit KUP-Holz einschließlich Begleitforschung“

Die Gesamtauswertung der fünf Projekte ermöglicht neue Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Brennstoffqualität und Feuerung. Daneben kann zusätzlicher Forschungsbedarf erkannt werden. Die Erkenntnisse werden u. a. bei der Evaluierung des über das Verbundprojekt „HackZert“ entwickelten Zertifizierungsprogramms EN*plus*-Holzhackschnitzel helfen und werden die langfristige Bereitstellung geeigneter Brennstoffe für den störungs- und emissionsarmen Anlagenbetrieb ermöglichen.

Der Feuerungsbetrieb wurde im Projekt „HackZert“ in den meisten Fällen nicht auf die jeweilige Brennstoffqualität hin optimiert. Eine umfangreiche Anpassung des jeweils verwendeten Kessel an den Brennstoff erfolgte dagegen in Phase 1 des Projekts „OptiChip“. Dabei wurde deutlich, dass trotz höchster Brennstoffqualität (technisch getrocknete und gesiebte Hackschnitzel aus Sägerestholz) und einem modernen Kessel die Höhe der Emissionen je nach Kesselführung stark schwanken kann. Eine Anpassung des Kessels an den Brennstoff ist demnach zwingend zu empfehlen und hätte eventuell auch im Projekt „HackZert“ zu niedrigeren Emissionen bei der Verbrennung führen können. Hierauf wurde aber bewusst verzichtet, um den Einfluss einer im Alltagsbetrieb variierenden Brennstoffqualität direkt abbilden zu können. Lediglich bei ausgewählten Versuchen wurde die Kesseleinstellung mit Unterstützung des Werkskundendienstes des Kesselherstellers optimiert, wobei jedoch im Projekt „HackZert“ keine Verbesserungen im Emissionsverhalten erzielt werden konnten.

Das ebenfalls über den Förderschwerpunkt „Nachwachsende Rohstoffe“ geförderte Projekt „Entwicklung von Empfehlungen zur Vorbereitung der wiederkehrenden Emissionsprüfungen nach 1.BImSchV" zeigt zudem die Notwendigkeit einer regelmäßigen Reinigung und Wartung von Biomassekesseln. Diese Information ist vor allem für den Betreiber von Biomassefeuerungen relevant, da die Wartung und Reinigung in der Praxis häufig vernachlässigt wird.

Neben der Brennstoffqualität finden zurzeit viele technische Optimierungsmaßnahmen an Feuerungsanlagen statt. Diese werden ebenfalls für den Lenkungsausschuss des BMEL über die FNR koordiniert. Neben der Entwicklung und Optimierung kostengünstiger Staubabscheider (CAROLA-Verbundvorhaben „Weiterentwicklung von Feinstaubabscheidern und Feldtests mit holzgefeuerten automatisch beschickten Heizkesseln“; FRESBI-Forschungsverbund „Optimierung der Fraktionsabscheidegrade elektrostatischer Staubabscheider beim Einsatz in Biomassefeuerungen“) und der Entwicklung und dem Feldtest von Tiefenfiltern (Projekt „Abscheidung von Feinstaub aus Biomassekleinfeuerungen mit Tiefenfilter“) fokussieren die Projekte auf die primärseitige Optimierung der Verbrennung (EffiPriMa-Forschungsverbund „Entwicklung effizienter Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung von Holzhackschnitzelfeuerungen“; SenSTEF-Forschungsverbund „Emissionsarme Verbrennungstechnik von automatisch beschickten Biomassefeuerungen“).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die über das BMEL geförderten und über den Lenkungsausschuss koordinierten Forschungsverbünde und Projekte wichtige Stellschrauben für eine Optimierung der Emissionen von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen untersuchen. Die Kombination aller Erkenntnisse, d. h. das optimierte Zusammenspiel einer

hohen Brennstoffqualität, einer hochwertigen Feuerungstechnik (primär, sekundär) und ein aufgeklärter Betreiber (Reinigung, Wartung, Kesseleinstellung) sollten einen emissionsarmen Anlagenbetrieb und damit die Einhaltung der Stufe 2 der 1. BImSchV ermöglichen.

4. Veröffentlichungen

- Bentele, Schmersahl, Volgmann (2016): Markt verlangt qualitätsgesicherte Hackschnitzel. Holz-Zentralblatt 2016, S. 953, 30.09.2016
- Mendel, Überreiter, Kuptz, Hartmann (2016): Comparison of Rapid Moisture Content Determination Methods for Wood Chips. In: EU BC&E 2016. 24th European Biomass Conference. Amsterdam Exhibition and Convention Center, Amsterdam, Netherlands, June 6-9. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, (Eds.), Florence, Italy, S. 634–638
- Mendel, Überreiter, Kuptz, Hartmann (2017): Comparison of Rapid Moisture Content Determination Methods for Wood Chips. In: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV) (Hrsg.): 5. Mitteleuropäische Biomassekonferenz. Messe Congress Graz, 18.-20. Jänner. Graz: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV), S. 211
- Schön, Kuptz, Mack, Zelinski, Loewen, Hartmann (2017): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small scale wood chip boilers. Biomass Conversion and Biorefinery, Springer, Manuscript accepted

ANHANG A

Teilvorhaben 1: HackZert – Entwicklung des Zertifizierungsprogramms

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens ist die Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel

Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1: Management und Koordination

AP 2: Evaluierung des Marktes für Holzhackschnitzel in Deutschland

- Recherche zu den Rohstoffanforderungen von kleinen und mittleren Feuerungsanlagen sowie zum Einfluss einzelner Brennstoffeigenschaften und der Homogenität einer Charge auf die Emissionen
- Anbieterbefragung zu Bereitstellungsketten für Holzhackschnitzel
- Festlegung von markt- und zertifizierungsfähigen Hackschnitzelqualitäten, die in den Verbrennungsversuchen des TFZ (AP B) zum Einsatz kommen

AP 3: Programmentwicklung

- Definition der Qualitätsklassen und des Deklarationssystems für zertifizierte Produkte in Anlehnung an DIN EN ISO 17225-4
- Festlegung von Vorgaben für die Qualitätssicherung und das Qualitätsmanagement von Hackschnitzelanbietern in Anlehnung an DIN EN 15234-4 und DIN EN ISO 9001
- Entwicklung des Zertifizierungssystems einschließlich der Prozeduren für die Organisation des Programms
- Entwicklung eines einheitlichen Abrechnungssystems für Hackschnitzellieferungen auf der Grundlage des Energiegehalts der Hackschnitzel.

AP 4: Unternehmensbesuche/Probezertifizierung

- Information der Unternehmen, die an den Probezertifizierungen teilnehmen, über die Regelungen des Zertifizierungsprogramms
- Unterstützung der beteiligten Unternehmen bei der Entwicklung eines angemessenen Qualitätsmanagements
- Durchführung von Inspektionen auf dem Betriebsgelände gemäß den Vorgaben des Zertifizierungsprogramms
- Evaluierung der Inspektionen und Diskussion der Ergebnisse mit den besuchten Unternehmen, dem Projektbeirat und der HW-Zert
- Erstellung und Veröffentlichung der Version 1.0 des Handbuchs zur Zertifizierung auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse

AP 5: Vorbereitung der Implementierung

- Erstellung und Verbreitung von Informationsmaterialien zur Zertifizierung

- Entwurf und markenrechtlicher Schutz der Zertifizierungszeichen
- Entwurf und Erstellung einer Internetseite zum Zertifizierungsprogramm
- Erstellung und Verbreitung eines Informationsflyers zur 1. BImSchV mit Hinweisen zum emissionsarmen Heizen mit Hackschnitzeln
- Durchführung von auf verschiedene Zielgruppen zugeschnittenen Informationsveranstaltungen

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Vorhabens wurde das Zertifizierungsprogramm EN*plus*-Hackschnitzel entwickelt. Die wesentlichen Arbeitsergebnisse sind

- das Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln
- die Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel
- die markenrechtlich geschützte Wort-Bild-Marke „ENplus-Hackschnitzel“
- die Internetseite www.enplus-hackschnitzel.de
- Antragsunterlagen und Produktmeldungen
- Flyer EN*plus*-Hackschnitzel

Das Handbuch zur Zertifizierung und die Anleitung zur Probenahme sind als Anlagen 1 und 2 des Berichts dokumentiert. Das Zertifizierungsprogramm wurde im Rahmen der RENEXPO im Oktober 2016 in Augsburg ausführlich vorgestellt und gestartet. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung konnten bereits fünf Hackschnitzelanbieter nach EN*plus*-Hackschnitzel zertifiziert werden.

Anhang B

Teilvorhaben 2: HackZert - Entwicklung des Zertifizierungsprogramms, experimentelle Unterstützung

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 2 ist die wissenschaftliche Unterstützung von Teilvorhaben 1. Diese beinhaltet die Bestimmung der Messgenauigkeit von Verfahren zur Schnellbestimmung des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln, Hilfestellung zur Probenahme von großen Hackschnitzelchargen, Feuerungsversuche an ausgewählten Kesseln (50 kW, 100 kW) mit qualitativ hochwertigen Brennstoffen nach EN*plus* sowie die Bestimmung der Messgenauigkeit von Kaminkehrermessgeräten.

Bearbeitete Arbeitspakete

AP A: Schnellbestimmung des Wassergehaltes

- Recherche der vorhandenen Schnellbestimmungsverfahren für den Wassergehalt, differenziert nach Anwendungsgebieten für die Charakterisierung einzelner Probenchargen oder kontinuierlicher Förderströme
- Beschaffung ausgewählter Schnellbestimmungsgeräte für den Wassergehalt (Zusammenarbeit mit Herstellern)
- Planung und Durchführung von Vergleichsuntersuchungen mit unterschiedlichen Holzbrennstoffen. Referenzverfahren: Trockenschrankmethode nach DIN EN ISO 18134-2.
- Darstellung und Bewertung der Einflussgrößen
- Bewertung der Messungenauigkeit und der möglichen Geräteverwendung (z. B. für interne Qualitätssteuerung oder auch für Abrechnungszwecke)
- Fallstudie zur Gewinnung repräsentativer Teilproben beim Brennstoffproduzenten (Hackschnitzelmiete) und bei Lieferung an das Heizwerk
- Ableitung von Empfehlungen für die Praxis

AP B: Bewertung der Verbrennungseigenschaften

- Bewertung der Brennstoffqualität von Hackschnitzelchargen für Verbrennungsversuche am Prüfstand des TFZ
- Verbrennungsversuche an Hackschnitzelkessen kleiner Leistung inklusive Emissionsmessung
- Recherche und Beschaffung von im Rahmen der wiederkehrenden Kaminkehrermessung zugelassenen Messgeräten zur Bestimmung von CO und Gesamtstaub im Abgas
- Verbrennungsversuche zum Vergleich der Kaminkehrermessgeräte
- Bewertung der Messungenauigkeit und der möglichen Geräteverwendung

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Arbeiten aus Teilvorhaben 2 erbrachten u.a. folgende Erkenntnisse:

- Die Messgenauigkeit der Schnellbestimmungsmethoden des Wassergehalts in Holzhackschnitzeln erreicht nicht die Genauigkeit des Referenzverfahrens (Trockenschrank). Die Geräte wurden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für Abrechnungszwecke, das interne Qualitätsmanagement und die Bewertung der Brennstoffqualität seitens des Kaminkehrerhandwerks eingeordnet.
- Die für die Verbrennungsversuche geforderte Brennstoffqualität nach EN*plus* konnte seitens der Brennstoffproduzenten größtenteils eingehalten werden.
- Beide im Versuch verwendeten Kessel konnten mit Hackschnitzeln nach EN*plus* die Grenzwerte für CO der Stufe 2 der 1. BImSchV einhalten. Dagegen konnten ausreichend geringe Partikelemissionen nicht mit Sicherheit gewährleistet werden, wenn zur Messung die Referenzmessmethode der Staubkonzentrationsbestimmung (ohne Abzug der Messunsicherheit) angewendet wurde.
- Drei von vier Kaminkehrermessgeräte konnten bezüglich der Messung des CO-Gehalts im Abgas überzeugen.
- Zwei Kaminkehrermessgeräte zeigten ähnliche Gesamtstaubgehalte auf wie das Referenzverfahren. Ein Gerät unterschätzte den Gesamtstaub deutlich. Das vierte Gerät zeigte deutliche Streuungen der Gesamtstaubkonzentration im Abgas und es reagierte zum Teil empfindlich bei geänderter Vorauswahl des Messbereiches.

Alle genannten Ergebnisse werden detailliert in Anlage 3 „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel, detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2“ dargestellt. Erste Teilergebnisse wurden bereits veröffentlicht (Tagungsbände EU BC&E 2016, CEBC 2017, etc.). Weitere Veröffentlichungen sind in Planung und wurden z. T. bereits akzeptiert (z.B. im Journal „Biomass Conversion and Biorefinery“).

Anlage 1

EN*plus*-Hackschnitzel

Handbuch für die

EN*plus*-Qualitätszertifizierung

von Holzhackschnitzeln

nach DIN EN ISO 17225-4

Version 1.0

1. September 2016

Herausgeber: **Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)**
Neustädtische Kirchstraße 8
10117 Berlin

Tel.: 030 6881599-55
Fax: 030 6881599-77
E-Mail: info@depi.de

Internet: www.depi.de

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

FNR
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1 Hintergrund 4

2 Normative Verweise 5

3 Begriffsdefinitionen 6

4 Aufbau des Zertifizierungssystems 7

4.1 Übersicht 7

4.2 Erstzertifizierung 8

4.3 Überwachungsprüfungen 9

4.4 Rezertifizierung 9

4.5 Zertifizierung von neuen Produkten 10

4.6 Vor-Ort-Inspektionen 10

4.7 Fernaudits 11

4.8 Abweichungen von den Programmanforderungen 11

4.9 Widerspruchsverfahren 12

4.10 Auditoren 12

4.11 Prüflabore 12

4.12 Externe Überwachung des Zertifizierungssystems 12

4.13 Mitgeltende Dokumente 12

5 Anforderungen an zertifizierte Unternehmen 13

5.1 Qualitätsmanager 13

5.2 Mitarbeiterqualifikation 13

5.3 Qualitätssicherung 13

5.4 Hackschnitzellieferung 15

5.5 Umgang mit Beschwerden 16

5.6 Dokumentation 16

6 Anforderungen an zertifizierte Produkte 17

6.1 Rohmaterialien 17

6.2 Zertifizierte Produkte 17

6.3 Lieferdokumentation 18

7 Zertifikat und Zeichennutzung 19

7.1 Gültigkeit des Zertifikats 19

7.2 Zertifizierungszeichen 19

7.3 Qualitätszeichen 20

7.4 Nutzung von Zertifizierungs- und Qualitätszeichen 20

7.5 Entgeltordnung 21

1 Hintergrund

Moderne Holzfeuerungen sind Hightech-Produkte, die auf einen hochwertigen, homogenen Brennstoff angewiesen sind. Holz als preiswerter CO_2-neutraler Brennstoff aus heimischer Produktion liefert beste Voraussetzungen für die Energiewende am Wärmemarkt. Wenn die Holzenergie in Zukunft einen deutlichen Zubau erfahren soll, wird jedoch nicht nur die Feuerungstechnik, sondern auch der Brennstoff höheren Anforderungen entsprechen müssen.

Mit dem Dauerthema Feinstaubbelastung ist die Luftreinhaltung ein Anspruch, dem moderne Holzfeuerungen heute entsprechen müssen. Dies erfordert vor allem einen homogenen Brennstoff mit strengen Qualitätsanforderungen, der einen effizienten, emissionsarmen und komfortablen Betrieb gewährleistet. Das Ziel des Zertifizierungsprogramms EN*plus*-Hackschnitzel ist daher die verlässliche Bereitstellung von standardisierten, qualitätsgesicherten Holzhackschnitzeln für Hackschnitzelfeuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich.

EN*plus*-Hackschnitzel richtet sich an Anbieter von Holzhackschnitzeln, die ihre Produkte als Schüttgut an Heizungs- und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen liefern, bietet aber auch Produzenten und aufbereitenden Unternehmen in der Vorkette die Möglichkeit, ihre Leistungen durch das Zertifikat EN*plus*-Hackschnitzel auszeichnen zu lassen. EN*plus*-Hackschnitzel verbindet dabei Anforderungen an die Leistungen des Anbieters (das zertifizierte Unternehmen) mit Anforderungen an die Hackschnitzeleigenschaften (die zertifizierten Produkte). Das Zertifizierungsprogramm definiert Anforderungen in diesen Bereichen:

- Rohstoffe, Eigenschaften und Klassifizierung von Hackschnitzeln
- Qualitäts- und Beschwerdemanagement
- Qualitätssicherung bei der Produktion, Aufbereitung und Lieferung
- Produktdeklaration, Nachverfolgbarkeit und Abrechnungsverfahren

Wesentlicher Inhalt des Zertifizierungssystems ist die Schaffung von auf Partikelgröße und Aschegehalt basierenden Qualitätsklassen. Damit die Abrechnung einheitlich über den Energiegehalt erfolgen kann, definiert EN*plus*-Hackschnitzel auch ein praktikables Messverfahren für den Wassergehalt einer Liefercharge.

EN*plus*-Hackschnitzel ist nach EN*plus* für Holzpellets und EN*plus*-Briketts das dritte Programm der EN*plus*-Qualitätszertifizierungen moderner Holzbrennstoffe. Das Deutsche Pelletinstitut (DEPI) hat im Jahr 2010 die EN*plus*-Zertifizierung für Holzpellets entwickelt. Für Holzbriketts bietet das DEPI seit März 2016 das Zertifizierungsprogramm EN*plus*-Briketts an. Mit EN*plus*-Hackschnitzel wird das EN*plus*-Zeichen – auch international – zur Dachmarke für hochwertige, moderne Premiumholzbrennstoffe.

2 Normative Verweise

- DIN EN 15234-4 (2012): Feste Biobrennstoffe – Qualitätssicherung von Brennstoffen – Teil 4: Holzhackschnitzel für nichtindustrielle Verwendung
- DIN EN ISO 14780 (2011): Biogene Festbrennstoffe – Probenherstellung
- DIN EN ISO/IEC 17020 (2012): Konformitätsbewertung – Anforderungen an den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen
- DIN EN ISO/IEC 17025 (2005): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- DIN EN ISO/IEC 17065 (2013): Konformitätsbewertung – Anforderungen an Stellen, die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen zertifizieren
- DIN EN ISO 17225-1 (2014): Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO 17225-4 (2014): Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Hackschnitzeln
- DIN EN ISO 17827-1 (2016): Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe – Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber
- DIN EN ISO 18122 (2016): Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes
- DIN EN ISO 18125: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes
- DIN EN ISO 18134-1 (2015): Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehalts – Ofentrocknung – Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser – Referenzverfahren
- DIN EN ISO 18134-2 (2015): Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehalts – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren
- DIN EN ISO 18135-2: Biogene Festbrennstoffe – Probenahme – Teil 2 – Probenahme in Wohngebäuden und anderen kleinen Einheiten (Charge ≤ 100 t)
- DIN EN ISO 9001 (2015): Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen

Hinweis: Solange keine gültige DIN EN ISO-Norm für die Prüfung eines Qualitätsparameters vorliegt, ist die Analyse nach den Bestimmungen der entsprechenden DIN EN-Norm durchzuführen.

3 Begriffsdefinitionen

Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel: Die Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel ist ein vom DEPI herausgegebenes mitgeltendes Dokument, in dem die repräsentative Probenahme von Hackschnitzeln beschrieben wird.

DEPI: DEPI ist die Kurzbezeichnung für die Deutsches Pelletinstitut GmbH, ein Tochterunternehmen des Deutschen Energieholz- und Pellet-Verbands e. V. (DEPV). Das DEPI ist Eigentümer und Systemträger des Zertifizierungsprogramms EN*plus*-Hackschnitzel.

EN*plus*-ID: Die EN*plus*-ID ist die individuelle Identifikationsnummer eines Zertifikatnehmers. Sie ist Bestandteil des Zertifizierungs- und Qualitätszeichens.

Handbuch: Das Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung für Holzhackschnitzel definiert die Rechte und Pflichten aller Teilnehmer des Zertifizierungsprogramms EN*plus*-Hackschnitzel.

Auditor: Auditoren prüfen die Umsetzung der Anforderungen des Zertifizierungsprogramms und nehmen vor Ort Proben der zertifizierten Produkte. Die Beauftragung von Auditoren erfolgt durch das DEPI.

Prüflabor: Laboranalysen von Holzhackschnitzeln müssen durch akkreditierte Prüflabore durchgeführt werden. Die Beauftragung des Prüflabors obliegt dem DEPI.

Produkt-ID: Für jedes zertifizierte Produkt eines zertifizierten Unternehmens wird eine Produkt-ID vergeben, die aus der EN*plus*-ID, der Partikelgröße und der Qualitätsklasse besteht. Die Produkt-ID ist Teil des Qualitätszeichens eines zertifizierten Produkts.

Qualitätszeichen: Ein Zertifikatnehmer erhält für jedes zertifizierte Produkt ein individuelles Qualitätszeichen. Das Qualitätszeichen setzt sich aus dem Logo EN*plus*-Hackschnitzel, dem Logo der Qualitätsklasse und der Produkt-ID zusammen. Das Qualitätszeichen dient zur Kennzeichnung der zertifizierten Produkte.

Zertifikatnehmer: Zertifikatnehmer sind zertifizierte Unternehmen, deren zertifizierte Produkte den Anforderungen von EN*plus*-Hackschnitzel entsprechen und die sich in einem Vertrag mit dem DEPI verpflichtet haben, die Bestimmungen des Zertifizierungsprogramms zu beachten.

Zertifizierungszeichen: Jeder Zertifikatnehmer erhält ein individuelles Zertifizierungszeichen. Das Zertifizierungszeichen besteht aus dem Logo für EN*plus*-Hackschnitzel und der EN*plus*-ID.

Zertifizierte Produkte: Zertifiziertes Produkt sind Holzhackschnitzel, deren Übereinstimmung mit den Anforderungen der ISO 17225-4, dieses Handbuchs und der Produktdeklaration durch Prüfung einer Produktprobe nachgewiesen wurde. Holzhackschnitzel unterschiedlicher Qualitäts- und Partikelgrößenklassen gelten als unterschiedliche Produkte.

4 Aufbau des Zertifizierungssystems

4.1 Übersicht

Das Zertifizierungsprogramm ermöglicht Anbietern von Holzhackschnitzeln eine Zertifizierung ihrer Produkte in den Qualitätsklassen EN*plus* A1, EN*plus* A2 und EN*plus* B. EN*plus*-Hackschnitzel verbindet dabei Anforderungen an den Anbieter der Holzhackschnitzel (das zertifizierte Unternehmen) mit Anforderungen an die angebotenen Holzhackschnitzel (die zertifizierten Produkte). Das zertifizierte Unternehmen muss seine Befähigung zum dauerhaften Angebot hochwertiger Holzhackschnitzel nachweisen. Dazu formuliert EN*plus*-Hackschnitzel Anforderungen an das Qualitätsmanagement und die Qualitätssicherung einschließlich des Umgangs mit Beschwerden.

Zertifizierte Produkte müssen den Anforderungen hinsichtlich der Herkunft und Beschaffenheit der Rohstoffe sowie der physikalischen Eigenschaften der Holzhackschnitzel entsprechen, wie sie für die ausgewiesenen Eigenschaftsklassen in der Produktnorm DIN EN ISO 17225-4 beschrieben und in diesem Handbuch festgelegt sind. EN*plus*-Hackschnitzel zertifiziert die Qualitätsklassen **EN*plus* A1**, **EN*plus* A2** und **EN*plus* B** jeweils für die Partikelgrößen **P31S** und **P45S**.

Die wesentlichen Inhalte des Zertifizierungssystems sind:

- Anforderungen an die Produkteigenschaften und eingesetzte Rohstoffe
- Anforderungen an die Qualitätssicherung und das Qualitätsmanagement
- Anforderungen an die Lieferung und Abrechnung der zertifizierten Produkte
- Überprüfung und Bestätigung der Konformität der Hackschnitzel mit den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 17225-4 und dieses Handbuchs
- Bestimmungen zur Nutzung der Zertifizierungs- und Qualitätszeichen

Bei der Erstzertifizierung und der dreijährlichen Rezertifizierung des Unternehmens wird für jedes zertifizierte Produkt eine Probe durch einen vom DEPI beauftragten Auditor entnommen und vor Ort geprüft, ob das Unternehmen und seine zertifizierten Produkte den Anforderungen des Zertifizierungsprogramms entsprechen. Die Überwachungsprüfungen in den Zwischenjahren werden als Fernaudit durchgeführt und durch die Untersuchung einer vom Zertifikatnehmer für jedes zertifizierte Produkt eingereichten Produktprobe ergänzt.

Das DEPI fungiert als Systemträger und Zertifizierungsstelle, die die Bewertung der Inspektions- und Prüfberichte vornimmt (Konformitätsbewertung). Das DEPI entscheidet entsprechend der Vorgaben dieses Handbuchs über die Vergabe der Zertifikate. Die Unabhängigkeit und Angemessenheit der Arbeit des DEPI wird dabei regelmäßig durch eine externe, akkreditierte Zertifizierungsstelle geprüft und bescheinigt.

Tabelle 1: Anforderungen an die jährliche Überprüfung

	Turnus	Inspektion	Probenahme
Erstzertifizierung	Beginn der ersten Zertifizierungsperiode	Vor Ort	Auditor
Überwachung	Im 2. und 3. Jahr der Zertifizierungsperiode	Fern	Zertifikatnehmer
Rezertifizierung	Zu Beginn jeder neuen Zertifizierungsperiode	Vor Ort	Auditor

Die Neuzertifizierung eines Produkts während der Zertifikatslaufzeit erfolgt durch eine Produktmeldung und die Einsendung einer Produktprobe durch den Zertifikatnehmer. Neu zertifizierte Produkte werden anschließend in den Zertifizierungsturnus hinsichtlich Überwachung und Rezertifizierung des Unternehmens übernommen.

Zertifizierte Unternehmen erhalten individuelle Zertifizierungszeichen und für jede zertifizierte Qualitäts- und Partikelgrößenklasse ein Qualitätszeichen, um ihre Produkte auszuzeichnen. Alle zertifizierten Unternehmen und Produkte werden auf der Internetseite von EN*plus*-Hackschnitzel unter www.enplus-hackschnitzel.de veröffentlicht.

4.2 Erstzertifizierung

Anbieter von Holzhackschnitzeln können die Zertifizierung ihres Unternehmens und ihrer Produkte schriftlich beim DEPI beantragen. Dazu stellt das DEPI auf den Internetseiten der EN*plus*-Hackschnitzelzertifizierung Antragsformulare bereit. Der Antrag auf Zertifizierung enthält die Lizenz- und Zeichennutzungsbedingungen, die durch Unterschrift anzuerkennen sind. Mit Einreichen des Antrags und der Vereinbarung eines Inspektionstermins entsteht eine Zahlungsverpflichtung des zertifizierten Unternehmens entsprechend der Entgeltordnung für EN*plus*-Hackschnitzel.

Das Antragsverfahren umfasst folgende Schritte:

- Der Antragsteller lädt die jeweils aktuelle Version des Handbuchs für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln, des Antragsformulars, des Produktmeldeformulars und der Entgeltordnung von den Internetseiten der EN*plus*-Hackschnitzelzertifizierung unter www.enplus-hackschnitzel.de herunter.
- Der Antragsteller sendet den Antrag und für jedes zu zertifizierende Produkt eine Produktmeldung per E-Mail an info@enplus-hackschnitzel.de. Den rechtsgültig unterschriebenen Antrag sendet er per Post an das DEPI.
- Das DEPI beauftragt einen Auditor mit der Erstinspektion des Antragstellers. Der Antragsteller benennt für jedes zu zertifizierende Produkt einen Standort, an dem eine Produktprobe genommen werden kann. Der Auditor nimmt für jedes zu zertifizierende Produkt eine Probe und versiegelt diese. Der Antragsteller sendet die versiegelten Proben an ein vom DEPI benanntes akkreditiertes Prüflabor. Der Auditor prüft die Unternehmensprozesse des Antragstellers hinsichtlich der Anforderungen dieses Handbuchs und erstellt einen Inspektionsbericht, den er dem DEPI übermittelt.
- Das Prüflabor untersucht die Produktprobe und sendet den Prüfbericht an das DEPI.
- Das DEPI prüft die Konformität des Antrags und der Inspektions- und Prüfergebnisse mit den Vorgaben der DIN EN ISO 17225-4 und den Bestimmungen dieses Handbuchs.
- Das DEPI stellt die Jahresrechnung für EN*plus*-Hackschnitzel gemäß der Entgeltordnung. Die Kosten für Inspektion und Labor werden auch bei Nichtkonformität berechnet.
- Das DEPI übermittelt dem Antragsteller das Zertifikat, das Zertifizierungszeichen, die Berichte und die Qualitätszeichen der zertifizierten Produkte.
- Das DEPI veröffentlicht den Antragsteller, seine EN*plus*-ID sowie die zertifizierten Produkte auf der Internetseite der EN*plus*-Hackschnitzelzertifizierung.

4.3 Überwachungsprüfungen

Während der dreijährigen Zertifikatslaufzeit muss der Zertifikatnehmer in Jahr zwei und drei nachweisen, dass seine Prozesse und zertifizierten Produkte den Anforderungen der ISO 17225-4 und des Zertifizierungsprogramms weiterhin entsprechen. Dazu sind spätestens einen Monat vor dem Jahrestag des Zertifizierungsbeginns ein Fernaudit und die Einsendung einer Produktprobe an ein vom DEPI benanntes Prüflabor erforderlich. Im Einzelnen sind folgende Schritte notwendig:

- Ein vom DEPI beauftragter Auditor vereinbart einen Termin für das Fernaudit und fordert im Vorfeld Unterlagen per E-Mail an. Er erstellt einen Inspektionsbericht und sendet diesen an das DEPI.
- Der Zertifikatnehmer sendet für jedes zertifizierte Produkt eine Probe an ein vom DEPI benanntes Prüflabor.
- Das Prüflabor untersucht die Produktprobe und sendet den Prüfbericht an das DEPI.
- Das DEPI prüft die Konformität der Ergebnisse der Inspektions- und Prüfberichte mit den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-4 und den Bestimmungen dieses Handbuchs.
- Das DEPI stellt die Jahresrechnung für EN*plus*-Hackschnitzel gemäß der Entgeltordnung. Die Kosten für Inspektion und Labor werden auch bei Nichtkonformität berechnet.
- Das DEPI sendet die Berichte und die Jahresrechnung an den Zertifikatnehmer.
- Das DEPI aktualisiert die Informationen auf der Internetseite von EN*plus*-Hackschnitzel.

4.4 Rezertifizierung

Mit Ablauf der Zertifikatslaufzeit nach drei Jahren wird eine Rezertifizierung notwendig. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

- Nach Aufforderung des DEPI reicht der Zertifikatnehmer für jedes weiterhin angebotene zertifizierte Produkt eine aktualisierte Produktmeldung ein.
- Das DEPI beauftragt einen Auditor mit der Inspektion des Antragstellers. Der Antragsteller benennt für jedes zu zertifizierende Produkt einen Standort, an dem eine Produktprobe genommen werden kann. Der Auditor nimmt für jedes zu zertifizierende Produkt eine Probe und versiegelt diese. Der Antragsteller sendet die versiegelten Proben an ein vom DEPI benanntes akkreditiertes Prüflabor. Der Auditor prüft die Geschäftsprozesse des Antragstellers hinsichtlich der Anforderungen dieses Handbuchs und erstellt einen Inspektionsbericht, den er dem DEPI übermittelt.
- Das Prüflabor untersucht die Produktprobe und sendet den Prüfbericht an das DEPI.
- Das DEPI prüft die Konformität der Ergebnisse der Inspektions- und Prüfberichte mit den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-4 und den Bestimmungen dieses Handbuchs.
- Das DEPI stellt die Jahresrechnung für EN*plus*-Hackschnitzel gemäß der Entgeltordnung. Die Kosten für Inspektion und Labor werden auch bei Nichtkonformität berechnet.
- Das DEPI sendet die Berichte, das aktualisierte Zertifikat und die Jahresrechnung an den Zertifikatnehmer.
- Das DEPI aktualisiert die Informationen auf der Internetseite von EN*plus*-Hackschnitzel.

4.5 Zertifizierung von neuen Produkten

Die Zertifizierung von Produkten erfolgt erstmals im Zuge der Erstzertifizierung des Unternehmens. Die Zertifizierung von weiteren Produkten ist danach jederzeit möglich. Dazu ist die Einsendung von Produktmeldungen und einer Produktprobe erforderlich. Nach Abschluss der Zertifizierung eines Produkts erfolgen die weiteren Produktprüfungen im Turnus der Überwachungsprüfungen und der Rezertifizierung des zertifizierten Unternehmens. Zur Neuzertifizierung von Produkten sind folgende Schritte notwendig:

- Der Zertifikatnehmer sendet die Produktmeldung für das neu zu zertifizierende Produkt an info@enplus-hackschnitzel.de.
- Der Zertifikatnehmer sendet eine Probe des neu zu zertifizierenden Produkts an ein vom DEPI benanntes Prüflabor.
- Das Prüflabor untersucht die Produktprobe und sendet den Prüfbericht an das DEPI.
- Das DEPI prüft die Konformität der Produktmeldung und des Prüfberichts mit den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-4 und den Bestimmungen dieses Handbuchs.
- Das DEPI stellt die Kosten der Produktprüfung in Rechnung und sendet den Prüfbericht, das aktualisierte Zertifikat sowie das neue Qualitätszeichen an den Zertifikatnehmer.
- Das DEPI aktualisiert die Informationen auf der Internetseite von EN*plus*-Hackschnitzel.

4.6 Vor-Ort-Inspektionen

Für die Erst- und Rezertifizierung ist eine Vor-Ort-Inspektion durch einen vom DEPI beauftragten Auditor erforderlich. Dem Auditor muss freier Zugang zu allen Betriebsstätten gewährt werden. Die Inspektion wird durch den Qualitätsmanager oder einen Beauftragten begleitet. Während der Inspektion werden folgende Anforderungsbereiche geprüft:

- Betriebliche Einrichtungen (Lager, Fahrzeuge, Siebanlagen, Trocknungseinrichtungen)
- Methoden zur Probenahme und Messmethoden der internen Qualitätssicherung
- Prüfpläne und Messergebnisse der Eigenüberwachung (Stichprobe)
- Wareneingangs- und Lieferdokumente (Stichprobe)
- Reinigungspläne (Stichprobe)
- Beschwerdemanagement
- Mitarbeiterqualifikation
- Rohstoffe, Zwischenprodukte und zertifizierte Produkte
- Verkaufsmenge zertifizierter Hackschnitzel

Darüber hinaus nimmt der Auditor repräsentative Proben der zur Auslieferung bestimmten zertifizierten Produkte mit einem Probevolumen von mind. 40 l und versiegelt diese. Der Zertifikatnehmer sendet die versiegelte Probe an das vom DEPI benannte Prüflabor.

Der Auditor erstellt einen Inspektionsbericht und sendet diesen mit Nachweisen an das DEPI. Das DEPI bewertet die Konformität der Inspektions- und Prüfberichte mit den Programmanforderungen. Bei Konformität erstellt das DEPI das Zertifikat und verfolgt die Umsetzung der Korrekturmaßnahmen zu Abweichungen Typ B (siehe Abschnitt 4.8).

4.7 Fernaudits

Für die Überwachungsprüfung ist ein Fernaudit durch einen vom DEPI beauftragten Auditor erforderlich. Das Fernaudit besteht aus der Prüfung vorab eingereichter Dokumente und einem Telefonat mit dem Qualitätsmanager oder dessen Beauftragten. Während des Fernaudits werden folgende Anforderungsbereiche geprüft:

- Veränderungen an betrieblichen Einrichtungen
- Veränderungen von Methoden zur Probenahme und Messung
- Prüfpläne und Messergebnisse der Eigenüberwachung (Stichprobe)
- Wareneingangs- und Lieferdokumente (Stichprobe)
- Reinigungspläne (Stichprobe)
- Beschwerdemanagement
- Mitarbeiterqualifikation
- Verkaufsmenge zertifizierter Hackschnitzel

Darüber hinaus nimmt der Zertifikatnehmer repräsentative Proben der zur Auslieferung bestimmten zertifizierten Produkte mit einem Volumen von mind. 40 l und sendet die Probe an das vom DEPI benannte Prüflabor.

Der Auditor fasst die Inspektionsergebnisse in einem Inspektionsbericht zusammen und sendet diesen mit Nachweisen an das DEPI. Das DEPI bewertet die Konformität der Inspektions- und Prüfberichte mit den Programmanforderungen. Wenn Abweichungen Typ A festgestellt werden, wird das Zertifikat für das betreffende Produkt ausgesetzt. Wenn Abweichungen Typ B festgestellt werden, verfolgt das DEPI die Umsetzung der Korrekturmaßnahmen.

4.8 Abweichungen von den Programmanforderungen

Bei der Bewertung der Abweichungen von den Anforderungen des Zertifizierungsprogramms wird unterschieden zwischen Abweichungen Typ A und Abweichungen Typ B.

Abweichungen Typ A sind Abweichungen von den Produktanforderungen aus Tabelle 5 und Tabelle 6 (Abschnitte 6.1 und 6.2). Wenn Abweichungen Typ A festgestellt werden, ist eine Zertifizierung des betreffenden Produkts erst möglich, wenn angemessene Korrekturmaßnahmen umgesetzt worden sind. Wenn Abweichungen Typ A in Überwachungsprüfungen festgestellt werden, wird das Zertifikat für das betroffene Produkt bis zur Umsetzung von geeigneten Korrekturmaßnahmen ausgesetzt. Das Produkt darf nicht weiter als zertifizierte Ware verkauft werden.

Abweichungen Typ B sind Abweichungen von den Anforderungen des Zertifizierungsprogramms, die nicht die Produkteigenschaften betreffen. Wenn Abweichungen Typ B festgestellt werden, ist die Weiterführung der Produktzertifikate möglich. Der Zertifikatnehmer muss geeignete Korrekturmaßnahmen einleiten und deren Wirksamkeit innerhalb der zwischen dem DEPI und dem Zertifikatnehmer vereinbarten Umsetzungsfrist nachweisen.

4.9 Widerspruchsverfahren

Antragsteller und zertifizierte Unternehmen können in folgenden Fällen einen schriftlichen Widerspruch an eine Widerspruchskommission richten:

- Bei Ablehnung der beantragten Zertifizierung
- Bei Aussetzung und Widerruf des Zertifikats

Der Widerspruch ist nur zulässig, wenn der Antragsteller oder Zertifikatnehmer nachweist, dass die angefochtene Entscheidung seine Rechte verletzt. Eine schriftliche Entscheidung des Widerspruchs wird innerhalb von zwei Wochen durch eine Widerspruchskommission getroffen, die aus drei vom DEPI unabhängigen Experten besteht. Die Begründung der Entscheidung wird dem widersprechenden Unternehmen offengelegt. Die Mitglieder der Widerspruchskommission werden auf der Internetseite www.enplus-hackschnitzel.de veröffentlicht.

4.10 Auditoren

Die Vor-Ort- und Ferninspektionen werden durch vom DEPI beauftragte Auditoren durchgeführt. Auditoren sollten für eine akkreditierte Inspektionsstellen nach DIN EN ISO 17020 vom Typ A oder eine akkreditierte Zertifizierungsstelle nach DIN EN ISO 17065 tätig sein und Ihre Fachkenntnis durch die Teilnahme an einer vom DEPI anerkannten Schulung für EN*plus*-Holzhackschnitzel nachweisen. Bei Nichterfüllung dieser Voraussetzung kann das DEPI eine Benennung als Auditor für EN*plus*-Hackschnitzel durch eine Einzelfallprüfung erlauben.

Auditoren für EN*plus*-Hackschnitzel müssen jährlich an einem vom DEPI organisierten Auditoren-Workshop teilnehmen.

4.11 Prüflabore

Das DEPI beauftragt ausschließlich akkreditierte Prüflabore mit der Prüfung der von den Zertifikatnehmern und Auditoren eingesendeten Proben. Die Prüflabore müssen nach ISO 17025 für die in ISO 17225-4 genannten Prüfstandards akkreditiert sein und einen Vertrag mit dem DEPI über die Analyse von Produktproben geschlossen haben.

4.12 Externe Überwachung des Zertifizierungssystems

Die Unabhängigkeit und Angemessenheit der Arbeit des DEPI im Rahmen des Zertifizierungsprogramms EN*plus*-Hackschnitzel wird regelmäßig durch eine externe, nach DIN EN ISO 17065 akkreditierte Zertifizierungsstelle geprüft und bestätigt.

4.13 Mitgeltende Dokumente

Die folgenden Dokumente und Vorlagen gelten in ihrer jeweils aktuellen Fassung:

- Entgeltordnung für EN*plus*-Hackschnitzel
- Antragsformular für EN*plus*-Hackschnitzel
- Produktmeldung für EN*plus*-Hackschnitzel
- Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel

5 Anforderungen an zertifizierte Unternehmen

5.1 Qualitätsmanager

Um die fortlaufende Konformität seiner Prozesse und zertifizierten Produkte sicherzustellen, benennt der Zertifikatnehmer einen Verantwortlichen für das Qualitätsmanagement.

Der Qualitätsmanager fungiert als Ansprechpartner für das DEPI und den Auditor. Er ist verantwortlich für das Qualitätssicherungssystem, die interne Dokumentation, die Mitarbeiterschulung und die Einhaltung der weiteren Anforderungen des Zertifizierungsprogramms. Der Qualitätsmanager kann Teilaufgaben anderen Mitarbeitern übertragen. Qualitätsmanager müssen mindestens im ersten Jahr ihrer Tätigkeit und einmal in jeder Zertifizierungsperiode an einer vom DEPI anerkannten externen Qualitätsschulung teilnehmen.

5.2 Mitarbeiterqualifikation

Alle Mitarbeiter im Geschäftsfeld Hackschnitzel müssen mindestens einmal jährlich vom Qualitätsmanager oder einem Beauftragten hinsichtlich der Umsetzung der EN*plus*-Anforderungen und der Hackschnitzelsachkunde geschult werden. Schulungen müssen mit Datum, Trainer, Teilnehmern und Schulungsthemen dokumentiert werden.

Mitarbeiter von Dienstleistern, z. B. Fahrer, die physischen Kontakt mit zertifizierten Hackschnitzeln haben, müssen vom zertifizierten Unternehmen in ihre Aufgaben eingewiesen werden. Dazu gehört auch die Bereitstellung von schriftlichen Verfahrensanweisungen.

5.3 Qualitätssicherung

Der Zertifikatnehmer verpflichtet sich, die folgenden Qualitätssicherungsmaßnahmen in allen für die Bereitstellung zertifizierter Produkte relevanten Produktions- und Aufbereitungsprozessen sicherzustellen – unabhängig davon, ob sie im eigenen Unternehmen, bei Dienstleistern oder Lieferanten angesiedelt sind:

- **Angemessene Betriebseinrichtungen.** Das Unternehmen muss über angemessene Einrichtungen zur Produktion, Aufbereitung, Lagerung und Verladung hochwertiger Holzhackschnitzel verfügen. Deren Funktion und Zustand, Manipulationsflächen und Fördereinrichtungen müssen nach einem Reinigungs- und Wartungsplan regelmäßig auf Verschmutzungen und Funktion kontrolliert sowie ggf. gereinigt werden.
- **Überwachung von Rohstoffen und Vorprodukten.** Rohstoffe und Vorprodukte müssen aus naturbelassenem Holz bestehen- Sie müssen auf Verunreinigung und Qualität geprüft sowie angemessen gelagert werden. Verunreinigungen wie z. B. Erde, Steine und Getreide müssen dokumentiert und ggf. ausgeschlossen werden. Bei aufbereiteten, bereits klassifizierten Vorprodukten ist die Klassifizierung zu prüfen, z. B. die Angaben zu Wassergehalt und Partikelgrößenklasse.
- **Angemessener Transport.** Für den Transport von Rohstoffen, Vorprodukten und Produkten dürfen nur geeignete Fahrzeuge eingesetzt werden, die frei von Störstoffen sind. Vorfracht und Reinigungszustand der Fahrzeuge müssen dokumentiert werden.
- **Angemessene Lagerung.** Die Lagerung von gehackten Rohstoffen, Vorprodukten und zertifizierten Produkten muss auf einer befestigten Oberfläche erfolgen, so dass der Eintrag von Erde, Sand und Steinen ausgeschlossen ist.

- **Umgang mit nichtkonformen Produkten.** Nichtkonforme Holzhackschnitzel dürfen nicht als zertifizierte Produkte ausgeliefert werden. Sie müssen entsprechend gekennzeichnet und separat gelagert werden. Der Verbleib muss dokumentiert werden.
- **Aufbereitungsprozesse.** Aufbereitungsprozesse (Hacken, Trocknen, Sieben) müssen angemessen sein und regelmäßig überprüft werden. Sofern die Endprodukte eindeutig spezifischen Aufbereitungsprozessen zugeordnet werden können, kann die Prüfung der Produkte an der letzten Lagerstelle vor der Auslieferung hierzu herangezogen werden.

  Bei Mietentrocknung und der Mischung von Hackschnitzel unterschiedlicher Wassergehaltsklassen sollte der Unterschied im Wassergehalt zwischen zwei verschiedenen Probenahmestellen geringer als 10 Prozentpunkte sein. Bei größeren Unterschieden ist eine Homogenisierung der Charge durch Umsetzen und Mischen erforderlich.
- **Zertifizierte Produkte.** Die Produkteigenschaften zertifizierter Hackschnitzel müssen vor der Auslieferung entsprechend Tabelle 2 geprüft werden. Partikelgröße, Feinanteil und maximale Länge können nach der letzten Aufbereitung oder am letzten Lagerort geprüft werden. Der Wassergehalt muss am letzten Lagerort oder für eine Probe aus dem Lieferfahrzeug geprüft werden. Der Wassergehalt muss mindestens an jedem Auslieferungstag bestimmt werden.
- **Eigenüberwachung.** Aufbereitungsprozesse und Produkteigenschaften müssen nach Prüfplänen durch Messungen an einer repräsentativen Probe erfolgen (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Dabei ist die Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel zu beachten oder eine gleichwertige Methode anzuwenden. Die Angemessenheit anderer Methoden zur Probenahme und der Messmethoden für die Eigenüberwachung muss im Rahmen der Konformitätsbewertung bestätigt werden. Probenahme, Messmethode und Ergebnisse müssen dokumentiert werden. Das Prüfintervall darf 250 Tonnen Hackschnitzel nicht überschreiten.

Tabelle 2: Anforderungen an die Eigenüberwachung

Prozess	Probenahme	Produkteigenschaft
Hacken	Prozessausgang oder vor der Auslieferung	Partikelgröße, Feinanteil ,maximale Länge
Sieben		Partikelgröße, Feinanteil, maximale Länge
Technische Trocknung		Wassergehalt
Mietentrocknung, Mischung	Miete, Schüttung	Wassergehalt, Wassergehaltshomogenität
Zertifiziertes Produkt	Letzter Lagerort	Wassergehalt, Partikelgröße [a)], Feinanteil [a)], maximale Länge [a)]

[a)] Entfällt, falls eine Bestimmung am Siebprodukt am gleichen Standort stattgefunden hat.

Tabelle 3: Empfohlene Messmethoden für die Eigenüberwachung

Produkteigenschaft	Empfohlene Messmethode
Partikelgröße, Feinanteil	Siebanalyse
Maximale Länge	Auszählen einer 10 l Probe
Wassergehalt	Trockenschrank
Wassergehaltshomogenität	Kapazitive Wassergehaltsbestimmung

5.4 Hackschnitzellieferung

Bei der Beladung des Lieferfahrzeugs muss sichergestellt werden, dass keine Kontamination der Hackschnitzel durch Rückstände aus Vorfrachten stattfinden kann. Eine Wasseraufnahme der Hackschnitzel während des Transports durch Regen muss ebenfalls ausgeschlossen werden.

Jede Lieferung von zertifizierten Hackschnitzeln muss entsprechend der Vorgaben aus Abschnitt 6.3 dokumentiert werden. Zertifizierte Unternehmen müssen ihren Kunden eine Abrechnung der Lieferung nach massebezogener Liefermenge einer vorher vereinbarten Wassergehaltsklasse oder mit Angabe des durchschnittlichen Wassergehalts der gelieferten Charge anbieten. Aus der Liefermenge und dem Wassergehalt ist die gelieferte Brennstoffenergie rechnerisch zu bestimmen. Dazu ist ein atro-Heizwert von 5,0 kWh/kg_{atro} einheitlich für alle Holzarten oder der gemessene atro-Heizwert aus der Laboranalyse des zertifizierten Produkts anzusetzen, sofern die Holzartenzusammensetzung des Rohstoffs unverändert ist. Andere vertraglich vereinbarte Abrechnungsmethoden (z. B. nach Schüttraummetern oder nach atro-Tonnen) sind zulässig.

Tabelle 4: Heizwert von Hackschnitzeln nach Wassergehaltsklasse und Holzart

Wassergehaltsklasse	Wassergehalt in m-%	Heizwert H_u in KWh/kg [a)]
atro	0	5,00
M10	≤ 10	4,43
M15	> 10 bis ≤ 15	4,29
M20	> 15 bis ≤ 20	4,01
M25	> 20 bis ≤ 25	3,72
M30	> 25 bis ≤ 30	3,44
M35	> 30 bis ≤ 35	3,15
M40	> 35 bis ≤ 40	2,87
M45	> 40 bis ≤ 45	2,59
M50	> 45 bis ≤ 50	2,30
M55	> 50 bis ≤ 55	2,02

[a)] Die Berechnung des Heizwerts erfolgt mit Ausnahme der Klasse M10 für den mittleren Wassergehalt der jeweiligen Klasse.

Bei einer Abrechnung nach massebezogener Liefermenge müssen die Wassergehaltsklasse, der dazugehörige Heizwert nach Tabelle 4 und ggf. der gemessene Wassergehalt der Hackschnitzellieferung auf dem Lieferdokument (siehe Abschnitt 6.3) dokumentiert werden. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgt für eine bei der Be- oder Entladung des Lieferfahrzeugs nach der Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel genommenen, homogenisierten Mischprobe.

5.5 Umgang mit Beschwerden

Um eine konsistente Bearbeitung von Kundenbeschwerden zu erreichen, benennt der Zertifikatnehmer einen Verantwortlichen für das Beschwerdemanagement. Beschwerde- und Qualitätsmanager dürfen die gleiche Person sein.

Der Beschwerdemanager fungiert als Ansprechpartner für Kunden im Falle von Beschwerden. Er ist verpflichtet, jede Kundenbeschwerde aufzunehmen, zu bearbeiten, zu dokumentieren und den Beschwerdeführer über den Umgang mit der Beschwerde zu informieren. Beschwerden müssen tabellarisch erfasst werden. Der Beschwerdemanager muss unter Einbeziehung der Entscheidungsträger eine regelmäßige (mindestens jährliche) Auswertung der Beschwerden vornehmen um Korrektur- und Vorbeugemaßnahmen abzuleiten. Der Beschwerdemanager kann Teilaufgaben delegieren.

Reklamationen sind immer anzuerkennen, wenn die gelieferte Ware nicht konform mit den Handbuchanforderungen ist.

5.6 Dokumentation

Zertifizierte Unternehmen sind verpflichtet, die folgenden Dokumente und Aufzeichnungen anzufertigen und mindestens drei Jahre aufzubewahren:

- Wareneingangsdokumentation (Lieferschein, Lieferantenerklärung zur Naturbelassenheit des Holzes, ggf. Nachhaltigkeitszertifikate, Wareneingangsprüfungen)
- Lieferdokumentation
- Reinigungspläne
- Prüfpläne, Probenahme- und Messprotokolle
- Beschwerdedokumentation und -auswertung
- Schulungsdokumentation
- Lieferanten- und Dienstleisterbeziehungen
- Verbleib von Minderqualitäten

6 Anforderungen an zertifizierte Produkte

6.1 Rohmaterialien

Zertifizierte Holzhackschnitzel müssen den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-4 und den Bestimmungen dieses Handbuchs an die Herkunft der Rohmaterialien entsprechen. Tabelle 5 zeigt die Anforderungen an Rohmaterialien für Holzhackschnitzel in den jeweiligen Qualitätsklassen. Die Definition der Rohmaterialklasse ist DIN EN ISO 17225-1 zu entnehmen.

Tabelle 5: Zulässige Rohmaterialien für EN*plus*-zertifizierte Holzhackschnitzel nach Qualitätsklasse

EN*plus* A1 und EN*plus* A2	EN*plus* B
1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln [a)] 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.2.1 chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz, sowie anderes naturbelassenes Holz[a), b)] 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände

a) Mit Ausnahme von Klasse 1.1.1.3 Kurzumtriebs-Plantagenholz, wenn Grund zu der Vermutung besteht, dass eine Kontamination des Bodens vorliegt, die Anpflanzung der Speicherung von Chemikalien gedient hat oder wenn die wachsenden Bäume mit Klärschlamm (aus der Abwasseraufbereitung oder chemischen Prozessen) gedüngt wurden.
b) Mit Ausnahme der Klassen 1.1.5 Stümpfe/Wurzeln und 1.1.6 Rinde.

6.2 Zertifizierte Produkte

Zertifizierte Holzhackschnitzel werden durch die Qualitätsklasse und die Partikelgröße definiert. Sie müssen den in Tabelle 6 aufgeführten Anforderungen entsprechen. Dabei gelten die in der Produktnorm DIN EN ISO 17225-4 genannten Prüfmethoden.

Tabelle 6: Anforderungen der EN*plus*-Zertifizierung an die Hackschnitzeleigenschaften

Eigenschaft	Einheit	EN*plus* A1	EN*plus* A2	EN*plus* B
Wassergehalt [a)]	m-%	≥ 8 bis ≤ 25	≤ 35	ist anzugeben
Aschegehalt [b)]	m-%	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Heizwert [a)]	kWh/kg	Ist anzugeben		
Partikelgröße [c)]		P31S oder P45S		
Grobanteil [d)]	m-%	≤ 6 in P31S (> 45 mm) und ≤ 10 in P45S (> 63 mm)		
Feinanteil (< 3,15 mm)	m-%	≤ 5	≤ 8	≤ 10
Maximale Länge [e)]	mm	120 (für P31S) 150 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)

[a)] Anlieferungszustand [b)] Wasserfreier Zustand [c)] Hauptanteil ≥ 60 %, in P31S: 3,15 - 31,5 mm, in P45S: 3,15 - 45 mm [d)] Maximaler Querschnitt in P31S: 4 cm^2, in P45S: 6 cm^2 [e)] In einer Probe von 10 l dürfen höchstens 2 Stücke mit einer Querschnittsfläche < 0,5 cm^2 sein

Die Qualitätsklassen der EN*plus*-Zertifizierung unterscheiden sich von denen der Produktnorm in den folgenden Punkten:

- Die Klasse EN*plus* A1 verschärft im Vergleich zur korrespondierenden Normklasse A1 die Grenzwerte für den Feinanteil und die maximale Länge in den Größenklassen P31S und P45S. Für den Wassergehalt wird ein unterer Grenzwert von 8 % festgelegt.

- Die Klasse EN*plus* A2 verschärft im Vergleich zur korrespondierenden Normklasse A2 den Grenzwert für den Feinanteil.
- Die Klasse EN*plus* B korrespondiert mit den Anforderungen der Normklasse B1. Die Nutzung von Gebrauchtholz für zertifizierte Hackschnitzel ist ausgeschlossen.
- Für die maximale Länge eines zertifizierten Produkts kann ein geringerer Grenzwert festgelegt werden. In diesem Fall muss die maximale Länge in der Produktmeldung angegeben und durch die Laborprüfung nachgewiesen werden.

Für jede Qualitäts- und Partikelgrößenklasse ist im Rahmen der jährlichen Inspektion eine Probe von mindestens 40 l an ein vom DEPI benanntes Prüflabor zu senden. Die Erfüllung der folgenden Anforderungen aus Tabelle 6 muss durch den Prüfbericht bestätigt werden:

- Wassergehalt
- Aschegehalt
- Partikelgröße
- Feinanteil
- Maximale Länge

6.3 Lieferdokumentation

Jede Lieferung von zertifizierten Hackschnitzeln muss auf einem Lieferdokument ausgewiesen werden. Das Lieferdokument muss mindestens folgende Informationen umfassen:

- Name, Kontaktdaten und EN*plus*-ID des Zertifikatnehmers
- Produkt-ID oder Qualitätszeichen (siehe Abschnitt 7.3) des zertifizierten Produkts
- Maximale Länge der Hackschnitzel
- Liefermenge in kg (bei massebezogener Abrechnung)
- Wassergehaltsklasse
- Vermerk, ob eine Messung des Wassergehalts nach Abschnitt 5.4 für die Liefercharge durchgeführt wird, ggf. Probennummer. Der gemessene Wassergehalt wird nachträglich ergänzt.
- Heizwert in kWh/kg (nach Tabelle 4 oder aus Prüfbericht)
- Ggf. Liefermenge in kg_{atro} (bei Abrechnung nach atro-Tonnen)
- Ggf. Liefermenge in Schüttraummetern (nur bei volumenbezogener Abrechnung)
- Kennzeichen des Lieferfahrzeugs
- Art der Anlieferung (geschüttet, eingeblasen, Wechselcontainer)
- Datum und Unterschriften des Fahrers und des Kunden

Wenn weitere produktbezogene Angaben wie zur Naturbelassenheit des Holzes, zur Art des Rohstoffs, zur Art der Aufbereitung oder weiterer Produkteigenschaften gemacht werden, müssen diese zutreffend sein.

7 Zertifikat und Zeichennutzung

7.1 Gültigkeit des Zertifikats

Das EN*plus*-Zertifikat wird für eine Zertifizierungsperiode von drei Jahren ausgestellt. Die Zertifizierungsperiode beginnt mit dem Ausstellungsdatum des Zertifikats. Das Zertifikat kann im Gültigkeitszeitraum widerrufen werden, wenn das zertifizierte Unternehmen von den Anforderungen an zertifizierte Unternehmen und Produkte abweicht und keine wirksamen Korrekturmaßnahmen vollzieht. Die letzte Konformitätsbewertung in der laufenden Zertifizierungsperiode dient der Rezertifizierung. Bei positivem Konformitätsbescheid wird ein Folgezertifikat mit dreijähriger Laufzeit erstellt.

Bei einem Zertifikatswiderruf wird die EN*plus*-ID des Zertifikatnehmers auf einer Negativliste eingetragen und nicht erneut an ein zertifiziertes Unternehmen vergeben. Der frühere Zertifikatnehmer kann nach Ablauf eines Jahres einen neuen Antrag auf Zertifizierung stellen. Nach positiver Bescheidung seines Antrags wird ihm eine neue EN*plus*-ID zugewiesen.

7.2 Zertifizierungszeichen

Das Zertifizierungszeichen für EN*plus*-Hackschnitzel setzt sich aus dem markenrechtlich geschützten Logo „EN*plus*-Hackschnitzel“ und der EN*plus*-ID des Zertifikatnehmers zusammen. Die EN*plus*-ID besteht aus den Buchstaben HS für Holzhackschnitzel, einem Länderkürzel für den Unternehmenssitz des Zertifikatnehmers und einer dreistelligen, für jedes Land fortlaufend vergebenen Identifikationsnummer.

HS-DE-000

Abbildung 1 : Zertifizierungszeichen des Zertifikatnehmers mit der beispielhaften EN*plus*-ID HS-DE-000.

In Tabelle 7 sind die Farbcodes für die grafischen Elemente aufgeführt. Drucksachen sollten in CMYK-Farben erstellt werden, alternativ kann Orange als HKS 8 gedruckt werden.

Tabelle 7: Farbcodes für die Farben der verschiedenen Identifikationszeichen

	Orange	Grau	Schwarz
RGB	R = 225, G = 93, B = 0	R = 134, G = 129, B = 117	R = 24, G = 23, B = 21
CMYK	C = 0, M = 65, Y = 100, K = 0	C = 0, M = 5, Y = 20, K = 60	C = 0, M = 0, Y = 0, K = 100
Pantone	1505	424	Black
HKS	HKS 7 (HKS 8 bei Druck)	HKS 96	HKS 88

7.3 Qualitätszeichen

Für jedes zertifizierte Produkt wird ein individuelles Qualitätszeichen (Abbildung 2) vergeben. Das Qualitätszeichen besteht aus dem markenrechtlich geschützten Logo „EN*plus*-Hackschnitzel“, einem Logo für die Qualitätsklasse sowie der Produkt-ID des zertifizierten Produkts. Die Produkt-ID setzt sich zusammen aus der EN*plus*-ID des Zertifikatnehmers sowie der Partikelgrößen- und Qualitätsklasse des zertifizierten Produkts.

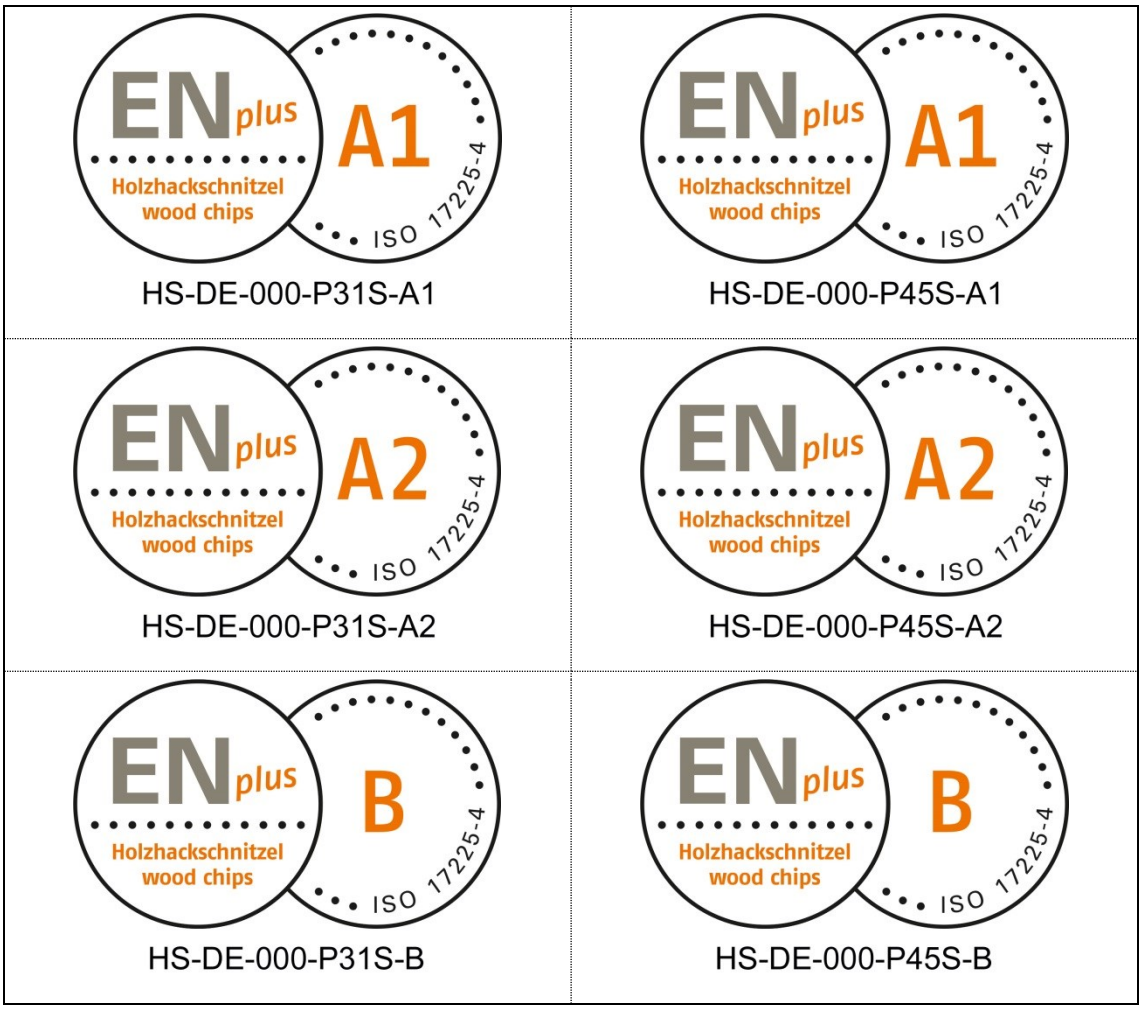


Abbildung 2: Qualitätszeichen des Zertifikatnehmers HS-DE-000 für Hackschnitzel in allen zertifizierungsfähigen Qualitäts- und Partikelgrößenklassen.

7.4 Nutzung von Zertifizierungs- und Qualitätszeichen

Das DEPI stellt dem Zertifikatnehmer ein individuelles Zertifizierungszeichen und für jedes zertifizierte Produkt ein individuelles Qualitätszeichen zur Verfügung.

Das Zertifizierungszeichen darf durch den Zertifikatnehmer in unveränderter Form zu Marketingzwecken in Drucksachen, auf Geschäftspapieren und in elektronischer Form (z. B. auf der Internetseite) genutzt werden. Die Darstellung darf nur in den Originalfarben (Tabelle 7), Schwarz-weiß oder monochrom erfolgen. Wenn der Zertifikatnehmer auch nichtzertifizierte Holzhackschnitzel anbietet, muss sichergestellt sein, dass das Zertifizierungszeichen ausschließlich mit der zertifizierten Ware in Verbindung gebracht wird.

Das Qualitätszeichen darf zur Kennzeichnung und Bewerbung der zertifizierten Produkte genutzt werden und ist Bestandteil der Produktdeklaration. Der Zertifikatnehmer darf Wiederverkäufern und Vermittlern seiner zertifizierten Produkte die Nutzung des Qualitätszeichens auf Angeboten, in Anzeigen und im Internet erlauben.

Eine Nutzung des markenrechtlich geschützten Logos „EN*plus*-Hackschnitzel“ ohne Identifikationsnummer bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des DEPI.

7.5 Entgeltordnung

Die Entgeltordnung umfasst die Leistungen des DEPI und der vom DEPI beauftragten Auditoren und Prüflabore. Das Entgelt setzt sich zusammen aus

- einer jährlichen Zertifizierungspauschale, die die Kosten der Inspektion und Konformitätsbewertung deckt,
- einer jährlichen Prüfpauschale pro zertifiziertem Produkt, die die Kosten der Laborprüfung deckt,
- der Lizenzgebühr für die Verkaufsmenge zertifizierter Hackschnitzel.

Die Zertifizierungs- und Prüfpauschalen sind jährlich nach Abschluss der Konformitätsbewertung zu entrichten. Die Lizenzgebühren sind j für die prognostizierte Jahresmenge an zertifizierten Produkten im Voraus zu entrichten und werden im Folgejahr entsprechend der tatsächlichen Verkaufsmenge nachberechnet bzw. vergütet.

Die Höhe der Pauschalen und Lizenzgebühren ist der „Entgeltordnung EN*plus*-Hackschnitzel“ in der jeweils gültigen Fassung zu entnehmen, die auf den Internetseiten von EN*plus*-Hackschnitzel unter www.enplus-hackschnitzel.de heruntergeladen werden kann.

Anlage 2

EN*plus*-Hackschnitzel

Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel

Version 1.0 vom 31.10.2016

Herausgeber: **Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)**
Neustädtische Kirchstraße 8
10117 Berlin

Tel.: 030 6881599-55
Fax: 030 6881599-77
E-Mail: info@depi.de

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

Einführung 2
1 Begriffsdefinitionen 3
2 Vorbereitung 4
2.1 Erstellen eines Prüfplans 4
2.2 Führen eines Prüfbuchs 4
3 Probenahme aus ruhendem Gut 5
3.1 Ausrüstung 5
3.2 Gewinnung der Einzelproben 5
Anzahl und Volumen der Einzelproben 5
Freilegen eines Profils 5
Festlegen der Probenahmepunkte 5
Entnahme der Einzelproben 5
Sammeln der Gesamtprobe 5
4 Probenahme aus fallendem Gut 6
4.1 Ausrüstung 6
4.2 Gewinnung der Einzelproben 6
Anzahl und Volumen der einzelproben Proben 6
Probenahme 6
Entnahme der Einzelproben 6
5 Probenaufbereitung 7
5.1 Homogenisieren der Gesamtprobe 7
5.2 Festlegung der für die Analysenprobe benötigten Menge 7
5.3 Teilen der Gesamtprobe 7
5.1 Probentransport 7

Einführung

Die regelmäßige Prüfung der Produkteigenschaften ist eine entscheidende Grundlage für die verlässliche Lieferung qualitätsgesicherter Hackschnitzel. Im Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln werden deshalb Mindestanforderungen an die Überwachung von Aufbereitungsprozessen und die zertifizierten Hackschnitzel gestellt.

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen und eine sichere Einhaltung der Produktstandards zu gewährleisten, muss die Prüfung der Produkteigenschaften an einer Probe durchgeführt werden, die für die untersuchte Charge repräsentativ ist. Dazu wird eine angemessene Zahl gleichmäßig verteilter Einzelproben entnommen und homogenisiert. Anschließend wird die Gesamtprobe geteilt, um die für die Laborprobe benötigte Menge zu erzielen.

Aus diesem Grund hat das Deutsche Pelletinstitut (DEPI) in Zusammenarbeit mit dem Technologie- und Förderzentrum Straubing (TFZ) im Rahmen des Förderprojekts „HackZert“ die vorliegende „Anleitung zur Probenahme für EN*plus*-Hackschnitzel“ erstellt. Die Anleitung beschreibt die Verwendung geeigneter Materialien und die praxisnahe Vorgehensweise zur Probenahme und -aufbereitung, die den Anforderungen an die Qualitätssicherung eines zertifizierten Unternehmens gerecht werden.

Die Anleitung zur Probenahme beschreibt zwei Arten der Probenahme:

- Probenahme aus ruhendem Gut
- Probenahme aus fallendem Gut

Die Probenahme aus fallendem Gut ist der Probenahme aus ruhendem Gut vorzuziehen, weil sie repräsentativer und einfacher durchzuführen ist. Beispielsweise sollten Container und Fahrzeuge bei der Be- oder Entladung aus dem fallenden Gut beprobt werden.

Die Probenahme und die Probenaufbereitung sollten durch eingewiesenes und qualifiziertes Personal erfolgen. Im Vorfeld ist ein Prüfplan zu erstellen, in dem die Anzahl und Größe der Einzelprobe, die Entnahmepunkte (ruhendes Gut) bzw. die Entnahmefrequenz (bewegtes Gut) und die benötigte Probenmenge festgelegt werden. Zur Gewinnung der Analyseprobe werden die Einzelproben gesammelt, homogenisiert und wieder geteilt.

1 Begriffsdefinitionen

Prüfplan: Der Prüfplan beschreibt alle durchzuführenden Prüfungen in der Eigenüberwachung der Aufbereitungsprozesse und der zertifizierten Produkte. Es wird durch Verfahrensanweisungen für die Probenahme und die einzelnen Prüfungen ergänzt.

Prüfbuch: Im Prüfbuch werden die durchgeführten Prüfungen dokumentiert, einschließlich Probenahme und Messergebnis. Das Prüfbuch kann auch als elektronische Tabelle geführt werden.

Einzelprobe: Eine Einzelprobe ist die Menge an Hackschnitzeln, die an einer Probenahmestelle entnommen wird.

Gesamtprobe: Eine Gesamtprobe ist die homogenisierte Mischung aller genommen Einzelproben. Sie repräsentiert die zu beprobende Charge.

Analyseprobe: Die Analyseprobe ist die Menge an Hackschnitzeln, die für die vorgesehene(n) Analyse(n) benötigt wird. Sie wird durch Probenteilung der Gesamtprobe gewonnen.

Probensammler: Als Probensammler eignet sich ein Gefäß aus Kunststoff oder Metall (bspw. ein Eimer). Die Öffnung des Probensammlers muss mindestens 200 mm betragen und er muss ein Volumen von mindestens 2,5 Liter haben.

Probensammler mit Stiel: Für die Beprobung aus fallendem Gut sollte ein runder Probensammler mit einem Stiel (bspw. Schöpfeimer, Gülleeimer) verwendet werden. Er sollte ein Volumen von mindestens 2,5 Liter und einen Öffnungsdurchmesser von mindestens 20 cm haben.

Probentonne: Als Probentonne wird ein großes verschließbares, zylindrisches Gefäß genutzt (bspw. eine Futtertonne). Das Volumen sollte mindestens ein Drittel größer sein als das Volumen der Gesamtprobe, bspw. 40 Liter beim Einsatz von einem 2,5 Liter Probensammler.

Probenteiler: Zum Teilen der Gesamtprobe wird ein Schieber benötigt. Als Schieber eignet sich z. B. ein Schneeschieber oder eine Schaufel.

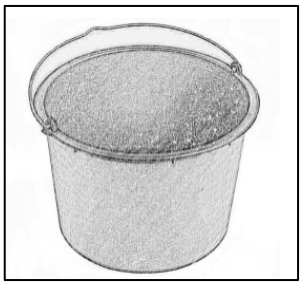


Abb. 1: Probensammler

Abb. 2: Probensammler mit Stiel

Abb. 3: Probentonne

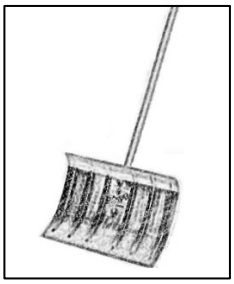


Abb. 4: Probenteiler

2 Vorbereitung

2.1 Erstellen eines Prüfplans

Der Prüfplan beschreibt alle wiederkehrenden Probenahmen und Prüfungen zur Eigenüberwachung von Aufbereitungsprozessen und der zertifizierten Produkte. Im Prüfplan werden mindestens die folgenden Punkte festgelegt:

- Gegenstand der Prüfung (Überwachung eines Aufbereitungsprozesses oder Produktes)
- Intervall und Zeitpunkt der Prüfung
- Ort und Art der Probenahme
- Anzahl und Größe der Einzelproben
- Größe der Analyseprobe
- Prüfparameter und -methode (Aschegehalt, Wassergehalt, Partikelgröße, Feinanteil, maximale Länge)
- Zuständigkeit für die Probenahme und Durchführung der Analysen

2.2 Führen eines Prüfbuchs

Um eine Übersicht über die Leistung der Aufbereitungsprozesse und die Produkteigenschaften zu gewinnen, sollten die Ergebnisse der Prüfungen tabellarisch in einem Prüfbuch erfasst und regelmäßig ausgewertet werden. Das Prüfbuch sollte elektronisch mit einer Tabellenkalkulation geführt werden, um einfache Auswertungen zu ermöglichen. In das Prüfbuch sollten neben den Messergebnissen auch Korrektur- und Verbesserungsmaßnahmen erfasst werden. Es sind mindestens die folgenden Informationen aufzunehmen:

- Datum und Uhrzeit der Probenahme
- Durchführender Mitarbeiter
- Ort der Probenahme
- Prüfergebnisse
- Bewertung der Ergebnisse
- Korrekturmaßnahmen
- Bemerkung

3 Probenahme aus ruhendem Gut

3.1 Ausrüstung

- Radlader oder ähnliches zur Freilegung eines Profils
- Probensammler, Probentonne, Probenteiler
- Geeignetes Gefäß für Analyseproben

3.2 Gewinnung der Einzelproben

Anzahl und Volumen der Einzelproben

Für die Probenahme aus ruhendem Gut (Miete, Haufen, Lagerhalle) werden neun Einzelproben von mindestens 2,5 Liter genommen.

Freilegen eines Profils

In der zu beprobenden Miete oder Halle ist zunächst ein Profil freizulegen. Das Freilegen geschieht i. d. R. mit Hilfe eines Radladers. Das Profil ist so freizulegen, dass die gesamte Höhe und Breite der Miete bzw. des Haufens beprobt werden kann.

Festlegen der Probenahmepunkte

Zur Festlegung der Probenahmepunkte wird das Profil in drei horizontale Schichten gleicher Höhe geteilt:

- In einer frei liegenden Schüttung (Miete) werden in der unteren Schicht vier, in der mittleren Schicht drei und in der oberen Schicht zwei gleichmäßig über die Breite verteilte Proben entnommen.
- Bei Lagerung mit seitlicher Begrenzung (Halle, Fahrsilo) werden aus jeder Schicht drei Proben genommen, die horizontal unterschiedlich verteilt sein sollten.

Entnahme der Einzelproben

Der Probensammler wird direkt an das Profil gehalten und die Hackschnitzel mit der Hand von oben hinein geschoben. Dabei muss sichergestellt werden, dass alle Hackschnitzel direkt in das Gefäß fallen und es zu keiner Entmischung kommt.

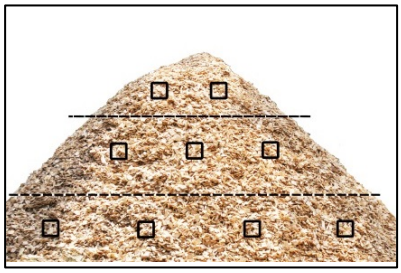


Abb. 5: Probenahmepunkte bei einer Miete

Abb. 6: Probenahmepunkte bei einer Hallenmiete

Abb. 7: Entnahme Einzelproben

Sammeln der Gesamtprobe

Die Einzelproben werden in der Probentonne gesammelt. Nur zur Bestimmung der Homogenität im Haufen werden die Einzelproben in separaten Analysebehältnissen, bspw. in Aluschalen, gesammelt, um den Wassergehalt mit der Darr-Methode bestimmen zu können.

4 Probenahme aus fallendem Gut

4.1 Ausrüstung

- Probensammler mit Stiel, Probentonne, Probenteiler
- geeignetes Gefäß für Analyseproben

4.2 Gewinnung der Einzelproben

Anzahl und Volumen der Einzelproben

Für jede Charge mit einer Gesamtmasse von bis zu 30 Tonnen werden mindestens fünf Einzelproben von mindestens 2,5 Liter genommen.

Probenahme

Die Probenahme erfolgt gleichmäßig verteilt aus dem fallenden Gut. Mögliche Probenahmeorte sind:

- der Auslass eines Siebs oder Förderbands
- das frei fallende Gut beim Abkippen einer Radladerschaufel, eine Containers oder eines Fahrzeugs.
- das frei fallende Gut beim Befüllen eines Auslieferfahrzeugs am letzten Punkt der Verladung (fallende Hackschnitzel aus der Radladerschaufel, vom Förderband, Siebauslass oder ähnliches).

Erfolgt die Probenahme bei der Be- oder Entladung eines Lieferfahrzeugs, müssen die einzelnen Proben über die gesamte Dauer des Vorgangs verteilt genommen werden. Eine Probenahme während der Lieferung sollte im Beisein des Kunden erfolgen.

Anmerkung: Bei Containerlieferungen, bei denen die Hackschnitzel im Container verbleiben, sind die Proben beim Beladen zu nehmen, da im Container keine repräsentative Probenahme erfolgen kann.

Abb. 8: Porbenahme mit einem Probensammler mit Stiel beim Abkippen einer Radladerschaufel

Entnahme der Einzelproben

Der Probensammler mit Stil wird in den Gutstrom gehalten bis er gefüllt ist. Anschließend wird er aus dem Gutstrom entnommen und in die Probentonne entleert.

5 Probenaufbereitung

5.1 Homogenisieren der Gesamtprobe

Zum Homogenisieren der Gesamtprobe wird die Probentonne mit einem Deckel fest verschlossen, anschließend flach auf den Boden gelegt und dann in Schrittgeschwindigkeit um mindestens zehn komplette Drehungen dreht.

5.2 Festlegung der für die Analysenprobe benötigten Menge

Um das erforderliche Gesamtvolumen der Analysenprobe zu erhalten bzw. mehrere gleichartige Proben herzustellen, muss die homogenisierte Probe geteilt werden. Die Probengröße der Analysenprobe hängt davon ab, welche Brennstoffparameter bestimmt werden sollen:

Wassergehalt:	ca. 2,5 l für Darr-Methode, bei Humimetern nach Handbuch
Partikelgröße:	ca. 8 l für Handsiebung mit zwei Durchgängen
Feinanteil:	ca. 8 l für Handsiebung mit zwei Durchgängen
Überlängen:	10 l (Auszählung)
Vollanalyse:	40 l (Versand in externes Labor)

5.3 Teilen der Gesamtprobe

Die homogenisierte Gesamtprobe wird aus der Tonne auf einem sauberen und ebenen Untergrund zu einem Kegel aufgeschüttet. Danach wird der Kegel abgeflacht.

Anschließend wird der Kegel mit einem Probenteiler (Schaufel, Schieber) in vier gleichgroße Teile geteilt und auseinandergezogen.

Danach wird ein Viertel des Kegels entnommen und der Rest verworfen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die gewünschte Größe der Analysenprobe als Halb- oder Viertelprobe erreicht ist.

Abb. 9: Homogenisierte Gesamtprobe

Abb. 10: Vierteilung der Gesamtprobe

Abb. 11: Entnahme der Analysenprobe als Viertelprobe

5.1 Probentransport

Hackschnitzel passen Ihren Wassergehalt an die Umgebung an. Deshalb sollten sie möglichst kurz ungeschützt aufbewahrt werden. Wenn die Probe an ein externes Labor verschickt wird, muss sie so verpackt werden, dass sich die Produkteigenschaften während des Transports nicht verändern. Dies stellt man sicher, indem die Laborprobe luftdicht in einen stabilen Plastiksack verpackt wird. Für den Transport zum Labor muss der Sack mit einer Umverpackung aus geeignetem Material (Karton) versehen werden.

Anlage 3

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel

Detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2

Autoren

Dr. Daniel Kuptz
Theresa Mendel
Robert Mack
Claudia Schön
Dr. Hans Hartmann

Förderkennzeichen 22030314

Straubing, 31. März 2017

Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel – Teilvorhaben 2 – detaillierter Schlussbericht

Projektleiter: Dr. Hans Hartmann

Autoren: Dr. Daniel Kuptz, Theresa Mendel, Robert Mack, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann

Mitarbeiter: Albert Maierhofer, Elisabeth Rist, Benedikt Haas, Stephan Winter, Alexander Marks, Andreas Überreiter, Alexander Pfaudler

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22030314 gefördert. Mittelvergabe erfolgte über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Die Projektlaufzeit ging vom 01.02.2015 bis 30.09.2016. 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.

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: Dr. Daniel Kuptz, Theresa Mendel, Robert Mack, Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2017
Gestaltung: Mendel, Mack, Schön, Kuptz

Fotonachweis: Mendel, Mack, Rist, Schön

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 11

1 Einleitung 13

2 Zielsetzung und Aufbau der Studie 15

3 Manuelle Schnellbestimmung des Wassergehalts von Hackschnitzeln 17

3.1 Hintergrund der Vergleichsmessungen 17

3.1.1 Qualitätsparameter von Hackschnitzeln 17
3.1.2 Wassergehalt von Holzhackschnitzeln 19
3.1.3 Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts 20
3.1.3.1 Thermogravimetrische Verfahren 20
3.1.3.2 Elektrische Verfahren 22
3.1.3.3 Weitere Verfahren 22

3.2 Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit manuellen Messgeräten 22

3.2.1 Auswahl der verwendeten Messgeräte 23
3.2.1.1 Standmessgeräte 23
3.2.1.2 Einstechlanzen 26
3.2.2 Versuchsdurchführung 30
3.2.3 Ergebnisse und Diskussion 34
3.2.3.1 Ergebnisse und Beurteilung der manuellen Messgeräte 35
3.2.3.2 Einfluss des Wassergehalts auf die Messgenauigkeit 45
3.2.3.3 Einfluss des Hackschnitzelsortiments auf die Messgenauigkeit 48

3.3 Exkurs: Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit dem Wöhler HF550 Holzfeuchtemessgerät / FW550 Feuchtewaage 49

3.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung 50
3.3.2 Ergebnisse und Diskussion 51

3.4 Zusammenfassende Bewertung der manuellen Messgeräte 55

4 Online-Schnellbestimmung des Wassergehalts von Hackschnitzeln 57

4.1 Auswahl verwendeter Messgeräte 57

4.2 Versuchsbrennstoffe und Versuchsdurchführung 58

4.3 Ergebnisse und Diskussion 60

4.3.1 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit vom Sortiment 61
4.3.2 Ergebnisse und Beurteilung der Online-Messverfahren in Abhängigkeit von der Wassergehaltsstufe 63

4.4 Zusammenfassende Bewertung der Online-Messgeräte 66

5 Fallstudie zur Homogenisierung des Brennstoffs 69

5.1 Material und Methoden 69

5.2 Ergebnisse und Diskussion 73

6 Feuerungsversuche mit Hackschnitzelqualitäten nach EN*plus* 77

6.1 Material und Methoden 77

6.1.1 Brennstoffanalysen und Bewertung 77
6.1.2 Emissionsmessungen 79

6.2 Ergebnisse zur Brennstoffqualität 81

6.2.1 Physikalische Brennstoffqualität (Heizwert, Wassergehalt, Schüttdichte, Aschegehalt und Partikelgrößenverteilung) 82
6.2.2 Inhaltsstoffliche Parameter (Hauptbestandteile, Spurenelemente und Aerosolbildner) 85
6.2.3 Klassifizierung der untersuchten Hackschnitzel nach EN*plus* 90

6.3 Ergebnisse der Emissionsmessungen 91

6.3.1 Ergebnisse mit der 50 kW Kipprostfeuerung (Kessel A) 91
6.3.2 Ergebnisse mit der 100 kW Drehrostfeuerung (Kessel B) 96

6.4 Regressionsberechnungen 101

6.4.1 Partikelförmige Emissionen 101
6.4.2 Emissionen an CO und organischen Kohlenwasserstoffen 105
6.4.3 Stickoxidemissionen 106
6.4.4 Abschließende Bemerkungen 107

6.5 Ausblick Ökodesign Richtlinie (1. BImSchV, Ökodesign) 108

6.6 Zusammenfassung der Emissionsmessungen 111

7 Messgenauigkeit von Schornsteinfegermessgeräten 113

7.1 Hintergrund der Vergleichsmessungen 113

7.2 Material und Methoden 113

7.2.1 Ausgewählte Messgeräte 113
7.2.2 Versuchsaufbau für die Vergleichsmessungen 115

7.3 Ergebnisse der Vergleichsmessungen 117

7.3.1 Überprüfung der Schornsteinfegermessgeräte 117
7.3.2 Ergebnisse der Messgeräte bezüglich Kohlenmonoxid 117
7.3.3 Ergebnisse der Messgeräte bezüglich Gesamtstaub 120
7.3.3.1 Vergleich der beiden Referenzmessstellen 120
7.3.3.2 Vergleich der Schornsteinfegermessgeräte mit dem Referenzverfahren 122

7.4 Zusammenfassung der Vergleichsmessungen 126

Zusammenfassung 129

Quellenverzeichnis 133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts [6] 21

Abbildung 2: Messverfahren der ausgewählten manuellen Messgeräte und der Referenzmethode 23

Abbildung 3: Standmessgeräte: UX3081, MA35 und humimeter BMA 24

Abbildung 4: Einstechlanzen: humimeter BL2, AD22-CMS22, Almemo Feuchtefühler, GMH 3851, Hydromette HT85T, HD2 27

Abbildung 5: Gewählte Hackschnitzelsortimente und Trocknungsboxen zum Erreichen der Wassergehaltsstufen im Technikum des TFZ 30

Abbildung 6: Schematischer Ablauf der Messreihe zur Bestimmung des Wassergehalts mittels manueller Messgeräte im Technikum des TFZ 31

Abbildung 7: Gewünschte Wassergehaltsstufen für die Messreihe (erntefrisch, 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%) 32

Abbildung 8: Lagerung in Kunststoffsäcken (a), Probenteilung (b), Messung mit Einstechlanzen (c), Einwiegen der Referenzmessung (d) 32

Abbildung 9: Mittelwerte und Standardabweichungen (n = 5) der Referenzmessungen aller Sortimente und Wassergehaltsstufen (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb) 35

Abbildung 10: Wassergehaltsmessungen des MA35 im Vergleich zur Referenzmethode 37

Abbildung 11: Wassergehaltsmessungen des UX3081 im Vergleich zur Referenzmethode 37

Abbildung 12: Wassergehaltsmessungen des humimeter BMA im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 39

Abbildung 13: Wassergehaltsmessungen des humimeter BL2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 40

Abbildung 14: Wassergehaltsmessungen des AD22-CMS22 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 41

Abbildung 15: Wassergehaltsmessungen des Almemo im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 42

Abbildung 16: Wassergehaltsmessungen des GMH3851 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 43

Abbildung 17: Wassergehaltsmessungen des HT85T im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 44

Abbildung 18: Wassergehaltsmessungen des HD2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs) 45

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) 46

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) 47

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) 48

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) 49

Abbildung 23: Messdurchführung und Messgerät: Wöhler HF550/FW550 50

Abbildung 24: Wassergehaltsmessungen der HF550/FW550 im Vergleich zur Referenzmethode (HS = Hackschnitzel, schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des möglichen Messbereichs) 52

Abbildung 25: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 vom Referenzwert, getrennt nach unterschiedlichen Wassergehaltsstufen 53

Abbildung 26: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 unterschiedlicher Sortimente vom Referenzwert (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb, HS = Hackschnitzel) 54

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 59

Abbildung 28: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Energierundholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung) 62

Abbildung 29: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Waldrestholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung) 62

Abbildung 30: Abweichung der Messwerte des AMMS-0-1-2-0 (ACO Automation Components) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen 64

Abbildung 31: Abweichung der Messwerte des BLO (Schaller GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen 64

Abbildung 32: Abweichung der Messwerte des FL-Digi Smart Basic (Franz Ludwig GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen 65

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) 66

Abbildung 34: Darstellung der Probenahmezeitpunkte entlang der Umschlagsprozesse: 1 – am Lagerplatz, 2 – beim Umladen in den Container, 3 – im Container, 4 – beim Abkippen in den Bunker, 5 – im Bunker, 6 – vor der Feuerung 70

Abbildung 35: Querschnittprofil der untersuchten Lagermiete (links) und Probenahmepunkte im Querschnitt (rechts) 70

Abbildung 36: Umladen der Lagermiete in den Transportcontainer 71

Abbildung 37: Probenahme und Verteilung der Probenahmepunkte an der Hackschnitzeloberfläche im Container 71

Abbildung 38: Probenahme beim Abkippen der Hackschnitzel in den Bunker (a), sammeln der Proben als Gesamtprobe (b) 72

Abbildung 39: Probenahmepunkte an der Schüttung im Bunker 73

Abbildung 40: Probenahme vor der Hackschnitzelfeuerung 73

Abbildung 41: Messungen des Wassergehalts (m-%) an den 12 Probenahmepunkten im Mietenquerschnitt 74

Abbildung 42: Vergleich der Messwerte des Wassergehalts an allen Umschlagsorten 75

Abbildung 43: Prüfstandsaufbau und Anordnung der Messgeräte für beide eingesetzten Hackschnitzelfeuerungen 80

Abbildung 44: Summe der Aerosolbildner (∑(K, Na, Pb, Zn) in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis) der untersuchten Holzhackschnitzel 88

Abbildung 45: Lineare Regression der Aerosolbildner in Abhängigkeit vom Aschegehalt (auf wasserfreier Bezugsbasis) 89

Abbildung 46: Molares Si/K-Verhältnis der untersuchten Hackschnitzelproben (unterbrochene Linie zeigt Schwellenwert von 2,5; oberhalb dieses Wertes kann die K-Freisetzung in die Gasphase durch K-Fixierung verringert sein) 89

Abbildung 47: Mittlere Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen und Luftverhältniszahl (Lambda) der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-% (wasserfrei); F: Feinanteil in m-%) 92

Abbildung 48: Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 93

Abbildung 49: Stickstoffoxid-(NO_X)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 94

Abbildung 50: Partikelförmige Emissionen (Gesamtstaub) und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 95

Abbildung 51: Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 97

Abbildung 52: Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung. (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 97

Abbildung 53: Stickstoffoxid-(NO_X)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung. (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 98

Abbildung 54: Partikelförmige Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%) 99

Abbildung 55: Lineare Regression der Partikelemissionen in Abhängigkeit von der Summe potentieller Aerosolbildner ∑(K, Na, Pb, Zn) (auf wasserfreier Bezugsbasis) in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). Datenpunkte > 1.500 mg/kg an aerosolbildenden Elementen wurden in der Regressionsberechnung nicht berücksichtigt. 101

Abbildung 56: Lineare Regression der Partikelemissionen in Abhängigkeit vom Aschegehalt (auf wasserfreier Bezugsbasis) in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). Aschegehalte > 3 m-% wurden in der Regressionsberechnung nicht berücksichtigt. 102

Abbildung 57: Lineare Regression der partikelförmigen Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung) 104

Abbildung 58: Regression der Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen (Org.-C) in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). 105

Abbildung 59: Regression der Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). 106

Abbildung 60: Lineare Regression der NO_X Emissionen in Abhängigkeit vom Brennstoffstickstoffgehalt für Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). 107

Abbildung 61: Eingesetzte Schornsteinfegermessgeräte für die Vergleichsmessungen 114

Abbildung 62: Versuchsaufbau für die Vergleichsmessungen mit vier Schornsteinfegermessgeräten.....116

Abbildung 63: Ergebnisse von Gerät A bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2. 118

Abbildung 64: Ergebnisse von Gerät B bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2. 118

Abbildung 65: Ergebnisse von Gerät C bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2. 119

Abbildung 66: Ergebnisse von Gerät D bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2. 119

Abbildung 67: Vergleich der beiden Staubreferenzmessstellen ohne Berücksichtigung der Staubablagerungen in der Probenahmesonde ...121

Abbildung 68: Vergleich der beiden Staubreferenzmessstellen mit Berücksichtigung der Staubablagerungen in der Probenahmesonde ...121

Abbildung 69: Prozentueller Anteil der gespülten Staubablagerungen in der Sonde bezogen auf den Mittelwert der Gesamtstaubmessung an beiden Referenzstaubmessstellen 122

Abbildung 70: Ergebnisse von Gerät A bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2. 123

Abbildung 71: Ergebnisse von Gerät B bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2. 124

Abbildung 72: Ergebnisse von Gerät C bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-4. 125

Abbildung 73: Ergebnisse von Gerät D bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2. 126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikation von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug) [16] 18

Tabelle 2: Partikelgröße von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [16] 19

Tabelle 3: Einteilung der Hackschnitzelsortimente nach DIN EN ISO 17225 (Teil 1 und Teil 4) [15], [16] 34

Tabelle 4: Mittlere Abweichung (absolut) der manuellen Messgeräte vom Referenzverfahren sowie die dazugehörige Regressionsanalyse 36

Tabelle 5: Referenzwassergehaltswerte (in m-%) nach Sortiment und Spezifikation für die Versuchsreihe mit dem HF550/FW550 51

Tabelle 6: Messbereich und Messprinzip der untersuchten Sensoren 57

Tabelle 7: Mittlere Referenzwassergehalte in m-% (± Standardabweichung) bei den Messungen mit den Online-Messgeräten 60

Tabelle 8: Übersicht über die Anzahl der Einzelmessungen und die durchschnittliche Messgenauigkeit der untersuchten Online-Messgeräte, getrennt nach Sortiment 61

Tabelle 9: Brennstoffanalysen nach DIN EN ISO Norm (wf = wasserfreie Bezugsbasis, lutro = luftgetrocknet) 78

Tabelle 10: Übersicht der vom Brennstofflieferanten übermittelten Informationen zu den gelieferten Brennstoffen 81

Tabelle 11: Spezifikationen für ENplus-Holzhackschnitzel (aus ENplus-Zertifizierungshandbuch, Version 1.0, Stand 1. September 2016) [28] 81

Tabelle 12: Heizwert (H_u), Wassergehalt (M), Schüttdichte (BD), Aschegehalt (A), Feinanteil (F) und Partikelklasse nach DIN EN ISO 17225-4 der untersuchten Brennstoffe bei Anlieferung (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand, f = vor Feuerungsversuch) 82

Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung, maximale Länge und Partikelklasse der untersuchten Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-1/4 (Angabe der Einzelfraktionen in m-% der Gesamtmasse) 84

Tabelle 14: Makroelemente C, H, N, S, O und Cl der Brennstoffe in m-% (wasserfreie Bezugsbasis) inklusive Grenzwert nach DIN EN ISO 17225-4 86

Tabelle 15: Für die Verbrennung relevante Inhaltsstoffe K, Na, Ca, Mg, Si und Al der Brennstoffe (in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis) 86

Tabelle 16: Schwermetallgehalte der untersuchten Holzhackschnitzel (in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis) und Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-4 (k.A. = keine Angabe) 87

Tabelle 17: Klassifizierung der untersuchten Hackschnitzel nach ENplus (n. k. nicht klassifizierbar) 90

Tabelle 18: Staubemissionen der 50 kW Anlage gemessen mit Wöhler SM 500 im Ausgangszustand der Kesselparameter (optimierte Einstellungen aus dem Projekt OptiChip – Phase 1) und schrittweise während der Parameteranpassung durch den Hersteller. 96

Tabelle 19: Staubemissionen der 100 kW Anlage gemessen mit Wöhler SM 500. Kesselparameter wurden schrittweise durch den Hersteller angepasst. 100

Tabelle 20: Vergleich des Stufe-2-Grenzwertes der 1. BImSchV mit den Grenzwerten der Ökodesign Richtlinie für automatisch beschickte Feuerungen, bezogen auf 13 % Bezugssauerstoff 109

Tabelle 21: Typenprüfergebnisse (in mg/Nm^3 bei 13% O_2) der 50 kW Kipprostfeuerung und der 100 kW Drehrostfeuerung bei Nennlast und Teillast (Quelle: BAFA-Liste der förderfähigen automatisch beschickten Biomasseanlagen [7]) 110

1 Einleitung

Holzfeuerungen müssen für einen effizienten und emissionsarmen Betrieb optimal auf den Brennstoff eingestellt sein. Hierzu muss der Brennstoff eine definierte, gleichbleibende Qualität vorweisen, denn nur durch das aufeinander abgestimmte Zusammenspiel von Anlagentechnik, Benutzerverhalten und Brennstoffqualität kann ein optimaler Betrieb gewährleistet werden. Gerade die Brennstoffqualität von Hackschnitzeln schwankt jedoch mitunter erheblich, v. a. hinsichtlich des Wassergehalts, des Aschegehalts oder der Partikelgröße.

Obwohl Hackschnitzelfeuerungen technisch ausgereift und zuverlässig sind, emittieren sie brennstoffbedingt mehr Staub und Kohlenmonoxid (CO) im Vergleich zu Heizölheizungen. Gerade in Hinblick auf die niedrigeren Staubgrenzwerte für Neuanlagen (0,02 g/Nm^3 bei 13 % O_2, Stufe 2 der 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetztes – 1. BImSchV.) ist es fraglich, ob diese strengeren Werte mit dem derzeitigen Stand der Technik problemlos und ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen eingehalten werden können.

Eine definierte und einheitliche Brennstoffqualität ist somit Voraussetzung dafür, dass ein störungsfreier und emissionsarmer Anlagenbetrieb gewährleistet werden kann. Gerade die Qualität sehr heterogener Brennstoffe wie Holzhackschnitzel wird in der Praxis jedoch selten beachtet. Auch aktuelle Normen und Standards für biogene Festbrennstoffe, z. B. die DIN EN ISO 17225-4 für Holzhackschnitzel finden bisher nur wenig Anwendung.

2 Zielsetzung und Aufbau der Studie

Ziel des Projektes „HackZert – Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel“ ist die Etablierung einheitlicher Standards für die Brennstoffqualitäten von Holzhackschnitzeln auf dem deutschen Hackschnitzelmarkt. Hierzu wurde ein praxistaugliches Zertifizierungsprogramm zur Sicherstellung von gleichbleibenden, hochwertigen und definierten Hackschnitzelqualitäten entwickelt (HackZert – Teilvorhaben 1). Das Zertifizierungshandbuch „EN*plus* Holzhackschnitzel“ wurde in einer ersten Version während der Projektlaufzeit fertiggestellt und erste Produzenten von Holzhackschnitzeln konnten bereits noch vor Projektende nach EN*plus* zertifiziert werden.

Die Entwicklung und Markteinführung eines solchen Programms soll die Bereitstellung homogener Holzhackschnitzel gewährleisten, mit Hilfe derer Hackschnitzelheizungen störungsfrei und emissionsarm betrieben werden können. Möglicherweise kann mit Brennstoffen nach EN*plus* in einer modernen und auf den Brennstoff optimal eingestellten Feuerung die Stufe 2 der 1. BImSchV sogar ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen eingehalten werden.

Aufgabenschwerpunkte des am Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) bearbeiteten „Teilvorhaben 2“ war es, die Entwicklung des Zertifikats wissenschaftlich zu begleiten. Hierbei wurden folgende Fragestellungen analysiert:

- Bewertung der Messgenauigkeit von mobilen Schnellbestimmungsmethoden für den Wassergehalt in Holzhackschnitzeln (manuelle Messgeräte) (Kapitel 3)
- Bewertung der Messgenauigkeit von kontinuierlich messenden Online-Messverfahren für den Wassergehalt in Holzhackschnitzeln (Kapitel 4)
- Erarbeitung von Empfehlungen zur Homogenisierung und zur Probenahme an heterogenen Hackschnitzelchargen (Kapitel 5)
- Bewertung des Verbrennungsverhalten von EN*plus*-Holzhackschnitzeln in Kleinfeuerungsanlagen (50 kW und 100kW) (Kapitel 6)
- Bewertung der Messgenauigkeit von eignungsgeprüften Abgasmessgeräten für CO und Gesamtstaub bei der wiederkehrenden Überwachung von Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen (Kapitel 7)

3 Manuelle Schnellbestimmung des Wassergehalts von Hackschnitzeln

Ein wesentliches Teilziel des Projektes „Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Hackschnitzel“ (HackZert) war die Überprüfung der Messgenauigkeit von Schnellbestimmungsgeräten zur Analyse des Wassergehalts in Holzhackschnitzel. In Kapitel 3 werden insgesamt 10 manuell betriebene, mobile Messgeräte in zwei Versuchsreihen bewertet (Abschnitt 3.2 und 3.3). Die Geräte wurden anhand einer vorab stattgefundenen Marktanalyse ausgewählt. Kapitel 4 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 Hintergrund der Vergleichsmessungen

3.1.1 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. Sägerestholz, Waldholz 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 [47].

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 [48]. Qualitativ hochwertige Hackschnitzel zeichnen sich u. a. durch einen niedrigen Wassergehalt, einen geringen Grünanteil, einen geringen Feinanteil und durch scharfkantige Partikel aus [52]. 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 unterstützten 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) [16]

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 ≤ 10 M25 ≤ 25	M35 ≤ 35	Höchstwert ist anzugeben	
Aschegehalt	m-% (wf)	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0	
Schüttdichte	kg/m^3 (ar)	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250 BD300 ≥ 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 [48].

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

Tabelle 2: Partikelgröße von klassifizierten Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [16]

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

3.1.2 Wassergehalt von Holzhackschnitzeln

Der Wassergehalt ist der wichtigste qualitätsbestimmende Parameter von Holzhackschnitzeln [45]. 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-% [50]. Bei Hackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb liegt er sogar häufig > 55 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 [49]. Von Seiten des Gesetzgebers (z. B. 1. BImSchV [8]) und den Kesselherstellen werden daher beim Betrieb von Biomassefeuerungen genaue Ansprüche an den Wassergehalt der Brennstoffe gestellt. Besonders Heizkessel im kleineren bis mittleren Leistungsbereich von < 100 kW bis 500 kW sind häufig auf Hackschnitzel mit einem definierten Wassergehalt von < 15 m-%, von 15–25 m-% oder von 25–35 m-% angewiesen [48]. Größere Heiz(kraft)werke hingegen können auch mit frischen Hackschnitzeln mit Wassergehalten über 35 m-% bis hin zu frischen Brennstoffen zuverlässig betrieben werden [50].

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. Er liegt je nach Holzart zwischen 19 und 25 m-% [45]. Dieses 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

[45] [50]. Eine Abrechnung nach Masse mit einheitlicher Bezugsbasis ist daher zu empfehlen (z. B. t_{atro} = Tonne absolut trockener Brennstoff [28]).

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 [54]. Ein direkter Vergleich von Wassergehalt und Feuchte erfordert daher die Umrechnung auf eine einheitliche Bezugsbasis. Diese zwei Parameter werden jedoch in der Praxis häufig synonym verwendet, wodurch es zwangsläufig zu Missverständnissen kommt.

3.1.3 Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts

Zur Messung des Wassergehaltes in Holzhackschnitzel existieren eine Vielzahl von 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 Wassergehaltes von Biomasse. Zum genaueren Verständnis wird im Folgenden näher auf die Messverfahren eingegangen, die in den hier dargestellten Versuchsreihen verwendet wurden.

3.1.3.1 Thermogravimetrische Verfahren

Bei den thermogravimetrischen Verfahren wird der Brennstoff getrocknet bis dessen Massenkonstanz erreicht wird. Das gängigste und genauste Messverfahren zur gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung ist die Trocknung der Hackschnitzel in einem **Trockenschrank** (DIN EN ISO 18134 [25]). 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.

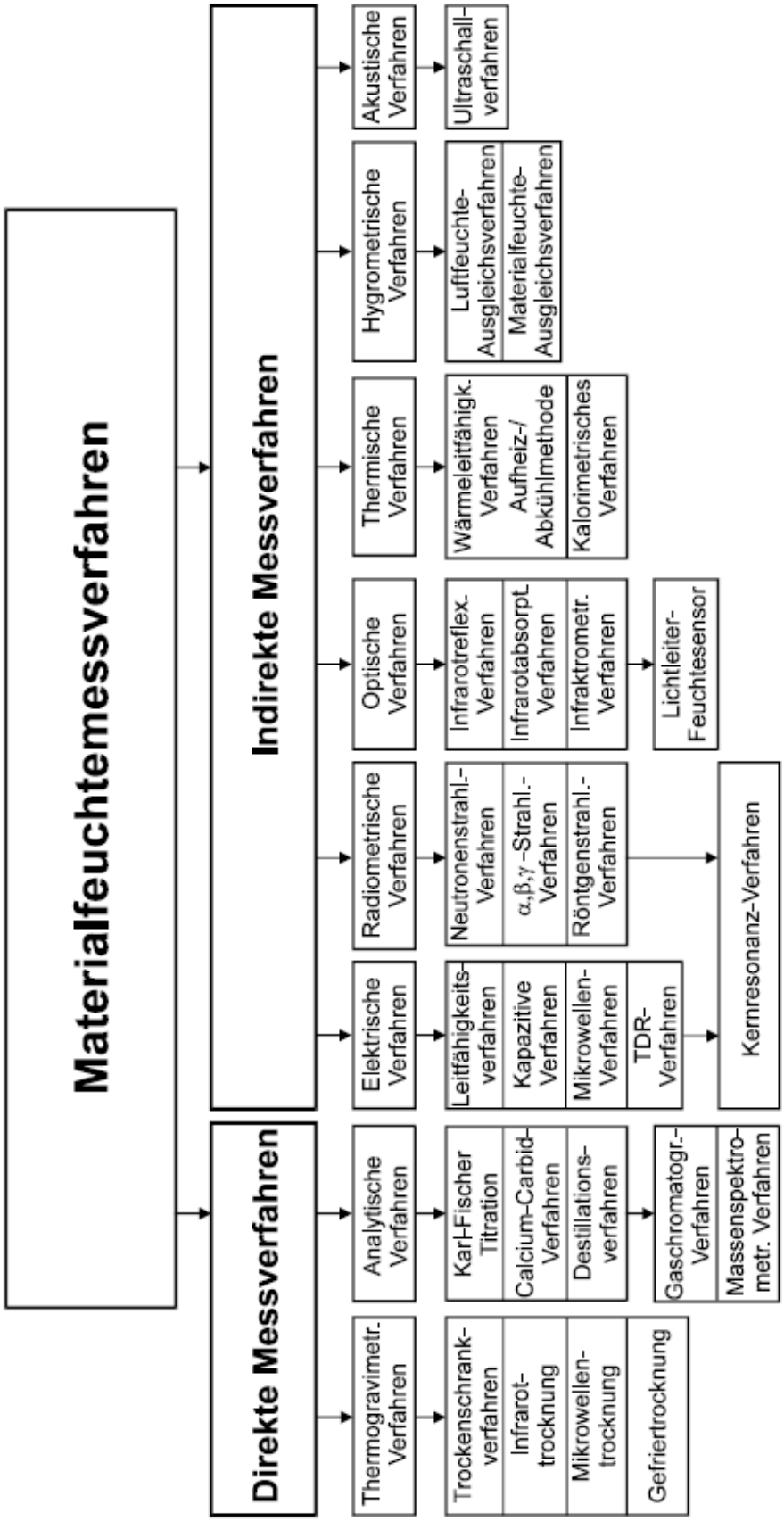


Abbildung 1: Überblick über Messverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts [6]

3.1.3.2 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 Holzhackschnitzel 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 Wiederstands. Dieser sinkt bei steigendem Wassergehalt. Je mehr Wasser in Hackschnitzeln vorhanden ist, desto leitfähiger werden diese und umso geringer ist der elektrische Wiederstand [35]. **TDR-Verfahren** ermitteln den Wassergehalt über die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung. Ein hoher Wassergehalt führt zur Ausbremsung dieser Strahlung [6].

3.1.3.3 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.

3.2 Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit manuellen Messgeräten

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 3.2.1 und 3.2.2 erläutert. Die Methodik orientiert sich dabei an dem Vorgehen in dem Projekt „Bionorm 2“ [12].

3.2.1 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).

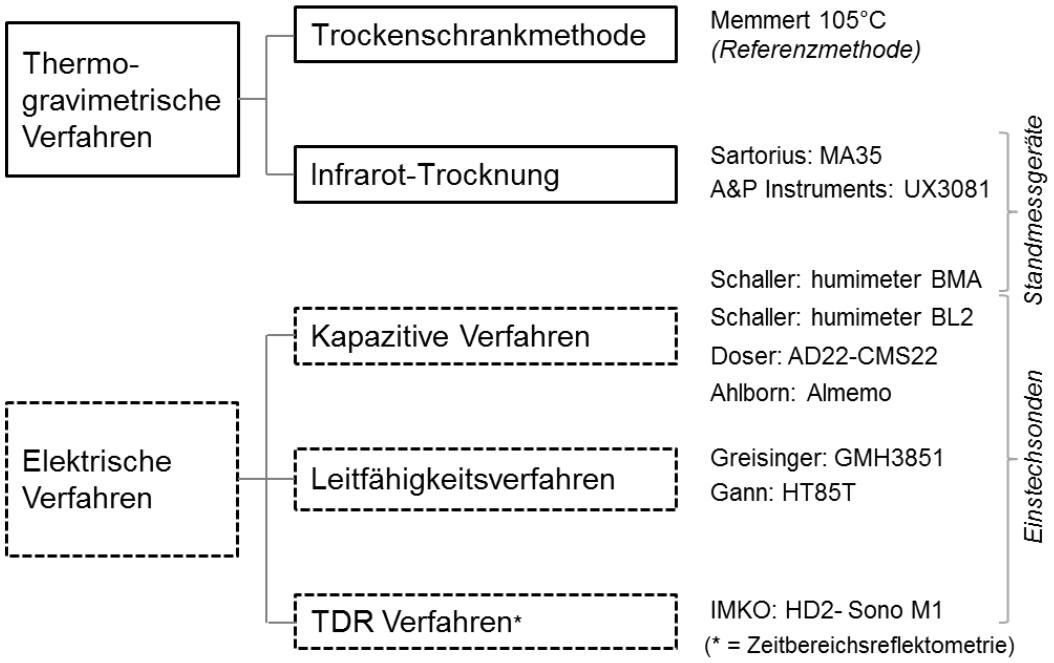


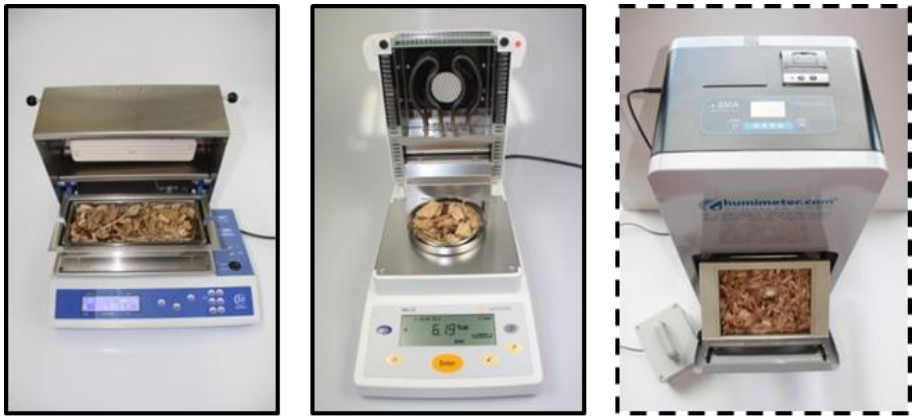
Abbildung 2: Messverfahren der ausgewählten manuellen Messgeräte und der Referenzmethode

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.

3.2.1.1 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 3.2.2). 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 Ge-

räte 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 Schalenträger angebracht ist. Auf dem Schalenträger 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 bei 1 mg [56]. 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) [56].

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 Hackschnitzel eingewogen. Der Beginn der Messung erfolgte manuell über das Einschalten des Infrarotstrahlers. Das Messende erfolgt 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 der die Automatik von einer Gewichtskonstanz ausgeht, wird ein Wert empfohlen, der ca. 0,1 m-% der Hackschnitzeleinwaage 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 kapazitativen Messprinzip. Der Messbereich des BMA liegt bei Hackschnitzeln zwischen 5 und 70 m-% Wassergehalt [57]. 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 verschieden 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 [27]. Besondere Unterscheidungen werden zudem hinsichtlich des Feinanteils (Partikelgröße ≤ 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).

3.2.1.2 Einstechlanzen

In der Versuchsreihe wurden neben den drei Standmessgeräten sechs Einstechlanzen zur Schnellbestimmung des Wassergehalts untersucht. Drei davon messen mit dem kapazitiven Messverfahren, zwei 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 3.2.2). Im Folgenden werden die verwendeten Messlanzen kurz beschrieben.

Schaller humimeter BL2 (kapazitives Verfahren)

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 Holzscheit verwendet werden kann. Das

BL2 misst kapazitiv. Der Messbereich für den Wassergehalt erstreckt sich über einen Bereich von 10 bis 50 m-% [58]. 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 [27] 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. Nachdem 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 dazugehörende 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 [30]. 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 [36]. Das Messprinzip erfolgt nach dem Leitfähigkeitsverfahren. Der Messbereich liegt bei einem Wassergehalt von 4,7–50 m-% (bzw. 5–100 m-% Feuchte) [36]. 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 erfolgt kontinuierlich nach dem Einschalten des Gerätes. Die Messlanze besitzt einen eingebauten Temperaturfühler 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 [35].

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 [35].

Vor der Messung muss die Holzart der Probe entsprechend einer beigefügten Holzsorten-Tabelle einer Ziffer von 1 bis 4 zugeordnet und am Gerät eingestellt. 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 parallelverlaufenden, 13 cm langen metallischen Stäben. Es misst nach dem TRIME-TDR-Verfahren [43]. Der Messbereich liegt bei einem Wassergehalt von 0 bis 50 m-% (mündliche Herstellerangabe). Der Anzeige der Messwerte erfolgt direkt als Wassergehalt (in m-%).

In der Ausleseeinheit 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 [43]. Außerdem sollte der Behälter zylindrisch aufgebaut sein und aus nichtmetallischem Material bestehen. Die Messung erfolgt beim Tastendruck. Dabei erfolgt je Tastendruck eine neue Messung.

3.2.2 Versuchsdurchführung

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

In Anlehnung an die Eigenschaftsklassen der DIN EN ISO 17225-4 [16] 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 [25]. Zusätzlich wurden die Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 [22] gemessen und eine Siebanalyse zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17827-1 [21] durchgeführt.

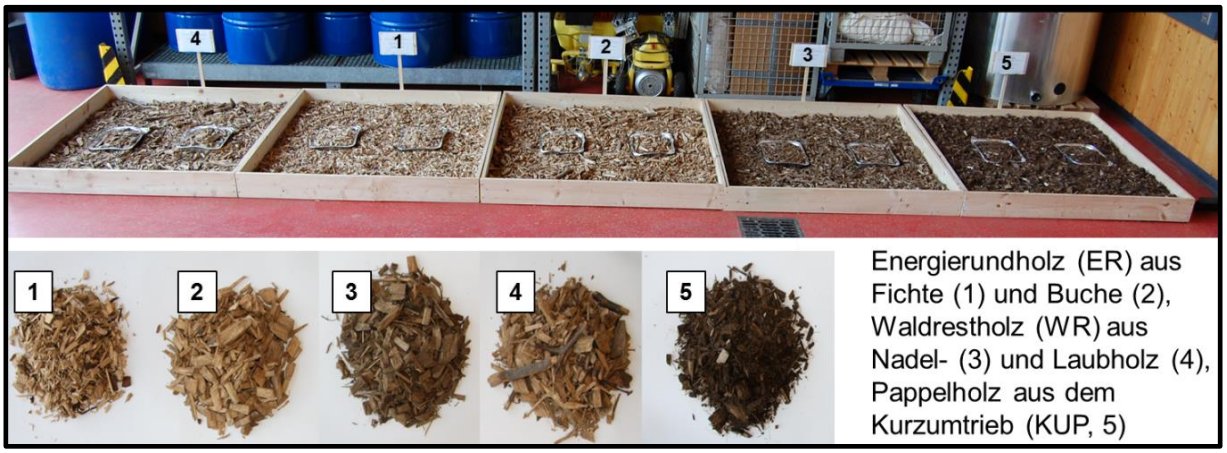


Abbildung 5: Gewählte Hackschnitzelsortimente und Trocknungsboxen zum Erreichen der Wassergehaltsstufen im Technikum des TFZ

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

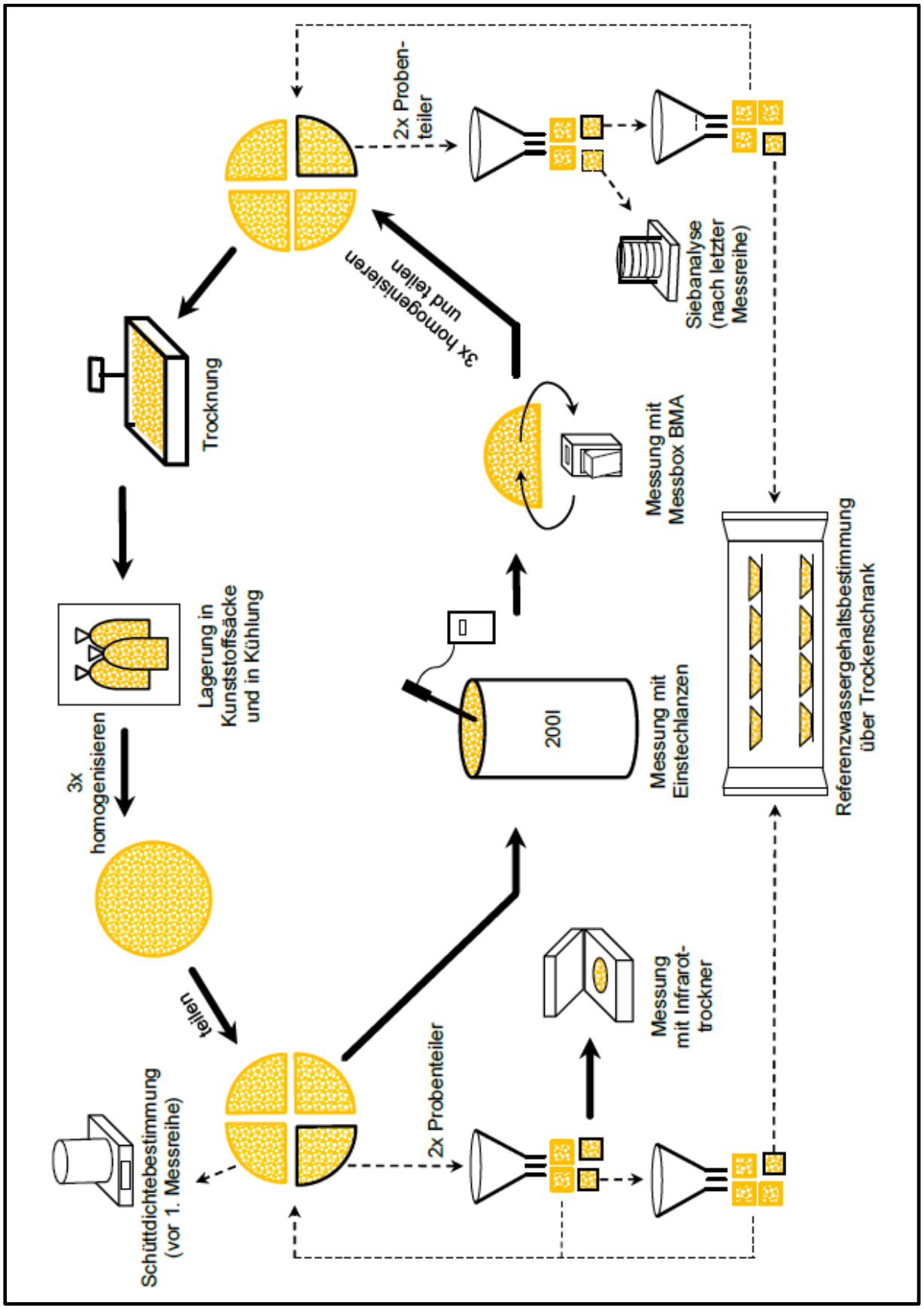


Abbildung 6: Schematischer Ablauf der Messreihe zur Bestimmung des Wassergehalts mittels manueller Messgeräte im Technikum des TFZ

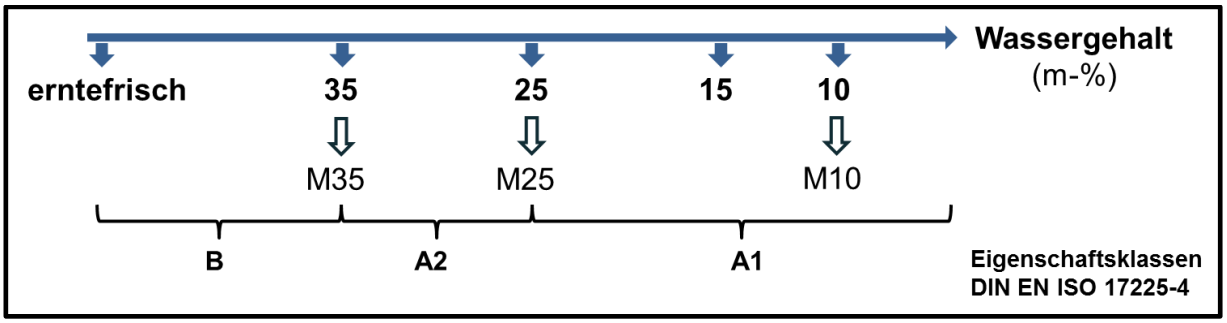


Abbildung 7: Gewünschte Wassergehaltsstufen für die Messreihe (erntefrisch, 35 m-%, 25 m-%, 15 m-% und 10 m-%)

Um die jeweiligen Wassergehaltsstufen zu erreichen (Abbildung 6), 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.

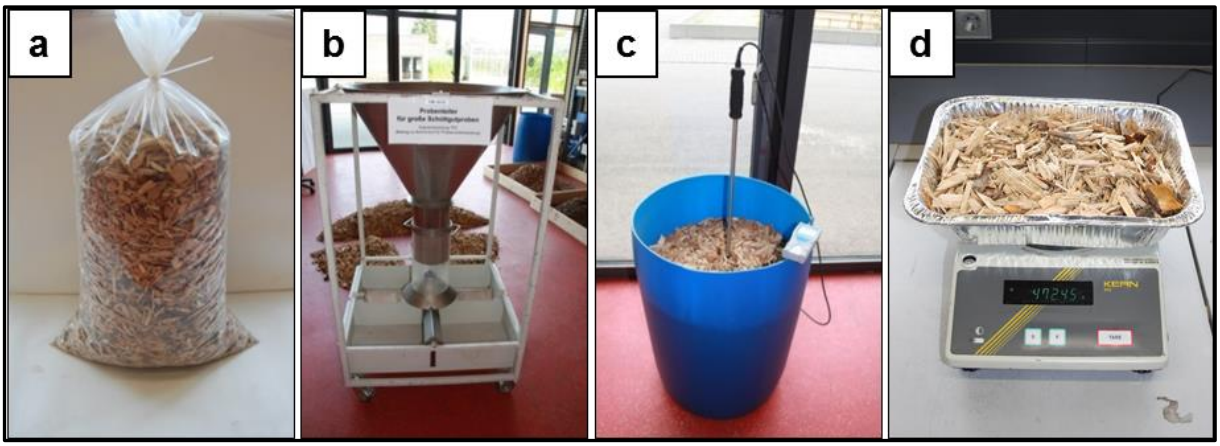


Abbildung 8: Lagerung in Kunststoffsäcken (a), Probenteilung (b), Messung mit Einstechlanzen (c), Einwiegen der Referenzmessung (d)

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 [13] 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 [25] (5 × 2 l) und zur Wassergehaltsbestimmung mit den beiden Infrarottrocknern (10 l) gezogen.

Anschließend erfolgte die Messung mit den Einstechlanzen (Abbildung 6). Hierfür wurde die gesamte Hackschnitzelcharge in ein 200 l fassendes, zylindrisches Kunststofffass gefüllt und durch dreimal freies Fallenlassen des Fasses aus 15 cm Höhe verdichtet (analog DIN EN ISO 17828 [22]). 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 mittiger Höhe des Hackschnitzelfüllstandes des Kunststofffasses befanden. Wurden 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 wurde 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 [25]:

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

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 (g) 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.

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Alle Sortimente ließen sich nach DIN EN ISO 17225-1 [15] 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) [15], [16]

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
Feinanteilklasse	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 Sortimente aus Nadelholz waren dabei als typisch für erntefrische Hackschnitzel einzuordnen (47,9–51,0 m-%) [50]. 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 Sortimente vor der Lieferung an das TFZ gekommen ist [49]. Der sehr hohe Ausgangswassergehalt der KUP Hackschnitzel von 68,0 m-% ist ebenfalls nicht als typisch anzusehen. Es wird davon ausgegangen, dass der Wassergehalt 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).

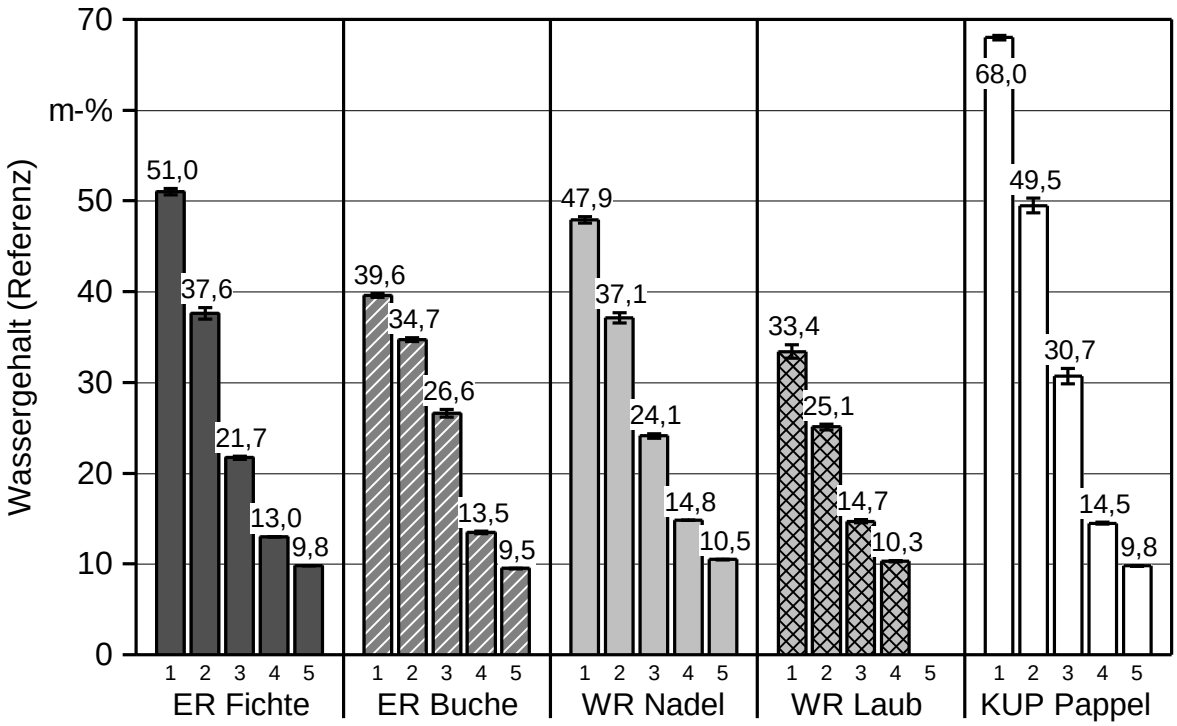


Abbildung 9: Mittelwerte und Standardabweichungen (n = 5) der Referenzmessungen aller Sortimente und Wassergehaltsstufen (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)

3.2.3.1 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 den 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 ±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 [63]. 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	Mess-bereich in m-%	n	Mittlere Abweichung (absolut) in m-% (±SD)	Schnittpunkt mit y-Achse	Geraden-steigung	R^2
MA35	0–100	67	-0,7 (±2,1)	-0,66	1,00	0,98
UX3081	0–100	68	-2,6 (±1,7)	-1,66	0,96	0,99
humimeter BMA	5–70	120	-0,5 (±4,0)	3,65	0,85	0,95
humimeter BL2	10–50	190	3,8 (±4,7)	-3,50	1,28	0,96
AD22-CMS22	0–50	220	-0,7 (±4,0)	1,00	0,93	0,90
Almemo	0–50	220	1,5 (±4,2)	2,88	0,94	0,90
GMH3851*	0–50	190	0,7 (±4,9)	-3,53	1,21	0,88
HT85T	4–50	220	1,9 (±3,7)	-4,27	1,10	0,94
HD2	0–50	206	-1,6 (±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 lag über alle Sortimente bei -0,7 m-% (±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 ±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).

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-%.

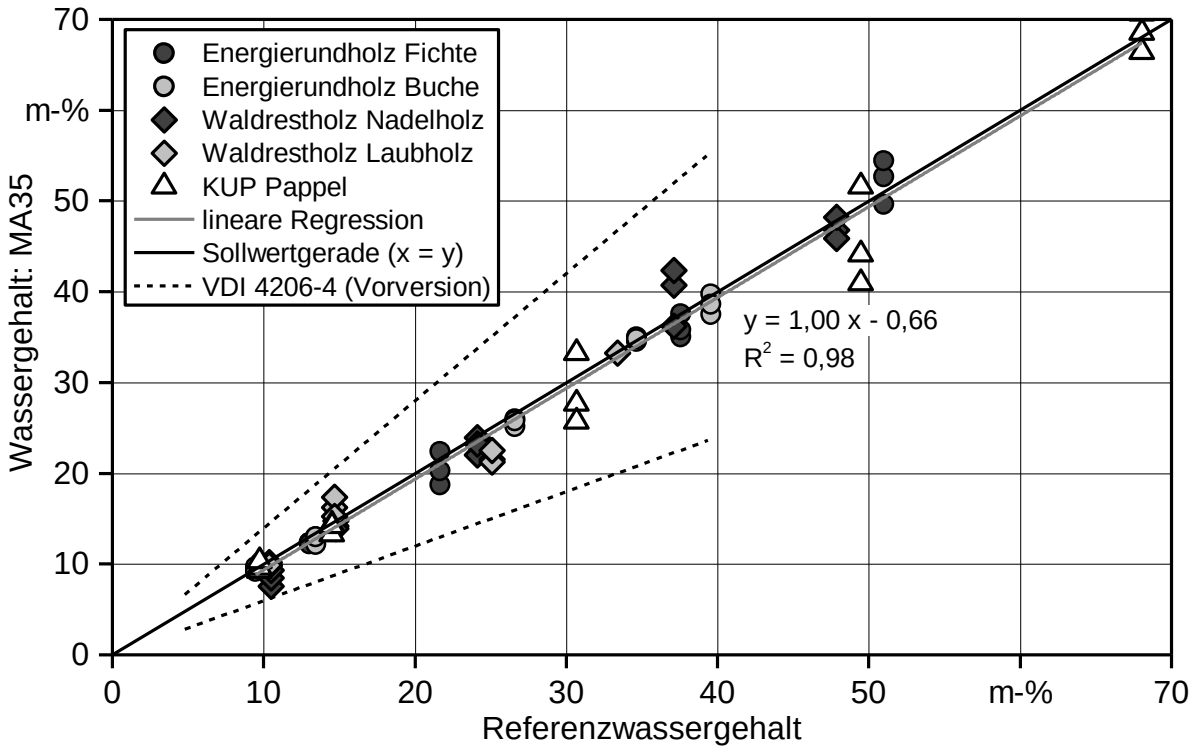


Abbildung 10: Wassergehaltsmessungen des MA35 im Vergleich zur Referenzmethode

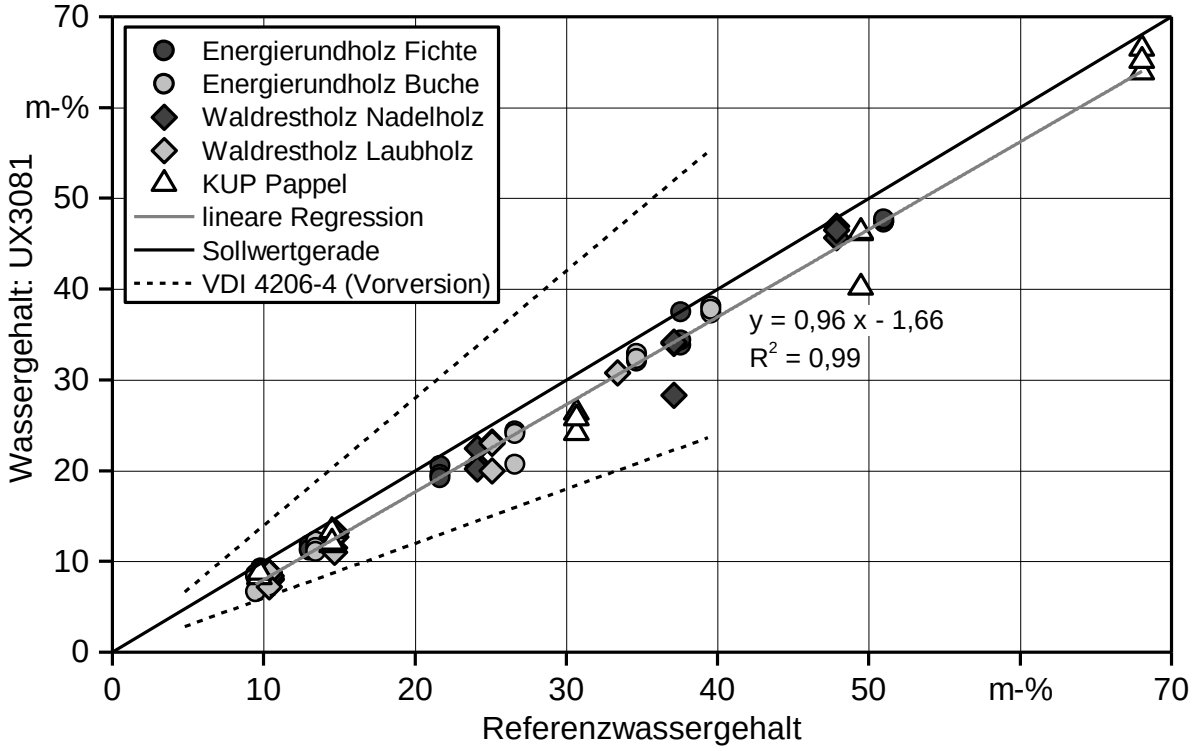


Abbildung 11: Wassergehaltsmessungen des UX3081 im Vergleich zur Referenzmethode

Alle Werte lagen innerhalb der Anforderungen (±40 %) gemäß der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 [63]. Alle Messungen mit dem UX3081 zeigten allerdings eine kontinuierliche Unterschätzung des tatsächlichen Wassergehalts; die mittlere Abweichung lag über alle Sortimente bei -2,6 m-% (±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 [55]. 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 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 Infrarottrocknern 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 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 m-%, UX3081: 1,7 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 Brennstoffen 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 3.4).

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 3.1.3.2). 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.

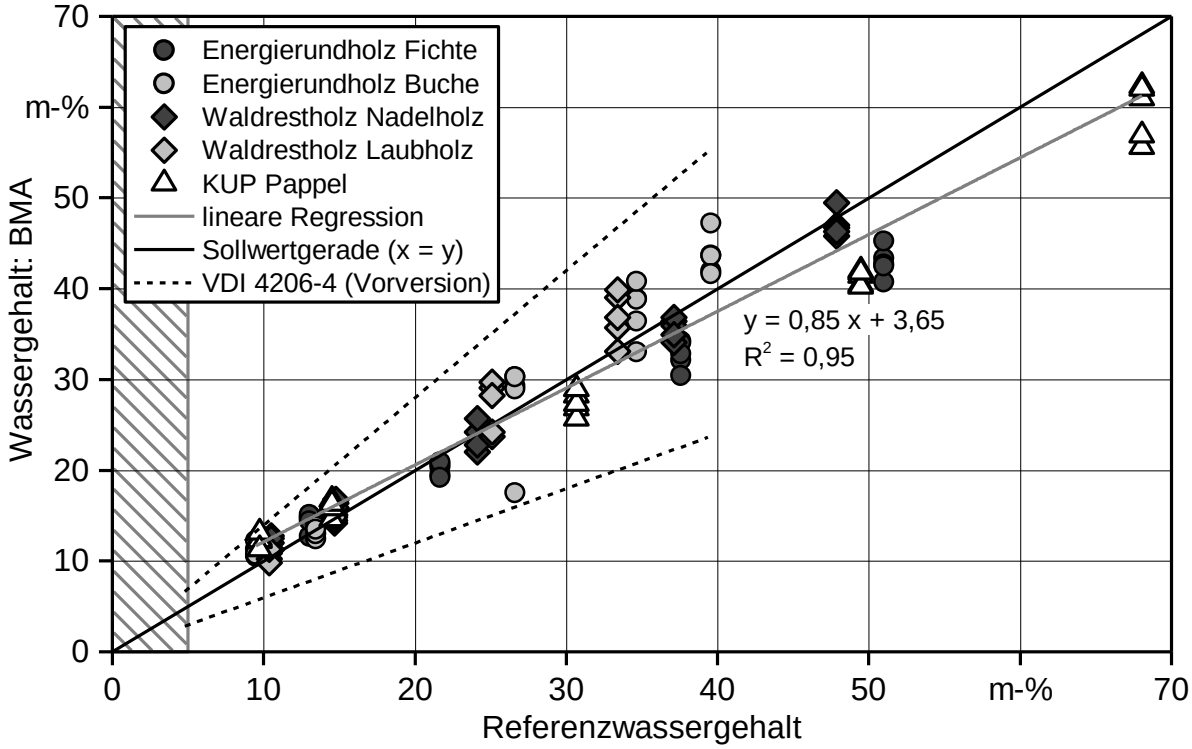


Abbildung 12: Wassergehaltsmessungen des humimeter BMA im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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-% (±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 verwendeten Sortimente 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 ±40 % Messabweichung nach VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion).

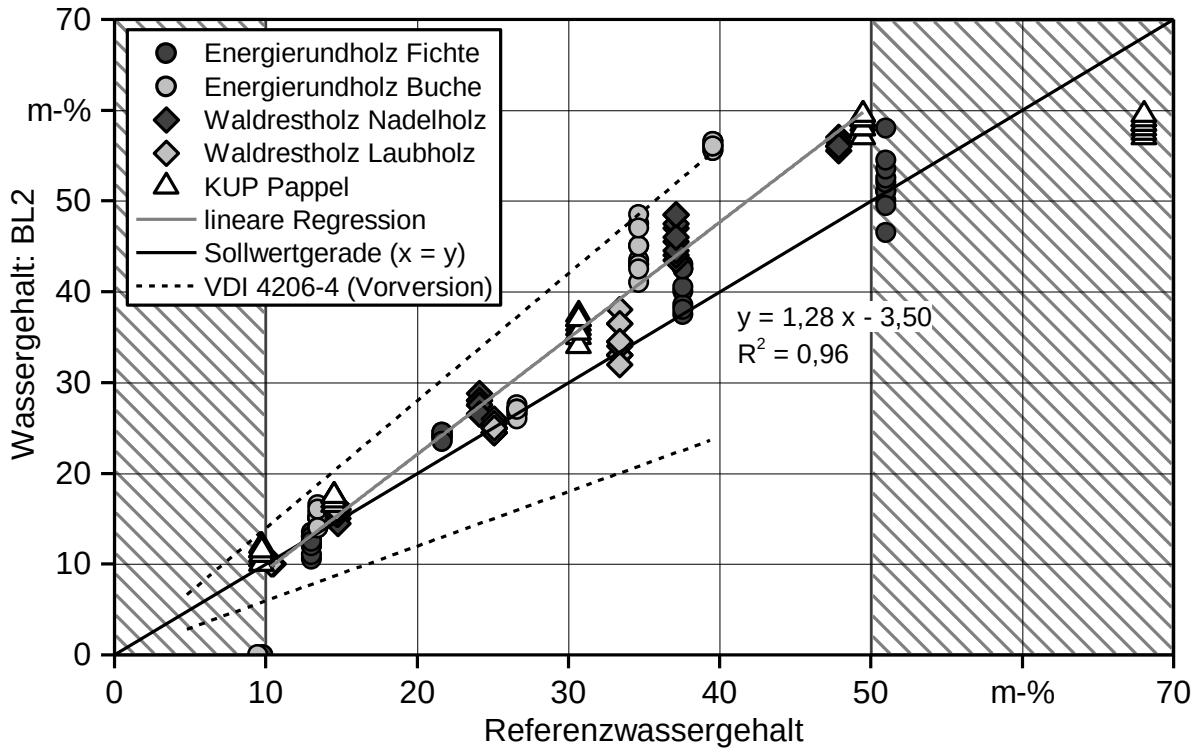


Abbildung 13: Wassergehaltsmessungen des humimeter BL2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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-% (±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 wenige 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). 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.

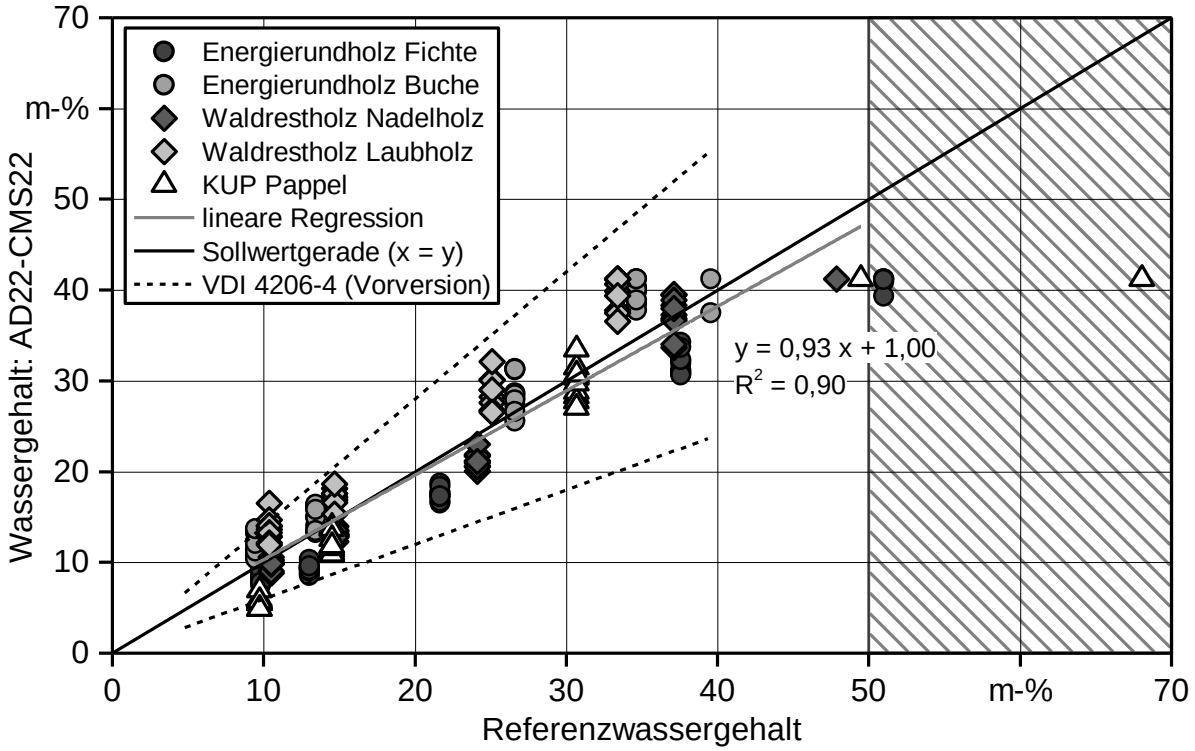


Abbildung 14: Wassergehaltsmessungen des AD22-CMS22 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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 ±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-% (± 4,2, Tabelle 4). Die geringsten Abweichungen wurden bei den Messungen an Pappel- und Walrestholzhackschnitzeln aus Nadelholz festgestellt. Die maximale absolute Abweichung betrug über 17 m-% (Abbildung 15).

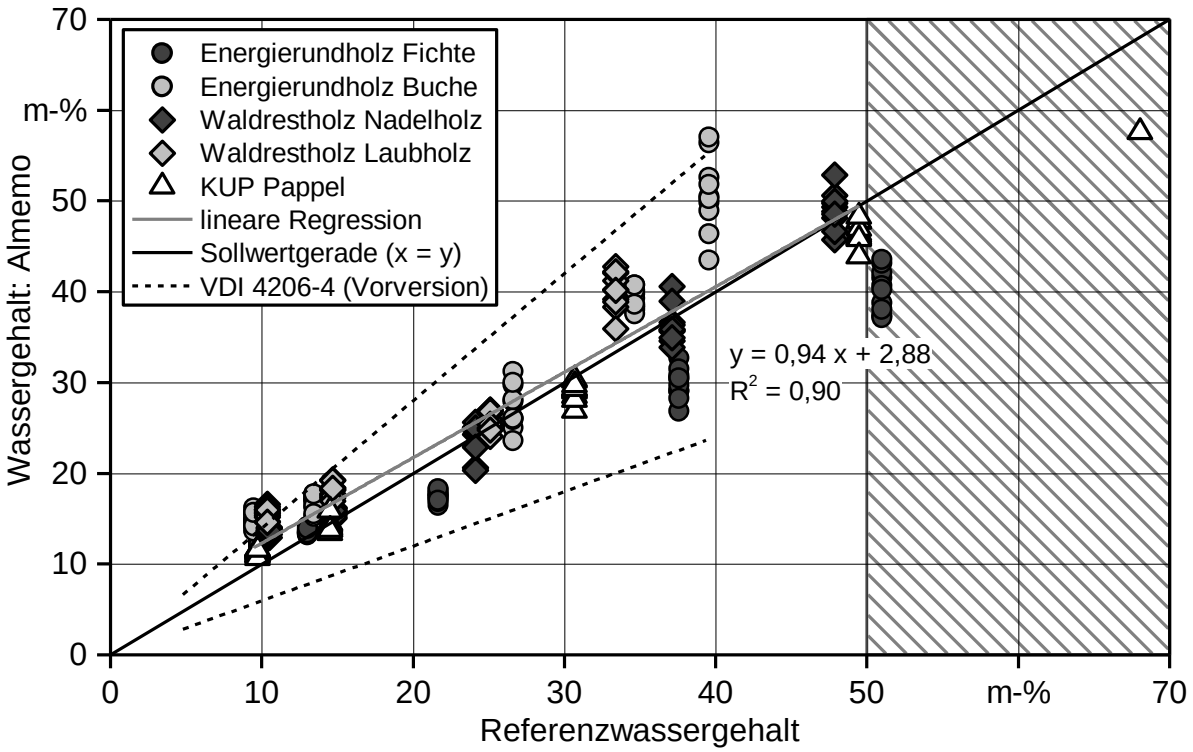


Abbildung 15: Wassergehaltsmessungen des Almemo im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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 ±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-% (±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 m-%). Ebenso zeigt sich auch hier wieder eine Abhängigkeit vom Sortiment, wobei die besten Ergebnisse wieder mit Waldrestholz aus Nadelholz erzielt wurden.

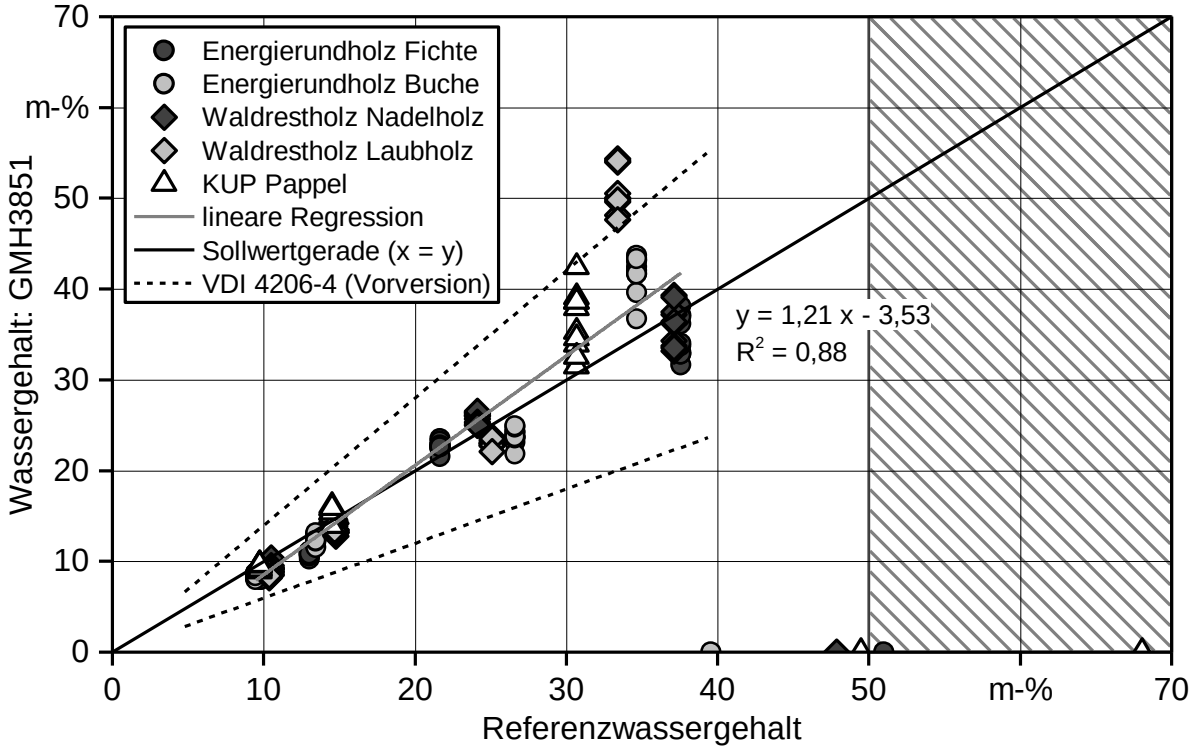


Abbildung 16: Wassergehaltsmessungen des GMH3851 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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 ±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-% (±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-%.

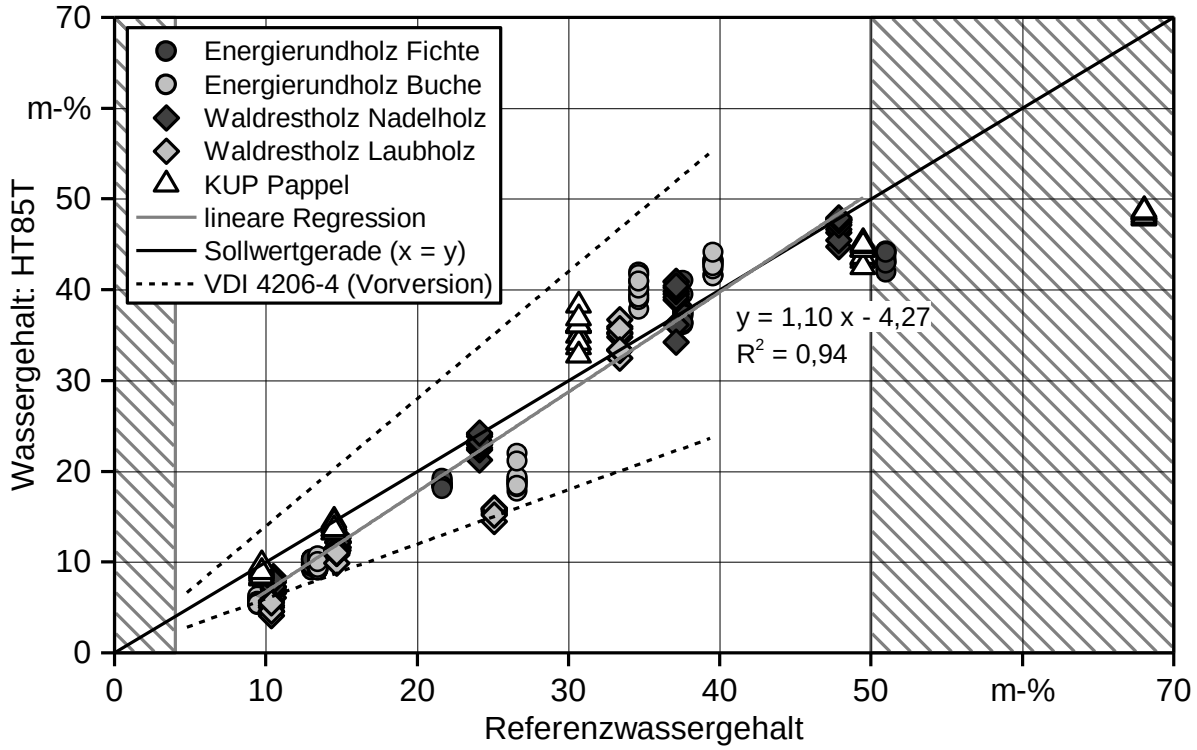


Abbildung 17: Wassergehaltsmessungen des HT85T im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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 ±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 m-% (±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 ±40 % nach der VDI 4206 Blatt 4 (Vorversion) zeigt gute Übereinstimmung bei Referenzwerten > 20 m-%, führte jedoch zu Überschreitungen bei < 20 m-%.

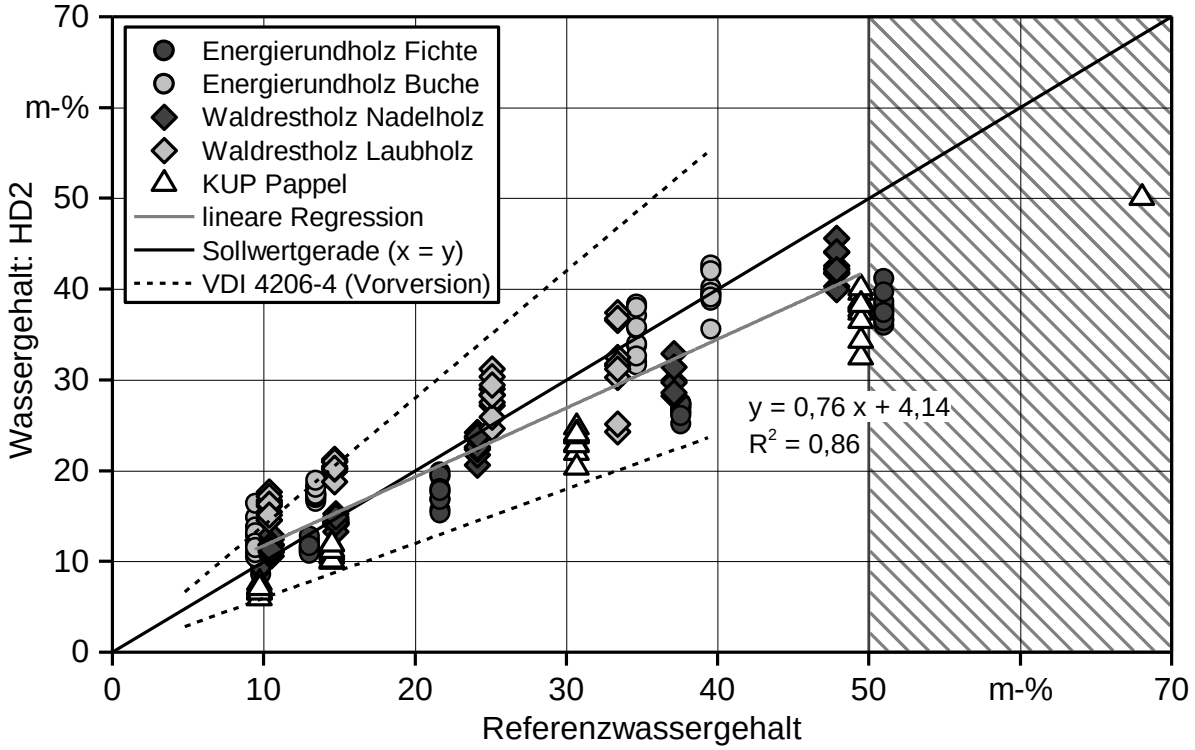


Abbildung 18: Wassergehaltsmessungen des HD2 im Vergleich zur Referenzmethode (schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des Gerätemessbereichs)

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 benutzer-eigene 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 holzartspezifische Kalibrierkurven für das Messgerät zur Verfügung stehen.

3.2.3.2 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).

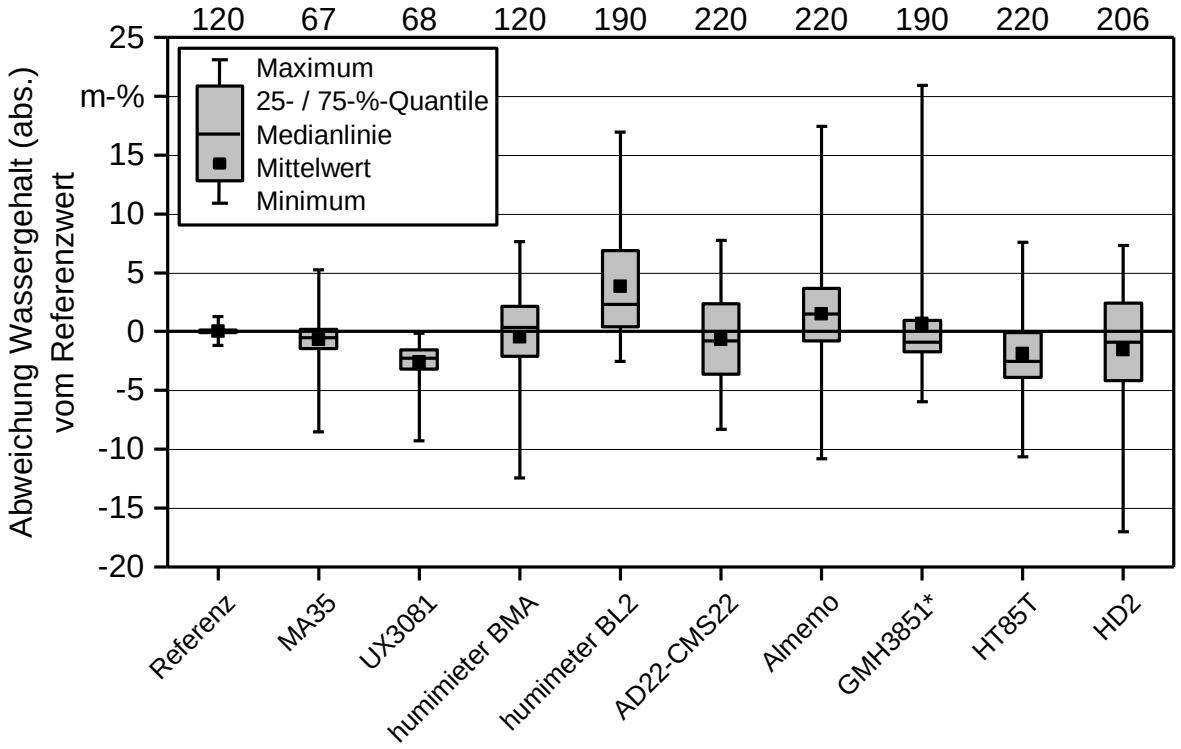


*Abbildung 19: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert (*Error-Messungen und Messungen außerhalb des jeweiligen Messbereichs wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)*

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.

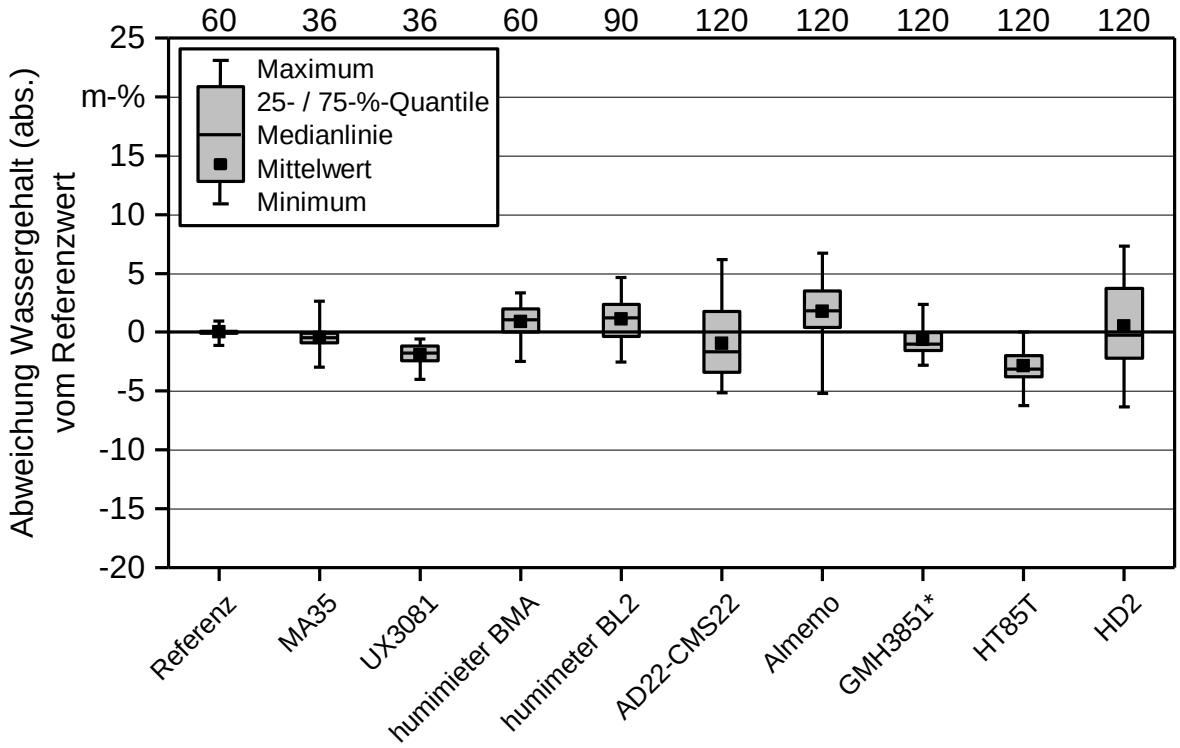


Abbildung 20: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs < 25 m-% (Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)

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.

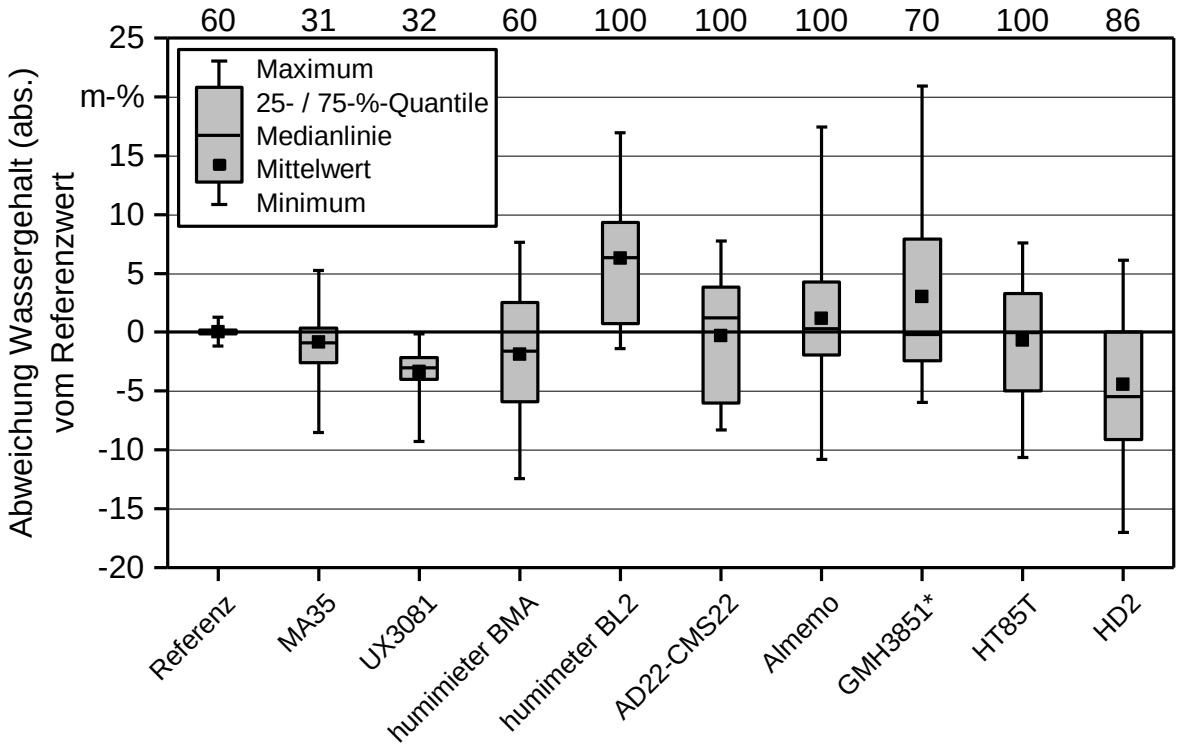


*Abbildung 21: Absolute Abweichung der Messungen mit den Schnellbestimmungsmethoden vom Referenzwert innerhalb eines Wassergehaltsbereichs >25 m-% (*Error-Messungen wurden aus dem Datensatz genommen. Zahlen oberhalb der Abbildung geben die Anzahl der Messungen wieder)*

3.2.3.3 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 [34].

Pappelhackschnitzel und Fichtenhackschnitzel zeigen 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.

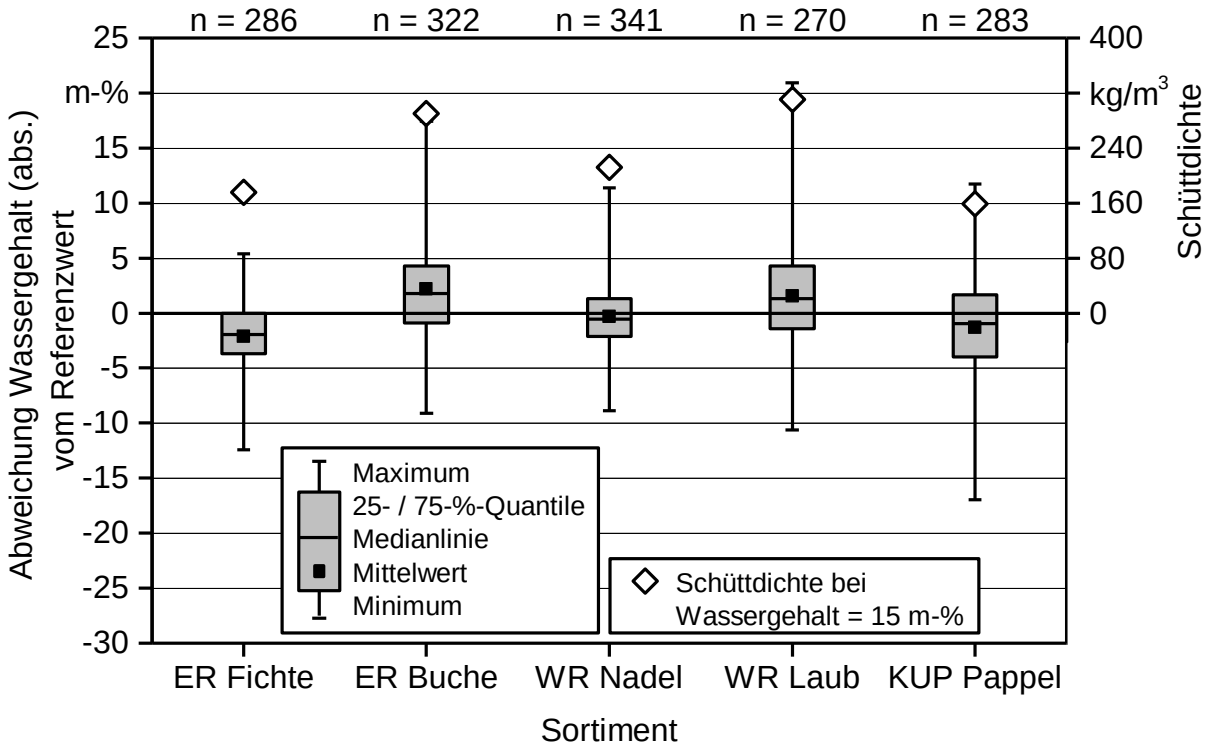


Abbildung 22: Einfluss der Schüttdichte (auf einem einheitlichen Wassergehalt von 15 m-%) der einzelnen Sortimente auf die Messgenauigkeit der Messgeräte (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb)

3.3 Exkurs: Versuchsreihe zur Schnellbestimmung des Wassergehalts mit dem Wöhler HF550 Holzfeuchtemessgerät / FW550 Feuchtewaage

Das Schnellbestimmungsgerät der Firma Wöhler Technik GmbH war zum Zeitpunkt der Versuchsreihe mit den mobilen Messgeräten (Abschnitt 3.2) 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 3.2 vergleichbar.

Das Messgerät besteht aus dem Holzfeuchtemessgerät HF550 in Kombination mit der Feuchtewaage 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 Feuchtewaage (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 [63].

3.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für den Versuchsaufbau wurde abweichend von den Versuchsreihen aus den Kapiteln 3.2 und 4 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 3.2.2 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 [13] geteilt. So konnte die Gesamtprobe auf die benötigte Probenmenge reduziert werden (vgl. Abschnitt 3.2.2).

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 [25]. Insgesamt wurde je Material die Messung viermal wiederholt (n = 5).

Anschließend wurde die restliche Probe analog dem Vorgehen in den Kapiteln 3.2 und 4 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 erneut gemessen.

Bei den 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 Kalibierkurve „Hackschnitzel" verwendet.

3.3.2 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
	EN*plus* 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.

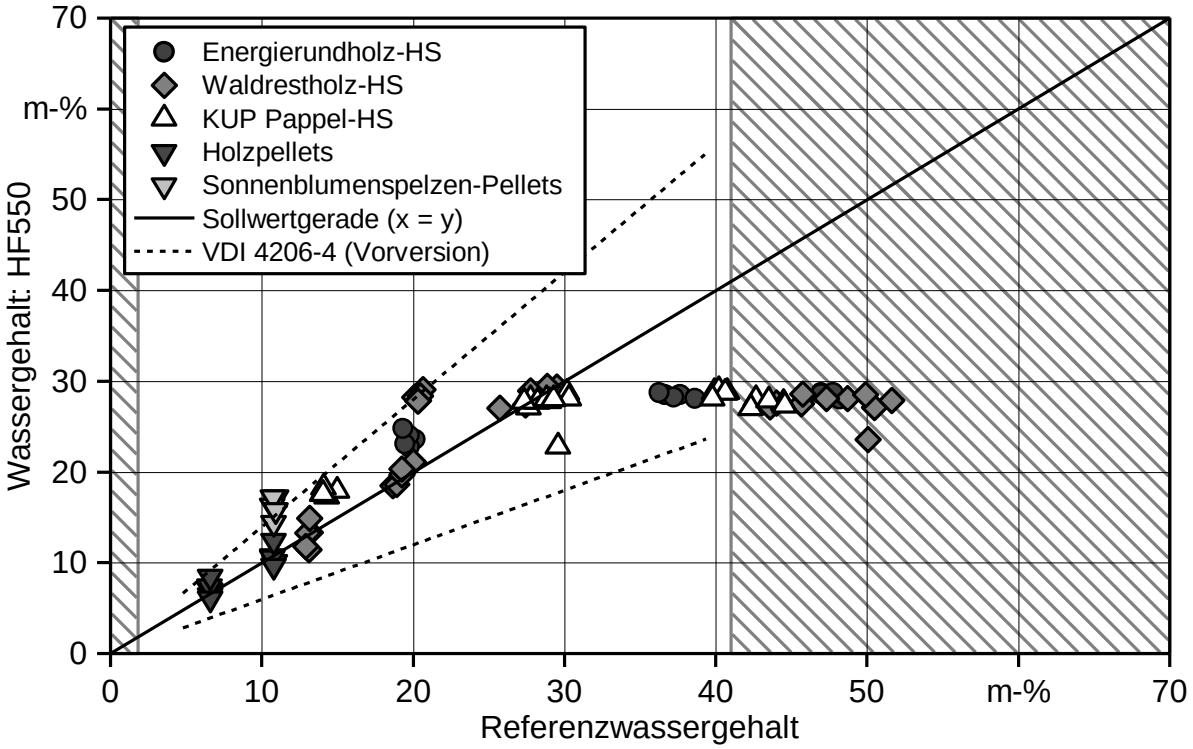


Abbildung 24: Wassergehaltsmessungen der HF550/FW550 im Vergleich zur Referenzmethode (HS = Hackschnitzel, schraffierter Bereich kennzeichnet Werte außerhalb des möglichen Messbereichs)

Durchschnittlich lag die mittlere Abweichung der HF550/FW550 bei -0,1 m-% (±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.

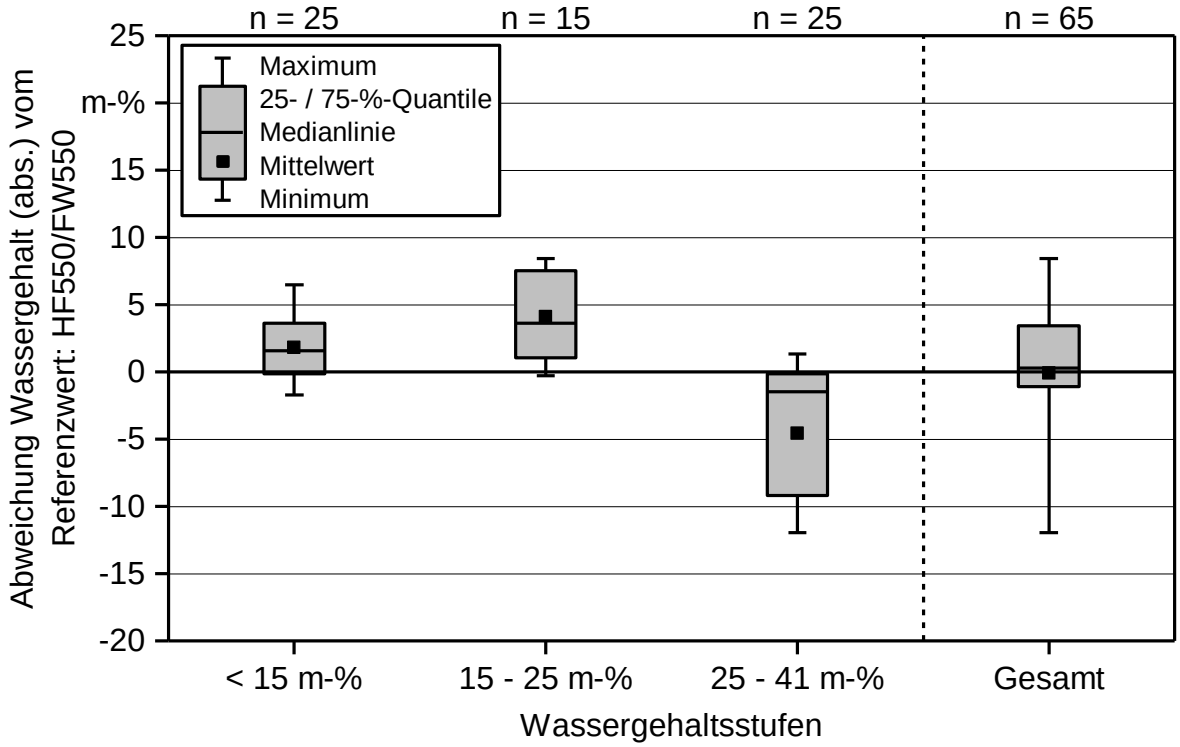


Abbildung 25: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 vom Referenzwert, getrennt nach unterschiedlichen Wassergehaltsstufen

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 3.2.3.3), 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 Waldrestholzhackschnitzel (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).

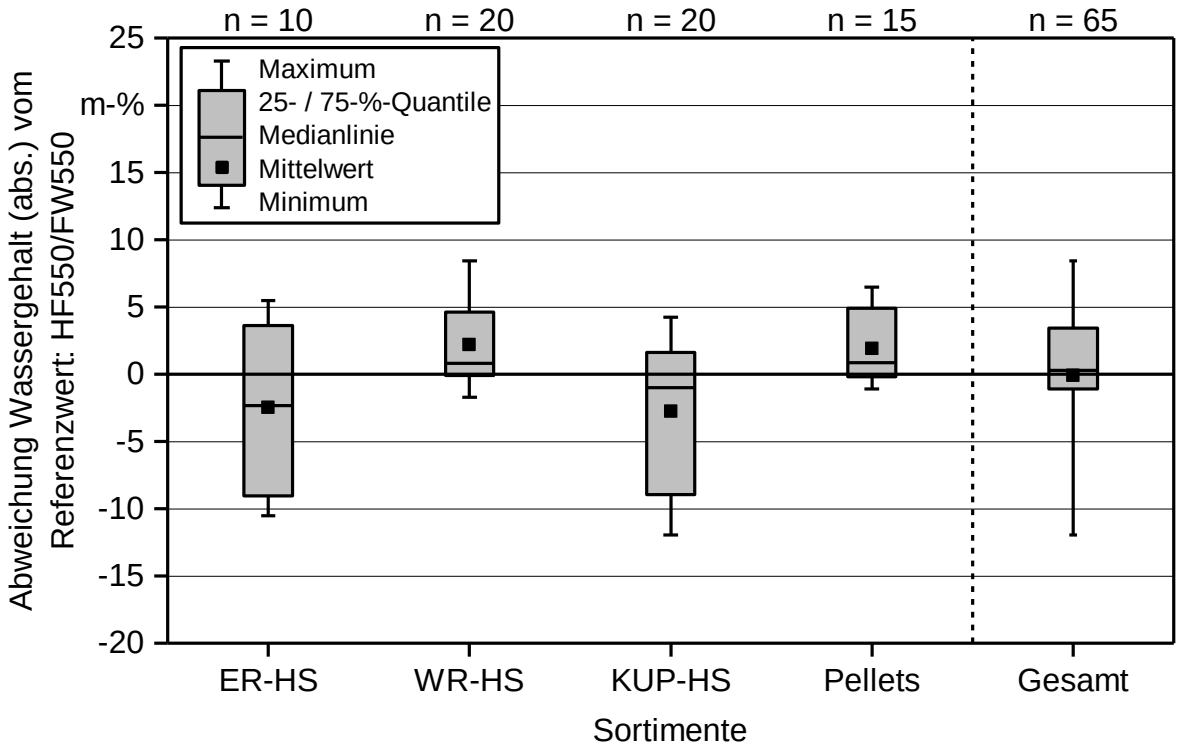


Abbildung 26: Abweichungen (absolut) der Messwerte des HF550/FW550 unterschiedlicher Sortimente vom Referenzwert (ER = Energierundholz, WR = Waldrestholz, KUP = Kurzumtrieb, HS = Hackschnitzel)

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 Feuchtewaage 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.

3.4 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, ob z. B. im Falle eines zu hohen Wassergehaltes eine Hackschnitzelcharge in einem Heizwerk nicht angenommen werden kann, sind die untersuchten Infrarottrockner aufgrund der hohen 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 oder bei der Pelletierung 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 werten. 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 [27] (Vorgängernorm der DIN EN ISO 17225 [15] [16]) 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 Einstechlanzen, ist 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 können 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 weiterhin die Trocknung einer repräsentativen Hackschnitzelprobe im Trockenschrank an. Für ein externes Audit im Fall einer Zertifizierung nach EN*plus* 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. 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.

4 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 3). 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 arbeitsextensive Bestimmung des Wassergehalts der gesamten Charge und damit um die Möglichkeit, die Brennstoffe nach dem Energiegehalt der Hackschnitzel 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.

4.1 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 Hochfrequenz-messung
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 Hochfrequenz-messung

Das **AMMS-0-1-2-0** der Firma ACO misst den Wassergehalt über das physikalische Messprinzip der Kapazitätsbestimmung im Hochfrequenzstreufeld (27 MHz). Der Messbereich 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/dm^2 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 3.2.1).

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.

4.2 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/dm^2 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 individuelle 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 Ofentrocknung im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-2 bestimmt [25]. 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 3.2) 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" beim Raumluft getrocknet wurden (siehe Abbildung 27a und vgl. Abschnitt 3.2.2).

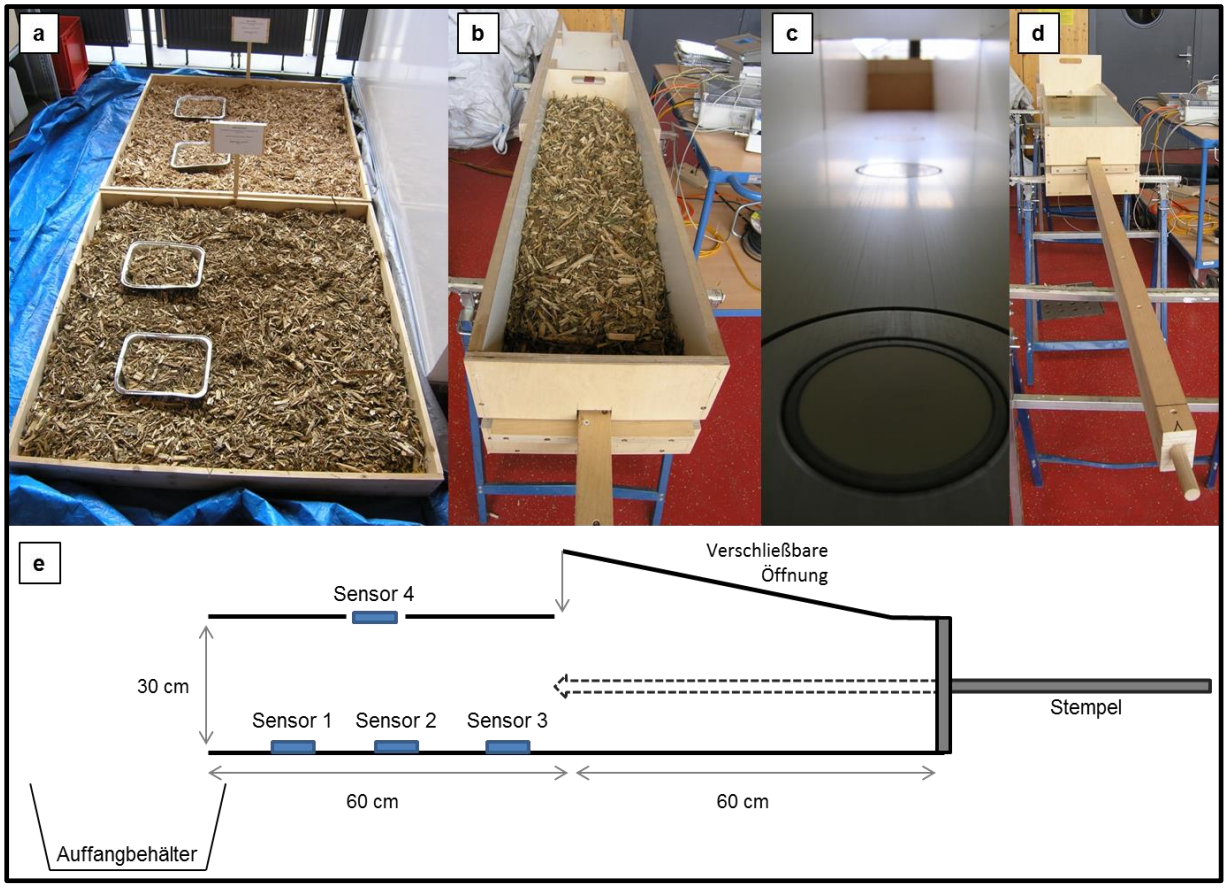


Abbildung 27: Versuchsaufbau: (a) untersuchte Hackschnitzelsortimente: Hackschnitzel aus Waldrestholz (Vordergrund) und Energierundholz (Hintergrund), (b) Messkanal befüllt mit Hackschnitzel, (c) Anbringung der Sensoren im Messkanal (d) geschlossener Messkanal mit Stempel und (e) schematischer Aufbau 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 erfolgt 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 [25] gezogen (n = 8).

Von jedem Brennstoffsortiment wurde zusätzlich vor Beginn der Messreihe eine Siebanalyse nach DIN EN ISO 17827-1 [21] und eine Schüttdichtebestimmung nach DIN EN ISO 17828 [22] durchgeführt.

4.3 Ergebnisse und Diskussion

Beide untersuchten Sortimente ließen sich nach DIN EN ISO 17225-1 [15] 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 beiden Sortimente gewählt.

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 [50].

Die Ergebnisse der Referenzwassergehalte der beiden Hackschnitzelsortimente und der jeweiligen Wassergehaltsstufe sind in Tabelle 7 aufgeführt.

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

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

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.

4.3.1 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 Wassergehalt 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.

Bei den Messungen mit den Waldrestholzhackschnitzeln 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-% (±2,1).

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

Sortiment	Messinstrument	Anzahl der Messungen (*n*)	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)

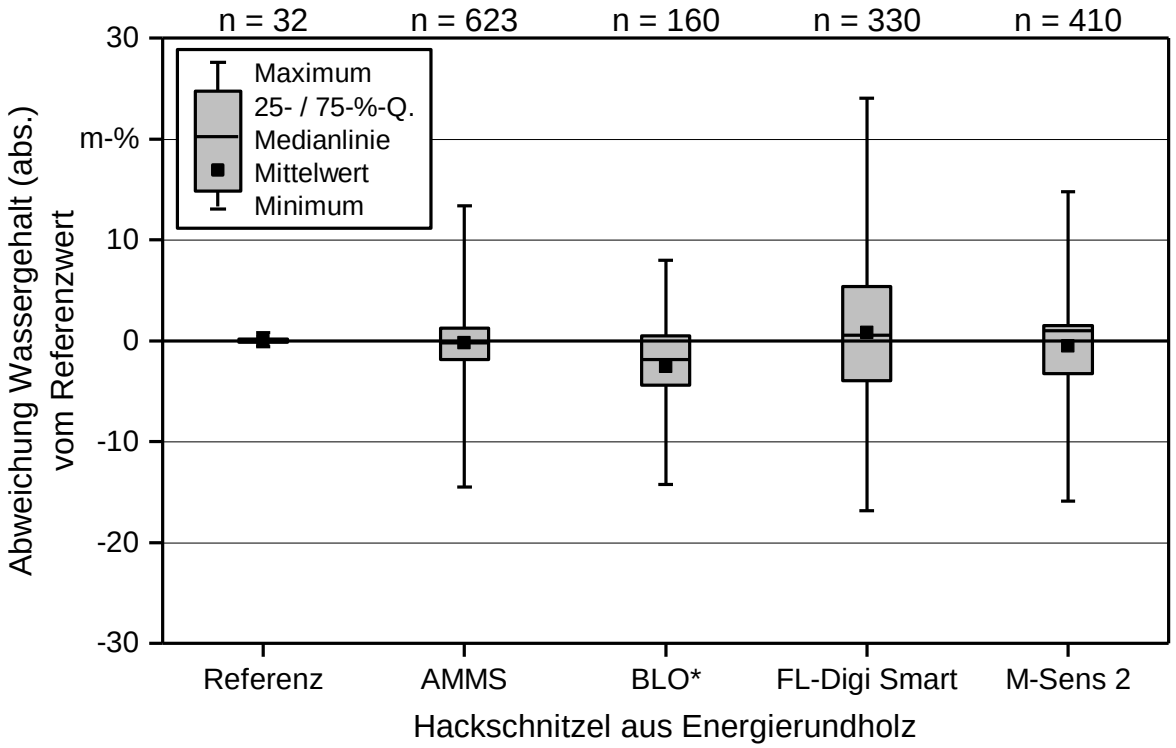


*Abbildung 28: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Energierundholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)*

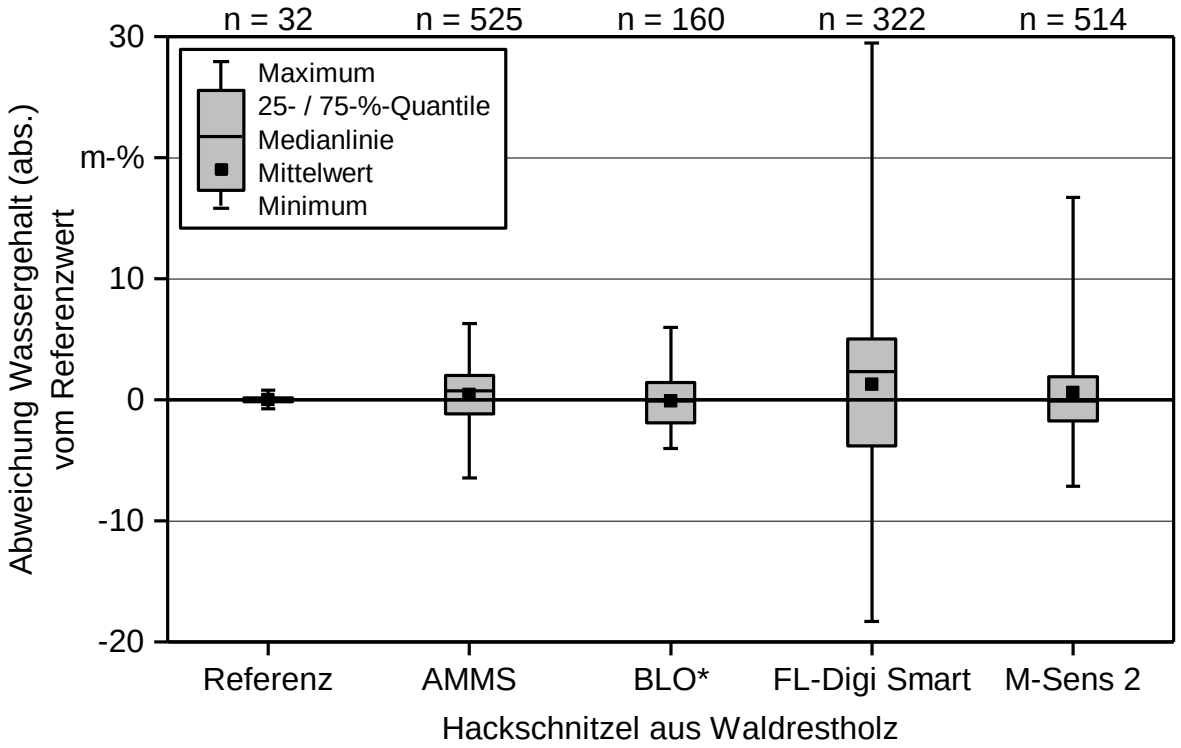


*Abbildung 29: Abweichungen der Messungen aller Online-Messgeräte bei Hackschnitzeln aus Waldrestholz (Nadelholz) (*voreingestellte Kalibrierung)*

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 3) 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, sortimentsspezifischen Kalibrierkurve oder die Erstellung einer eigenen Kalibrierung durch eigene Messwerte zu empfehlen.

4.3.2 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 3). 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.

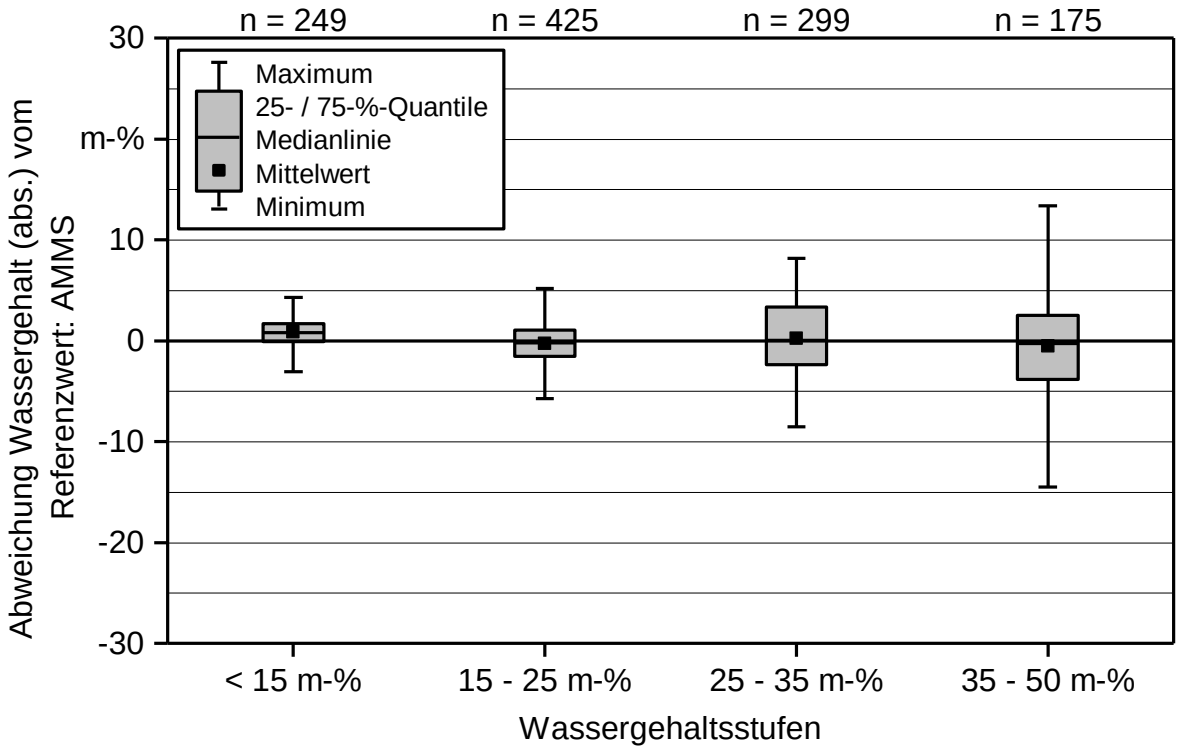


Abbildung 30: Abweichung der Messwerte des AMMS-0-1-2-0 (ACO Automation Components) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

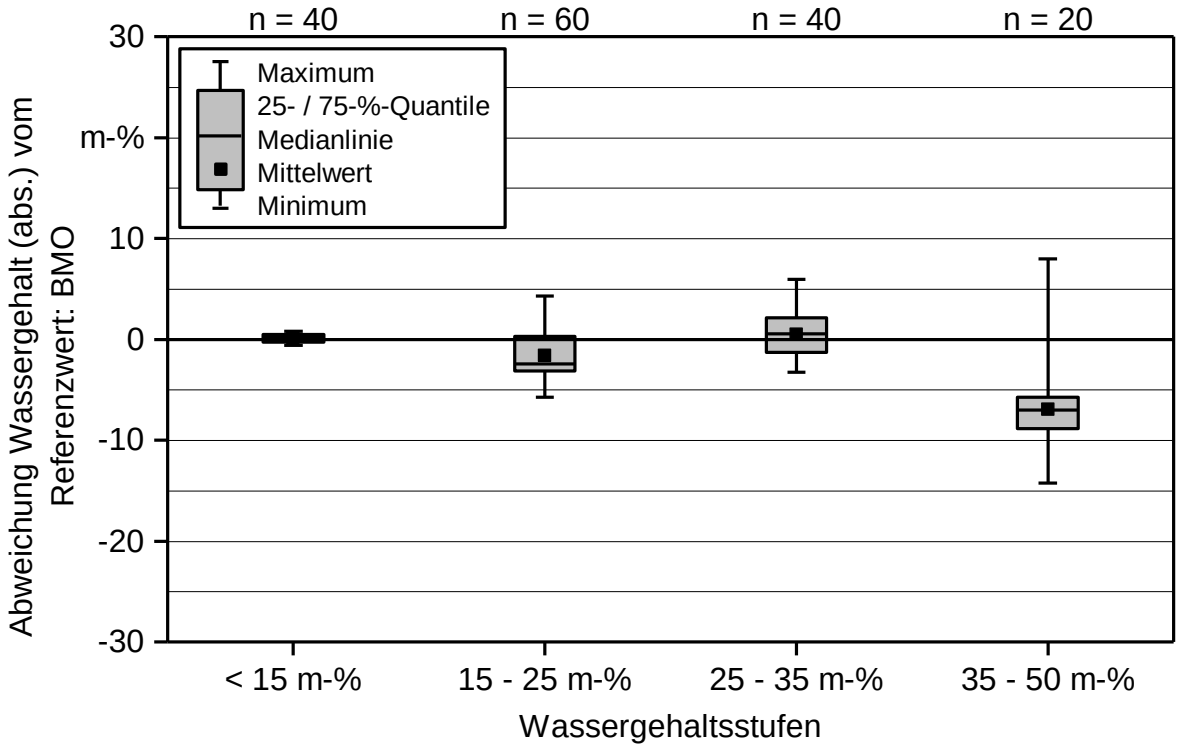


Abbildung 31: Abweichung der Messwerte des BLO (Schaller GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

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-%, Energierundholz) 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.

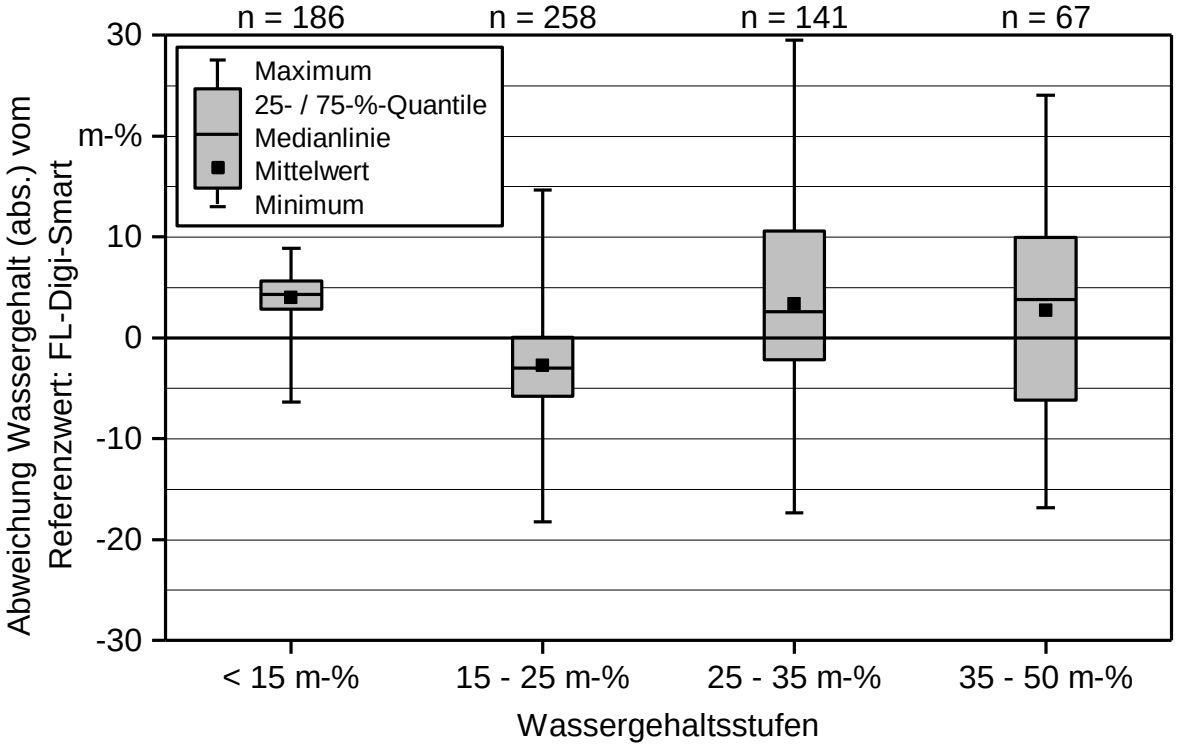


Abbildung 32: Abweichung der Messwerte des FL-Digi Smart Basic (Franz Ludwig GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen

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.

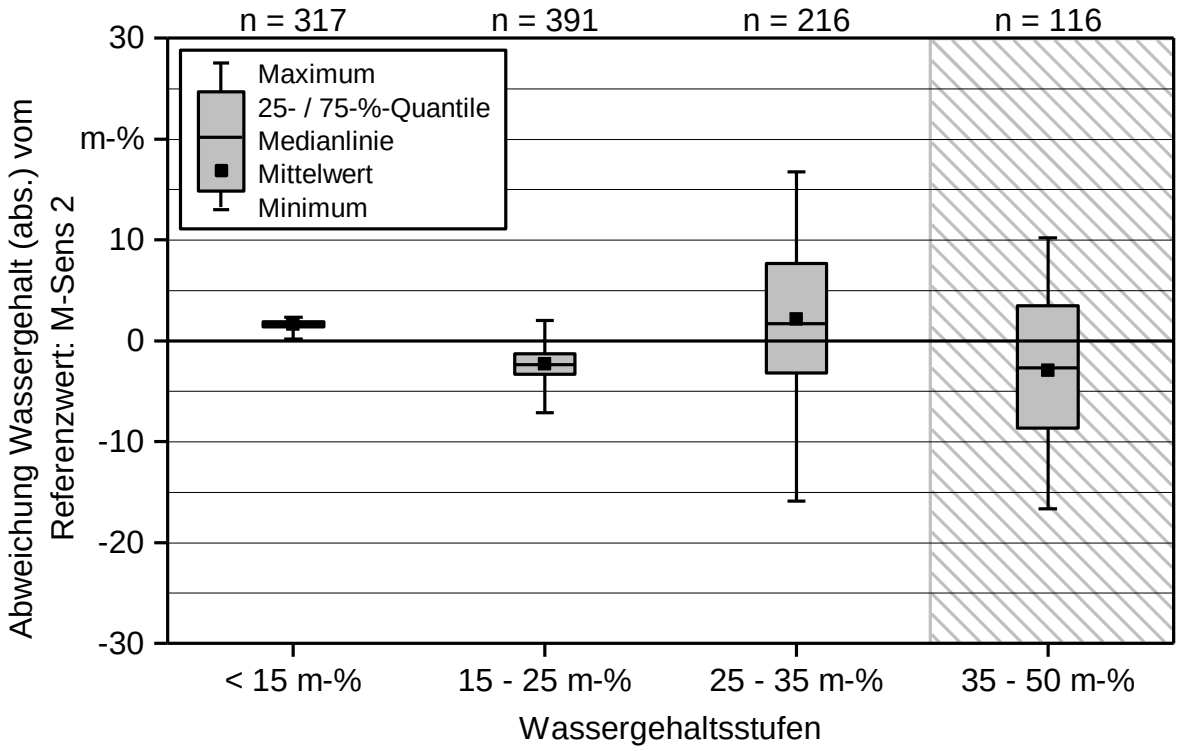


Abbildung 33: Abweichungen der Messwerte des M-Sens 2 (SWR Engineering Messtechnik GmbH) vom Referenzwert nach Wassergehaltsstufen (schraffierter Bereich: Messbereich überschritten, Messung in den Berechnungen nicht berücksichtigt)

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.

4.4 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 zuordenbar ist. Für die Anpassung der Verbrennungseinstellungen eines Heizkessels an einen schwankenden Wassergehalt sollte die Präzision ebenfalls ausreichend sein.

5 Fallstudie zur Homogenisierung des Brennstoffs

In der Praxis existiert eine Vielzahl an Methoden für die Abrechnung von Hackschnitzeln und damit eine große Verunsicherung bezüglich des optimalen Verfahrens. Als genaueste Methode wird die Abrechnung der Hackschnitzel nach Gewicht bei einem definierten Wassergehalt diskutiert (siehe auch Teilvorhaben 1). Eine hohe Streuung des Wassergehalts innerhalb einer Hackschnitzelcharge erfordert somit ein möglichst repräsentative Probenahme, da durch eine selektive Messung der mittlere Wassergehalt stark über- bzw. unterschätzt werden kann. Diese Schwankungen können vor allem bei sehr heterogenen Materialien, z. B. bei Hackschnitzeln aus Lagermieten, deutlich höhere Messungenauigkeiten hervorrufen als die in Kapitel 3 und 4 dargestellten Messverfahren.

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens 2 des Projekts „HackZert“ war es daher, neben der Messgenauigkeit von Schnellbestimmungsmethoden auch Hilfestellung bei der Probenahme und der Homogenisierung von größeren Hackschnitzelchargen zu geben. Dies wurde im Rahmen einer Fallstudie analysiert, bei der eine mögliche Homogenisierung von Hackschnitzeln aus einer sehr heterogenen Lagermiete begleitet wurde, die durch die Umschlagsprozesse vom Lagerplatz bis zur Feuerung stattfindet. Als übergeordnete Zeitpunkte der Probenahme wurden der Lagerplatz, der Transport vom Lagerplatz zur Feuerung und die Zwischenlagerung im Bunker verglichen.

5.1 Material und Methoden

Die Fallstudie wurde an einer nicht abgedeckten Lagermiete aus Energierundholzhackschnitzeln nach einer Lagerdauer von fünf Monaten durchgeführt. Die Lagermiete war als erster Beprobungsschritt gewählt worden, um einen Brennstoff mit einem möglichst inhomogenen Ausgangswassergehalt vorzufinden. Weitere Beprobungen fanden beim anschließenden Beladen des LKW-Containers für den Transport der Hackschnitzel am Lagerort, beim Entladen des LKW am Heizwerk und im Hackschnitzelbunker statt. Insgesamt wurden folgende Umschlagsorte zur Beprobung gewählt:

- die Lagermiete (Abbildung 34-1)
- das Umladen der Hackschnitzel für den Transport (Abbildung 34-2)
- der Transportcontainer (Abbildung 34-3)
- das Abkippen der Brennstoffe in den Hackschnitzelbunker (Abbildung 34-4)
- der Hackschnitzelbunker (Abbildung 34-5)
- direkt vor der Hackschnitzelfeuerung (Abbildung 34-6)

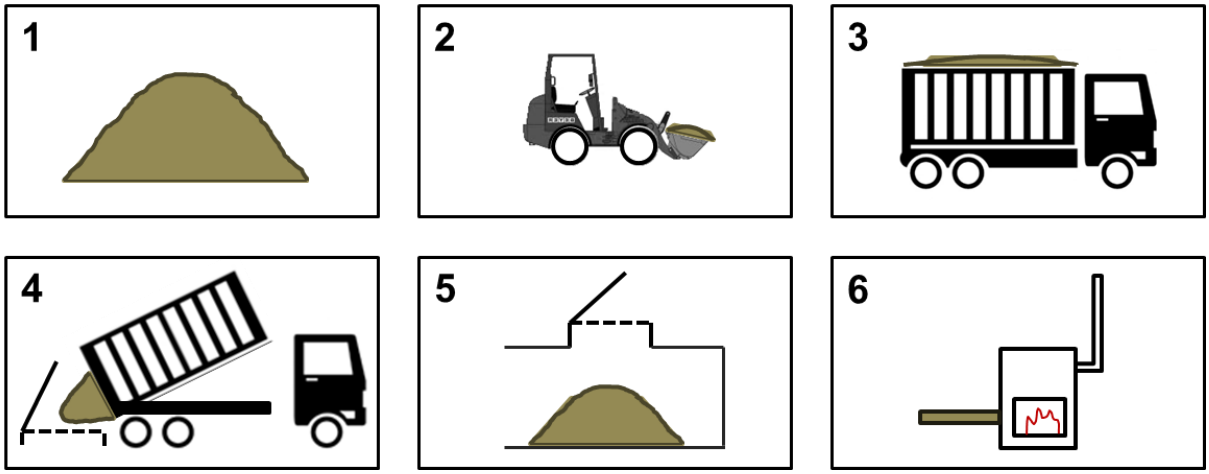


Abbildung 34: Darstellung der Probenahmezeitpunkte entlang der Umschlagsprozesse: 1 – am Lagerplatz, 2 – beim Umladen in den Container, 3 – im Container, 4 – beim Abkippen in den Bunker, 5 – im Bunker, 6 – vor der Feuerung

Als erster Probenahmezeitpunkt wurde die Miete in unberührtem Zustand gewählt. Hierfür wurde an der Miete ein vertikaler Querschnitt freigelegt (Abbildung 35). An diesem wurde an 12 rasterförmig angeordneten Punkten Proben für die Wassergehaltsbestimmung gezogen. Hierdurch sollte im Mittel der Querschnitt der Miete repräsentativ dargestellt werden und Informationen über eine mögliche Zonenbildung gewonnen werden.

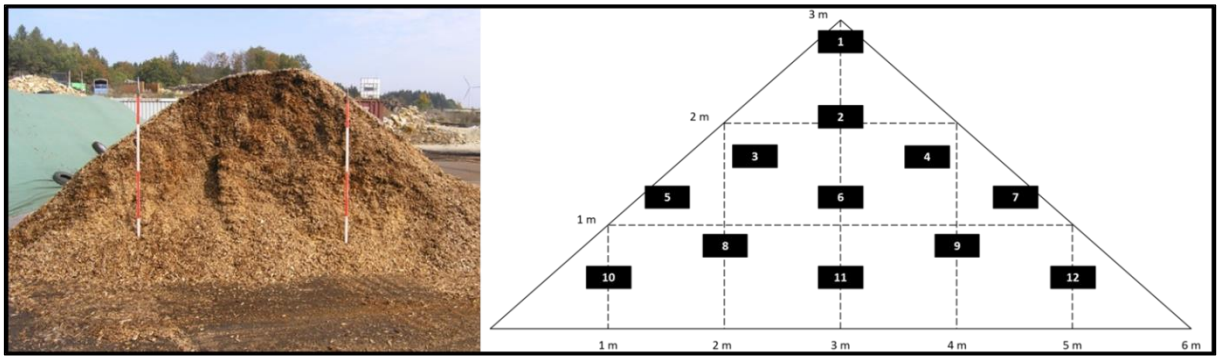


Abbildung 35: Querschnittprofil der untersuchten Lagermiete (links) und Probenahmepunkte im Querschnitt (rechts)

In einem nächsten Schritt wurde entlang des freigelegten Querschnitts ein ca. 3 m langes Segment schaufelweise mit dem Radlader abgetragen und in einen Transportcontainer umgefüllt. Bei diesem Vorgang wurden aus jeder Radladerschaufel 3 Proben zur Wassergehaltsbestimmung gezogen (Abbildung 36). Insgesamt wurden 12 Radladerschaufeln und somit 36 Proben bei diesem Prozessschritt entnommen.

Abbildung 36: Umladen der Lagermiete in den Transportcontainer

Der Container wurde an das 130 km entfernte, hauseigene Heizwerk des TFZ (1,3 MW, Müller Heiztechnik) nach Straubing transportiert. Bei Ankunft wurden zunächst 12 Proben an der Containeroberfläche gezogen (Abbildung 37). Die 12 Proben wurden so angeordnet, dass 4 Proben den Randbereich der Oberfläche abdeckten, 4 den mittleren Bereich und 4 die Kernzone.

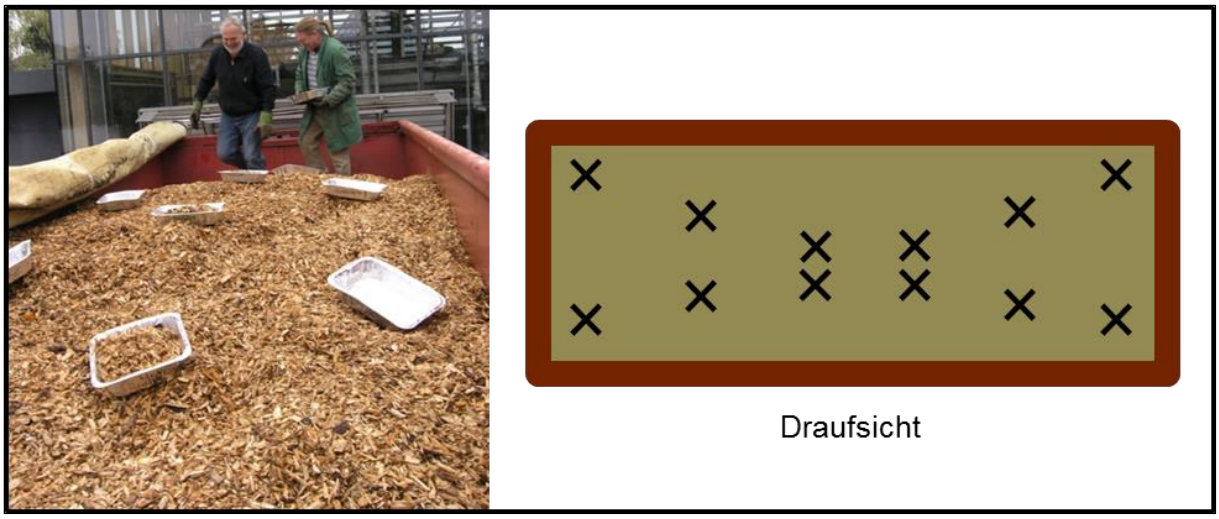


Abbildung 37: Probenahme und Verteilung der Probenahmepunkte an der Hackschnitzeloberfläche im Container

Beim nächsten Prozessschritt, dem Abkippen der Hackschnitzel in den Bunker, wurden weitere Proben gewonnen (Abbildung 38). Zunächst wurden mit einem modifizierten Jaucheschöpfer mit Stiel (6,5 l Innenvolumen, ø 24 cm) aus dem fallenden Gutstrom während des gesamten Prozesses 36 Proben entnommen (n = 36, Variante a). Des Weiteren wurde gleichzeitig eine Regentonne mit Einzelproben aus dem Gutstrom gefüllt. Nach dem Befüllen wurden die Hackschnitzel aus der Tonne homogenisiert und in An-

lehnung an DIN EN ISO 14780 [13] repräsentativ geteilt. Aus dieser sehr gut durchmischten Gesamtprobe wurden 3 Teilproben für die Bestimmung des Wassergehalts gezogen (n = 3, Variante b). Variante b sollte eine Alternative zu Variante a mit ihrer sehr großen Einzelprobenanzahl bilden. Die Variante mit Regenfass bietet demnach eventuell die Möglichkeit, mit einem geringeren Arbeits- und Zeitaufwand ein gutes Messergebnis zu erzielen.

Abbildung 38: Probenahme beim Abkippen der Hackschnitzel in den Bunker (a), sammeln der Proben als Gesamtprobe (b)

Nach dem Abkippvorgang wurden an der Schüttung im Bunker 12 Proben an der Schüttungsoberfläche genommen. Die Anordnung der Probenahmepunkte erfolgte nach demselben Raster wie schon bei der Probenahme im Container (siehe Abbildung 39). Vor dem Abkippen der Hackschnitzel in den Hackschnitzelbunker, wurde der gesamte Lagerraum gesäubert. Eine Vermischung des Materials mit vorherigen Hackschnitzellieferungen kann somit ausgeschlossen werden.

Der letzte Probenahmezeitpunkt war direkt vor der Feuerung in bewegtem Gut. Dadurch gab es keine räumliche Anordnung der Probenahmepunkte, sondern eine zeitliche Festlegung des Probenahmezeitpunktes. Die Probenahme erfolgte konstant über 2 Tage hinweg und wurde tagsüber alle drei Stunden durchgeführt. Dabei wurde mit einer Futterschaufel aus einer Luke nach dem Steigförderer (siehe Abbildung 40) jeweils eine Probe mit 2 Wiederholungen entnommen (n = 3).

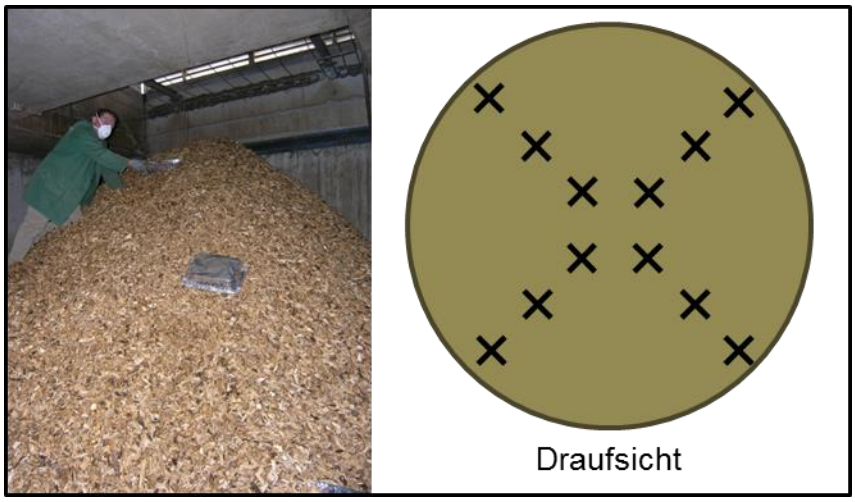


Abbildung 39: Probenahmepunkte an der Schüttung im Bunker

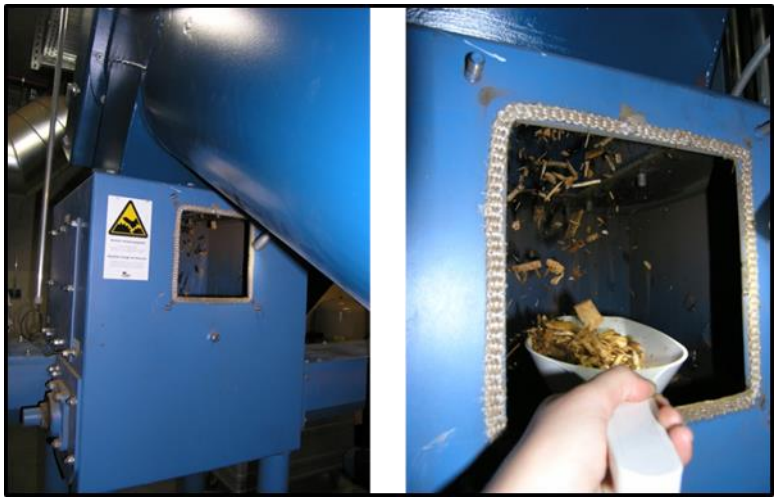


Abbildung 40: Probenahme vor der Hackschnitzelfeuerung

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Am Lagerplatz wurde ein mittlerer Wassergehalt von 41,0 m-% festgestellt (Abbildung 42). Die 12 Messwerte über den Mietenquerschnitt zeigten eine maximale Abweichung von 27,3 m-% (absolut) vom Mittelwert. Auf der sonnenexponierten Seite wurde an der Mietenoberfläche ein Wassergehalt von 19,2 m-% gemessen, wohingegen der Wassergehalt an der obersten Spitze der Miete bei 68,4 m-% lag (Abbildung 41). Dieser sehr unnatürliche hohe Wassergehalt entstand wahrscheinlich durch Niederschlagsereignisse sowie durch Verdunstungs- und Kondensationsprozesse.

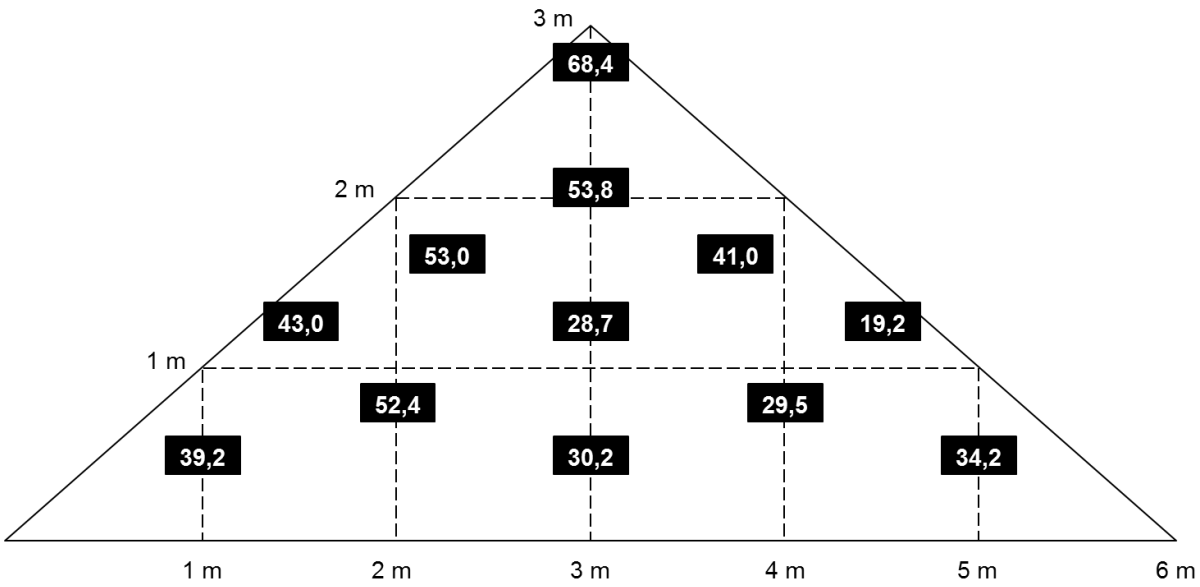


Abbildung 41: Messungen des Wassergehalts (m-%) an den 12 Probenahmepunkten im Mietenquerschnitt

Bei der Verladung der Hackschnitzel von der Miete in den Transportcontainer lag der Wassergehalt durchschnittlich bei 41,9 m-%. Im Vergleich zum Mietenquerschnitt gab es keine signifikanten Unterschiede (T-Test nach Student). Die Streuung der Messwerte konnte bereits bei diesem Schritt reduziert werden (siehe Abbildung 42).

Nach der Lieferung an das TFZ-Heizwerk wurde an der Containeroberfläche ein signifikant höherer Wassergehalt festgestellt ($p \leq 0{,}05$; T-Test nach Student). Aufgrund eines technischen Defekts an der hauseigenen Hackschnitzelheizung und der daraufhin notwendigen Wartungs- und Reparaturarbeiten kam es vor der Lieferung an das TFZ zu einem zeitlichen Verzug von 6 Tagen. Während dieser Zeit mussten die Hackschnitzel im Container zwischengelagert bleiben. Zum Schutz sollte dieser beim Lieferanten mit einer Plane abgedeckt werden, um eine Zunahme im Wassergehalt durch Niederschlagsereignisse zu verhindern. Trotzdem wurde eine deutliche Zunahme im Wassergehalt an der Oberfläche festgestellt. Im Mittel lag der Wassergehalt der Hackschnitzellieferung um 4,2 m-% (absolut) höher. Umgerechnet auf das Gesamtgewicht der Hackschnitzel würde diese Zunahme eine Gewichtszunahme von 342 kg bedeuten. Laut dem Deutschen Wetterdienst wurde in einer nahegelegenen Wetterstation eine Niederschlagsmenge von 26 l/m^2 in der Region während diesen 6 Tagen gemessen [11]. Dies entspricht umgerechnet auf die Containeroberfläche eine Niederschlagssumme von 353 l. Die Vermutung liegt somit nahe, dass der Niederschlag Ursache für die Veränderung im Wassergehalt gewesen sein müsste und dass der Container trotz Vorgabe nicht mit einer Plane abgedeckt war. Diese Zunahme wurde auch bei den nachfolgenden Wassergehaltsmessungen beobachtet. Daher wurde der Wassergehalt an der Containeroberfläche wahrscheinlich nicht allein durch Verdunstungsprozesse und eine Umverteilung des Wassergehalts verursacht. Ob die Hackschnitzel tatsächlich abgedeckt ge-

wesen sind, wie der Lieferant behauptet hat, kann im Nachgang nicht mehr festgestellt werden.

Beim Abkippen der Hackschnitzel in den Bunker zeigte Variante b (Fass, siehe Abbildung 42) eine deutlich geringere Streuung über die drei Messwerte als die arbeitsintensivere Variante a (Einzelproben während des Abkippvorgangs). Im Mittel lagen beide Varianten sehr nahe beieinander. Durch die Wassergehaltsbestimmung von nur drei Einzelproben der Variante b im Vergleich zu den in dieser Studie analysierten 36 Proben der Variante a kann nicht nur Zeit sondern auch Trockenschrankkapazitäten gespart werden. Somit wird der Laboraufwand deutlich verringert.

Durch das Abkippen in den Bunker kam es wiederum zu einer Homogenisierung der Hackschnitzel, was sich in der geringeren Streuung der Wassergehalte der Proben aus dem Bunker im Vergleich zu Variante a zeigt. Durch die Bewegung der Hackschnitzel im Bunker über den Schubboden und von dort über die Förderschnecke zur Feuerung kam es zu einer weiteren Durchmischung. Die maximale Abweichung vom gemessen Mittelwert bei der letzten Probenahme direkt vor der Hackschnitzelfeuerung lag bei -2,7 m-%.

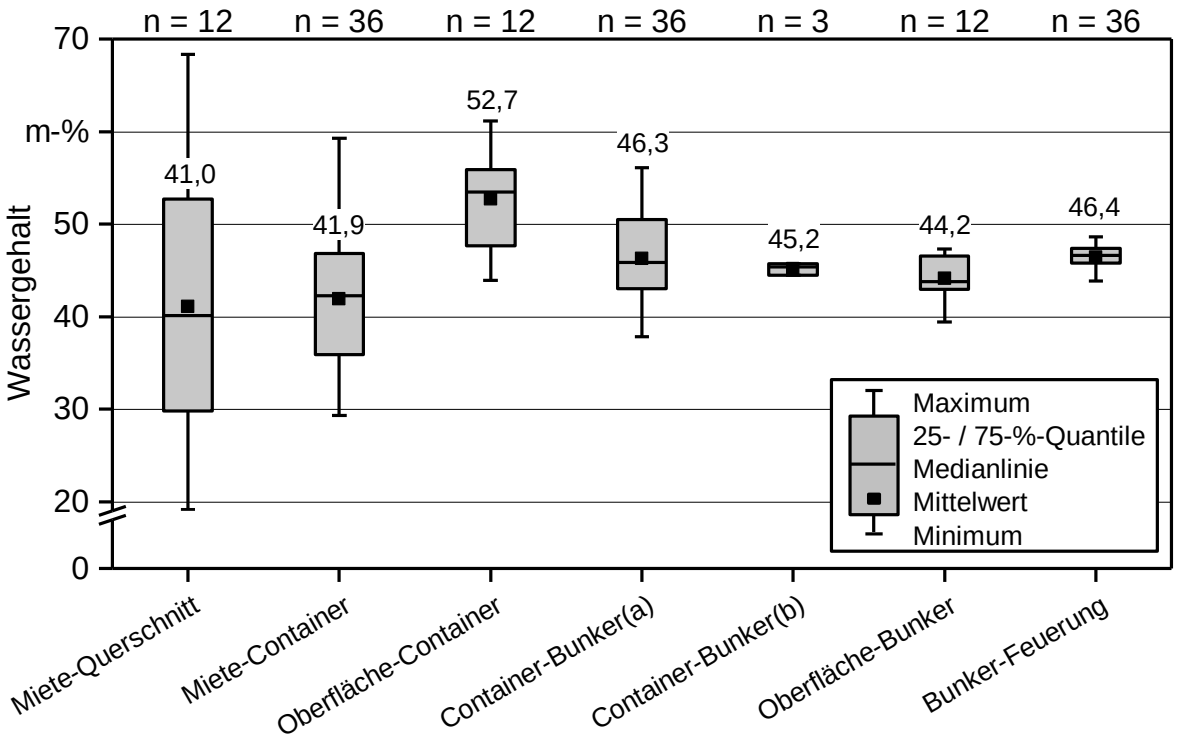


Abbildung 42: Vergleich der Messwerte des Wassergehalts an allen Umschlagsorten

Insgesamt nahm die Streuung des Wassergehalts vom Lagerplatz bis zur Feuerung deutlich ab. Es kam somit zu einer Homogenisierung des Wassergehalts alleine durch die Umschlagsprozesse während der Lieferung. Die Ergebnisse dieser Fallstudie zeigen somit, dass die Notwendigkeit einer zusätzlichen Homogenisierung des Brennstoffs mittels Radlader beim Abbau der Miete hinterfragt werden kann.

Die Probenahme an einer Lagermiete stellt den größten Arbeitsaufwand dar. An dieser Schnittstelle ist die exakte Probenahme sowie die Probenanzahl ausschlaggebend für ein genaues Messergebnis. Einzelwerte können hier am stärksten streuen. Eine Probenahme an Lagermieten sollte daher nur zur Abschätzung des aktuellen Wassergehalts erfolgen, nicht jedoch für Abrechnungszwecke der zu liefernden Charge.

Die geringste Streuung der Einzelwerte konnte bei der Probennahme direkt vor der Feuerung erzielt werden. Allerdings ist hier der Wassergehalt stark beeinflusst von der Verweildauer der Hackschnitzel im Bunker sowie auch von der Vermischung mit womöglich anderen Sortimenten und Hackschnitzellieferungen. Zudem ist aus Sicht des Arbeitsschutzes eine Probenahme im Hackschnitzelbunker oder an Fördereinrichtungen vor der Feuerung meistens nicht empfehlenswert. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass selbst extreme Schwankungen im Wassergehalt des Ausgangsmaterials bis zur tatsächlichen Verwendung in der jeweiligen Feuerung durch die Bewegung der Brennstoffe deutlich verringert werden können.

Die Probenahme beim Abkippen in den Bunker ist der Umschlagsort, der beim Verkauf bzw. beim Kauf von Hackschnitzeln den sinnvollsten Ort der Abrechnung darstellt. An diesem Umschlagsort können sowohl Verkäufer als auch Käufer anwesend sein, wodurch eine möglichst große Transparenz bei der Probenahme geboten wird. Der Arbeitsaufwand kann hier verringert werden, indem für die Gewinnung einer homogenen und repräsentativen Teilprobe ein leeres, sauberes Fass während des Abkippprozesses befüllt wird. Zur Homogenisierung könnte das Fass verschlossen und mit der zu untersuchenden Hackschnitzelcharge über den Asphalt gerollt werden. Hierdurch wird der Aufwand einer manuellen Homogenisierung mit Schaufeln erleichtert.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind als Fallstudie zu betrachten und sind somit nicht allgemeingültig. Ebenso muss der Erfolg einer Homogenisierung mittels Fass noch überprüft werden. Die Fallstudie wird in zukünftigen Projekten des TFZ wiederholt und im Hinblick auf allgemein gültige Empfehlungen überprüft.

6 Feuerungsversuche mit Hackschnitzelqualitäten nach EN*plus*

Für die erfolgreiche Etablierung eines Zertifikats für Holzhackschnitzel muss sich neben der Umsetzbarkeit der Anforderungen beim Brennstoffproduzenten auch ein Mehrwert für den Kunden ergeben, der zertifizierte Hackschnitzel einkaufen soll. Neben einem transparenten Abrechnungsverfahren und einer vereinfachten Brennstoffwahl (siehe Teilvorhaben 1) sind hier vor allem ein störungsfreier und emissionsarmer Betrieb von Hackschnitzelfeuerungen zu nennen. Idealerweise lassen sich mit zertifizierten Hackschnitzeln sogar die strengen Emissionsgrenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV auch ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen einhalten.

In Teilvorhaben 2 wurden deshalb Feuerungsversuche mit nach EN*plus*-Vorgaben konformen Hackschnitzelqualitäten durchgeführt. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden insgesamt 13 Holzhackschnitzel unterschiedlicher Qualität und Herkunft von 6 Lieferanten bezogen und hinsichtlich ihrer physikalischen und inhaltsstofflichen Brennstoffeigenschaften nach DIN EN ISO Normen für biogene Festbrennstoffe untersucht. Diese wurden im Anschluss in zwei Hackschnitzelfeuerungen (50 kW und 100 kW) unterschiedlicher Hersteller und Feuerungstechnologien verbrannt und hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens bewertet.

6.1 Material und Methoden

6.1.1 Brennstoffanalysen und Bewertung

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der Normen, die den durchgeführten Brennstoffanalysen der 13 Brennstoffe zugrunde liegen. Die Probenahme erfolgte bei Anlieferung der Brennstoffe in Anlehnung an DIN EN ISO 14780 [13]. Dabei wurden separat Proben für den Wassergehalt und die Siebanalyse gewonnen. Ebenfalls erfolgt die Analyse der Schüttdichte bei Anlieferung der Brennstoffe. Die Proben für die Siebanalyse wurden bei Raumtemperatur getrocknet. Nach der Siebanalyse wurden diese Proben mit einer Laborschneidmühle (Fritsch Pulverisette 19) auf < 0,5 mm gemahlen und zur Heizwert- und Aschegehaltsbestimmung sowie für die Elementaranalysen verwendet.

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte mittels der Trockenschrankmethode (Binder FED 720-02-42004) nach DIN EN ISO 18134-2 [25], die Heizwertbestimmung mittels Bombenkalorimeter (IKA C 2000 basic) nach DIN EN ISO 18125 [24]. Die Schüttdichtebestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 17828 [22], die Aschegehaltsbestimmung nach DIN EN ISO 18122 [23]. Nach den Probenahmen wurde von jedem Brennstoff die Partikelgrößenverteilung durch eine Siebanalyse (3 Einzelbestimmungen) nach DIN EN ISO 17827-1 [21] ermittelt. Dabei wurden Rundlochsiebe mit Lochweiten von 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm, und 63 mm verwendet.

Tabelle 9: Brennstoffanalysen nach DIN EN ISO Norm (wf = wasserfreie Bezugsbasis, lutro = luftgetrocknet)

Qualitätsparameter	Labor	n	Methode
Wassergehalt (in m-%)	TFZ	≥ 6	DIN EN ISO 18134-2/3
Aschegehalt (in m-%, wf)	TFZ	6	DIN EN ISO 18122
Heizwert (in MJ/kg, wf)	TFZ	6	DIN EN ISO 18125
Schüttdichte (in kg/m^3, wf)	TFZ	3	DIN EN ISO 17828
Partikelgrößenverteilung (in m-%, lutro)	TFZ	3	DIN EN ISO 17827-1
Gesamtgehalt an C, H und N (in m-%, wf)	extern	1*	DIN EN ISO 16948
Hauptelemente (in mg/kg, wf)	extern	1*	DIN EN ISO 16967
Spurenelemente (in mg/kg, wf)	extern	1*	DIN EN ISO 16968
Chlor und Schwefel (in m-%, wf)	extern	1*	DIN EN ISO 16994

*Mischprobe aus 3 gemahlenen Einzelproben

Die inhaltsstofflichen Analysen der gemahlenen Brennstoffproben wurden von der EUROFINS Umwelt Ost GmbH durchgeführt. Die Bestimmung der Hauptbestandteile Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) erfolgte nach DIN EN ISO 16948 [18], Schwefel (S) und Chlor (Cl) nach DIN EN ISO 16994 [20]. Der Gehalt an Sauerstoff (O) ergibt sich rechnerisch über den Abzug aller übrigen Elemente von der wasserfreien Gesamtbiomasse. Die weiteren für die Verbrennung eine wichtige Rolle spielenden Elemente Kalium (K), Natrium (Na), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) sowie die Bestimmung der Schwermetalle nach DIN EN ISO 16968 [19] bestimmt.

Zur Bewertung der Brennstoffe wurde neben den oben beschriebenen Brennstoffparametern noch die Summe der aerosolbildenden Elemente, das molare Silizium zu Kalium Verhältnis und weitere neu entwickelte Brennstoffindizes zur Beurteilung der Verunreinigung der Brennstoffe herangezogen, die nachfolgend kurz erläutert werden sollen.

Die Summe von Kalium (K), Natrium (Na), Zink (Zn) und Blei (Pb), die sogenannten „aerosolbildenden Elemente“, wird oft als Indikator für zu erwartende Feinstaubemissionen < 1 µm (PM1) herangezogen [29] [59]. Die aerosolbildende Eigenschaft der genannten Inhaltsstoffe liegt an der Tatsache begründet, dass ein Teil dieser schwer- und leichtflüchtigen Elemente (hierzu zählen auch S und Cl) bei der Verbrennung im Glutbett aus dem Brennstoff in die Gasphase übergehen und später koagulieren oder an Oberflächen (z. B. von Wärmetauscher oder an anderen Partikeln) kondensieren können [59]. Generell kann Biomasse hinsichtlich des Gehalts an Aerosolbildnern folgendermaßen unterteilt werden [59]:

- niedriger Aerosolbildung: < 1.000 mg/kg (z. B. rindenfreies Holz zur Pelletierung),
- mittlerer Aerosolbildung: 1.000 bis 10.000 mg/kg (z. B. Rinde, Waldrestholz) und
- hoher Aerosolbildung: > 10.000 mg/kg (Stroh, Gras)

Wenn Silizium im Verhältnis zu Kalium in einer hohen Konzentration vorliegt werden bevorzugt Kaliumsilikate gebildet. Hierdurch wird mehr K in die Asche eingebaut und somit auch die K-Freisetzung in Partikelform reduziert, d. h., es sinken die Partikelemissionen und damit die Emission an Gesamtstaub. Dieser Effekt kann sich ab einem molaren Si/K-Verhältnis von ca. 2,5 bemerkbar machen [59].

Gute Indikatoren für eine Verschmutzung mit Bodenmaterial stellen der Aluminium-, Eisen-, Mangan- und Siliziumgehalt dar. Der Nachweis erfolgt z. B. mittels neu entwickelter Brennstoffindizes (Fe/Mn-Verhältnis, Al/200-Koeffizient) [29].

6.1.2 Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen mit den 13 Holzhackschnitzelchargen wurden alle an einer 100 kW Drehrostfeuerung (Kessel B) und, für die Brennstoffe 1 bis 9 sowie Brennstoff 13, zusätzlich an einer 50 kW Kipprostfeuerung (Kessel A) durchgeführt. In Kessel A kamen weniger Brennstoffe zum Einsatz, da die Nutzung von Hackgut mit einer Partikelgrößenklasse P45S (Brennstoffe 10, 11 und 12) in diesem Leistungsbereich als nicht typisch angenommen wurde.

Je Brennstoff wurden 4 Messungen der gasförmigen und der partikelförmigen Emissionen mit einer Dauer von 30 Minuten im stationären Betrieb bei Volllast durchgeführt. Hierzu wurden die Anlagen vor Versuchsbeginn so lange betrieben, bis sich bei voller Leistungsanforderung stationäre Vor- und Rücklauftemperaturen einstellten.

Die Anordnung der Messgeräte sowie der allgemeine Prüfstandsaufbau sind in Abbildung 43 dargestellt. Die Abgasmessstrecke besteht aus Edelstahlrohren (V2A). Die Messung der Staubemissionen nach VDI 2066 [62] (Staubprobenahmeapparatur Paul Gothe GmbH) sowie des Abgasvolumenstromes (Höntzsch GmbH Flügelrad Strömungssensor ZS25/25-ZG4) erfolgte in einem auf 100 mm Durchmesser verjüngten Abschnitt der Abgasmessstrecke. Die Messung der Gaskomponenten (CO, CO_2, NO_X, H_2O und CH_4) erfolgte mittels FTIR (Gasmet FTIR CX-4000), die Sauerstoffmessung paramagnetisch (M&C O_2-Analysator PMA 100) und die Messung der organischen Kohlenwasserstoffe mittels Flammenionisationsdetektor (Mess- & Analysentechnik GmbH CnHm-Analysator ThermoFID) im unverjüngten Teil der Abgasmessstrecke (180 mm). Die Erfassung des Brennstoffmassenstroms erfolgte durch kontinuierliche Wägung des Brennstoffbehälters mittels einer Abbrandwaage (Mettler-Toledo GmbH Plattformwaage 600 kg MT KD600).

Die verwendeten Hackschnitzelkessel wurden wasserseitig an eine Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen, die den Anforderungen der DIN EN 303-5 [26] zur Erfassung der Wärmeleistung entspricht. Dadurch kann die abgegebene Nutzwärme direkt über den Wasserdurchfluss (Endress + Hauser Promag 53) und die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur (PT100 Thermokon) ermittelt werden. Gleichzeitig kann über diese Wärmeleistungsmessstrecke die Abnahme der Wärmeleistung vom Kessel geregelt werden (Volllast und Teillastbetrieb).

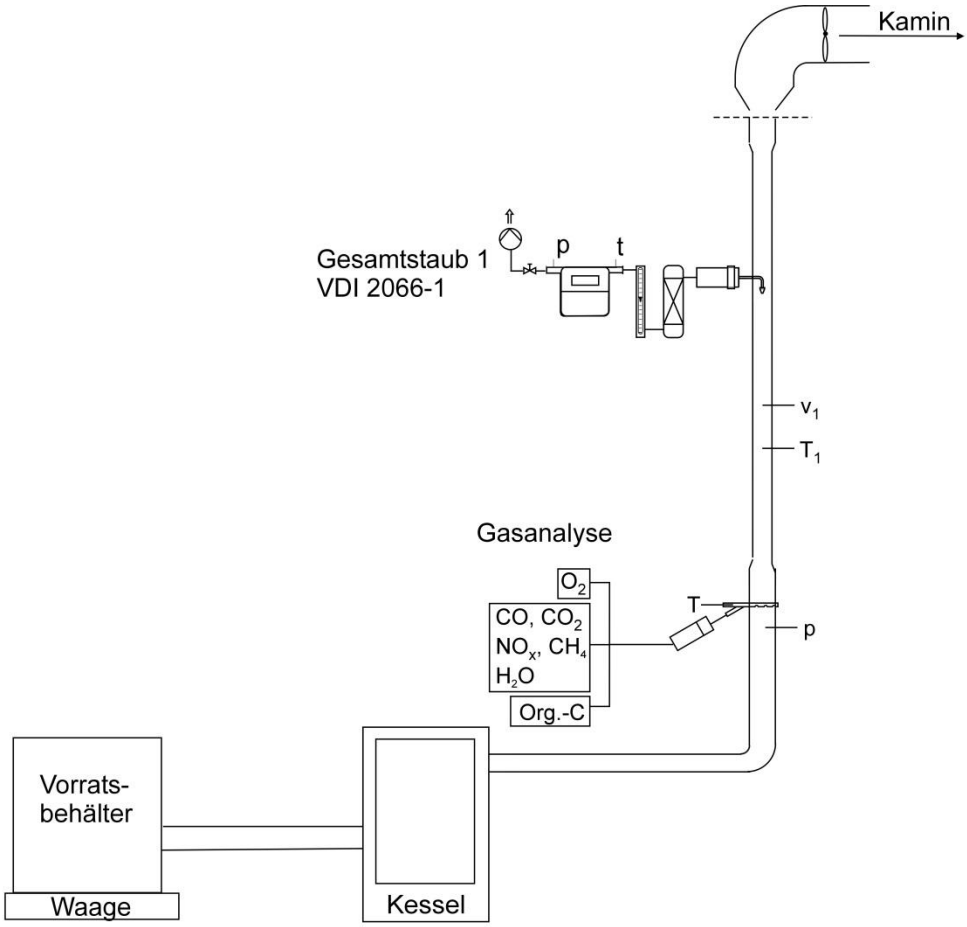


Abbildung 43: Prüfstandsaufbau und Anordnung der Messgeräte für beide eingesetzten Hackschnitzelfeuerungen

Bei der 50 kW Anlage handelt es sich um eine Kipprostfeuerung mit seitlichem Einschub. Die Entaschung erfolgt durch Abkippen des Rosts in den Aschekasten. Die Wärmeabfuhr vom Rauchgas an den Wärmekreis erfolgt über einen stehenden Rohrwärmetauscher mit integrierten Turbulatoren, die gleichzeitig zur automatischen Abreinigung dienen. Diese Feuerung wurde auch in den ebenfalls über das BMEL und die FNR finanzierten Verbundprojekten „OptiChip“ und „qualiS“ verwendet. Daher können für diese Feuerung auch Vergleiche zu den Ergebnissen dieser beiden parallel laufenden Projekte gezogen werden.

Bei der 100 kW Anlage handelt es sich um eine Drehrostfeuerung mit Unterschub. Die Entaschung erfolgt durch Drehen des Rosts in den Aschekasten. Die Wärmeabfuhr vom Rauchgas an den Heizkreislauf erfolgt über einen stehenden Rohrwärmetauscher mit integrierten Turbulatoren, die gleichzeitig der automatischen Abreinigung dienen.

6.2 Ergebnisse zur Brennstoffqualität

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der 13 gelieferten Brennstoffe und dazugehörige Angaben der Brennstoffproduzenten nach EN*plus*.

Tabelle 10: Übersicht der vom Brennstofflieferanten übermittelten Informationen zu den gelieferten Brennstoffen

Nr.	Lieferanteninformation zum Brennstoff	Lieferant	Hackschnitzelklassifizierung nach Lieferantenaussage[1]
1	Energierundholz, getrocknet, gesiebt	A	EN*plus* A, P31S, M15
2	Sägerestholz	B	EN*plus* A, P31S, M15
3	Waldrestholz aus Nadelholz, aufbereitet	C	EN*plus* A, P31S, M15
4	Sägerestholz	D	EN*plus* A, P31S, M25
5	Energierundholz	A	EN*plus* A, P31S, M35
6	Energierundholz, gesiebt	A	EN*plus* A, P31S, M35
7	Waldrestholz aus Nadelholz	C	EN*plus* B, P31S, M15
8	Straßenbegleitholz	E	EN*plus* B, P31S, M25
9	Waldrestholz, getrocknet, gesiebt	D	keine Angabe
10	Waldhackschnitzel	F	EN*plus* A, P45S, M25
11	Waldhackschnitzel (Waldrestholz)	F	EN*plus* A, P45S, M35
12	Grob entastetes Kronenholz	A	EN*plus* B, P45S, M35
13	Sägerestholz	E	EN*plus* A, P31S, M15

[1]Klassifizierung bei der Bestellung erfolgte nach Entwurf EN*plus*-Handbuch vom 24.05.2016 nach zwei Klassen EN*plus* A und B. Eine Unterteilung in EN*plus* A1 und A2 war zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgesehen.

Tabelle 11: Spezifikationen für ENplus-Holzhackschnitzel (aus ENplus-Zertifizierungshandbuch, Version 1.0, Stand 1. September 2016) [28]

Eigenschaft	Einheit	EN*plus* A1	EN*plus* A2	EN*plus* B
Wassergehalt [a)]	m-%	≥ 8 bis ≤ 25	≤ 35	ist anzugeben
Aschegehalt [b)]	m-%	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Heizwert [a)]	kWh/kg	Ist anzugeben		
Partikelgröße [c)]		P31S oder P45S		
Grobanteil [d)]	m-%	≤ 6 in P31S (> 45 mm) und ≤ 10 in P45S (> 63 mm)		
Feinanteil (< 3,15 mm)	m-%	≤ 5	≤ 8	≤ 10
Maximale Länge [e)]	mm	120 (für P31S) 150 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)	150 (für P31S) 200 (für P45S)

[a)] Anlieferungszustand, [b)] Wasserfreier Zustand, [c)] Hauptanteil ≥ 60 %, in P31S: 3,15–31,5 mm, in P45S: 3,15–45 mm, [d)] Maximaler Querschnitt in P31S: 4 cm^2, in P45S: 6 cm^2, [e)] In einer Probe von 10 l dürfen höchstens 2 Stücke mit einer Querschnittsfläche < 0,5 cm^2 sein.

Die Klassifizierungsanforderungen nach EN*plus* (Zertifizierungshandbuch Version 1.0, Stand 1. September 2016) sind in Tabelle 11 wiedergegeben [28]. Zusätzlich müssen die Anforderungen nach DIN EN ISO 17225-4 hinsichtlich der inhaltsstofflichen Konzentrationen (N, S, Cl, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni und Zn) für eine Einteilung nach EN*plus* erfüllt sein [16].

6.2.1 Physikalische Brennstoffqualität (Heizwert, Wassergehalt, Schüttdichte, Aschegehalt und Partikelgrößenverteilung)

Tabelle 12 zeigt die Messergebnisse für die physikalische Brennstoffqualität der 13 untersuchten Hackschnitzelchargen. Der Wassergehalt lag für die meisten Proben ≤ 35 m-% und damit innerhalb der Spezifikationen nach EN*plus* A2. Lediglich bei Brennstoff 5 wurde der Wassergehalt geringfügig überschritten, er entspricht damit EN*plus* B.

Tabelle 12: Heizwert (H_u), Wassergehalt (M), Schüttdichte (BD), Aschegehalt (A), Feinanteil (F) und Partikelklasse nach DIN EN ISO 17225-4 der untersuchten Brennstoffe bei Anlieferung (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand, f = vor Feuerungsversuch)

Nr.	H_u in MJ/kg, wf	M_1 in m-%, ar	M_2 in m-%, f	*BD** in kg/m³, wf	*A* in m-%, wf	*F* in m-%	Partikelklasse nach DIN EN ISO 17225-4
1	19,08	15,3 (± 0,5)	12,5	156	0,6	0,1	P31S
2	18,73	7,6 (± 0,2)	9,6	165	0,3	2,0	P31S
3	18,49	10,0 (± 0,3)	10,1	282	1,3	3,5	P31S
4	18,80	20,7 (± 3,2)	21,9	154	1,1	2,0	P31S
5	19,05	**36,0 (± 2,8)**	30,7	197	0,6	3,2	P31S
6	19,02	30,9 (± 0,3)	30,7	187	0,6	0,0	P31S
7	18,73	12,9 (± 0,1)	12,9	299	2,2	**24,0**	-
8	17,66	14,2 (± 1,3)	8,8	231	**4,9**	**15,2**	-
9	18,80	25,9 (± 0,8)	19,8	163	1,2	0,6	P45S
10	18,34	21,7 (±1,8)	20,8	177	0,6	6,3	P45S
11	18,71	29,8 (± 0,3)	29,8	194	1,7	8,1	P45S
12	18,46	33,8 (± 3,5)	34,4	207	1,0	2,2	P45S
13	18,64	26,7 (± 2,9)	26,5	173	0,5	2,3	-

Erläuterung: Die mit Fettdruck markierten Werte und Brennstoffnummern zeigen Überschreitungen der Mindestvorgaben für EN*plus*-B. M_1 gibt den Mittelwert ± Standardabweichung wieder (n ≥ 6). *Bei der Berechnung der wasserfreien Schüttdichte wurde die Schrumpfung unterhalb des Fasersättigungspunktes (25 m-% Wassergehalt) berücksichtigt.

Der Wassergehalt von frischem Hackgut liegt typischer Weise bei ca. 45 bis 60 m-% [45] [50]. Daher ist es zwingend erforderlich Hackschnitzel, die als EN*plus* A1 oder A2 zertifiziert werden sollen, mittels geeigneter Maßnahmen zu trocknen. Dies kann für EN*plus*

A2 zum Beispiel vor dem Hacken mittels Trocknung des Holzes im Polter oder nach dem Hacken durch Mietentrocknung geschehen [45]. Innerhalb einer Vegetationsperiode lassen sich so Wassergehalte von ca. 30 m-% erreichen, wobei der Trocknungserfolg jedoch von der Witterung, dem Standort, dem zu lagernden Material und einer optionalen Abdeckung/Überdachung beeinflusst wird. Eine Garantie für den Trocknungserfolg auf einen bestimmten Zielwassergehalt gibt es nach aktuellem Wissen nicht. Zudem ist gerade bei der Lagerung frischer Hackschnitzel in Mieten mit hohen Trockenmasseverlusten zu rechnen. Sehr niedrige Wassergehalte ≤ 15 m-% (z. B. für EN*plus* A1) sind dagegen i. d. R. nur mit technischen Trocknungsverfahren zu erreichen.

Der Wassergehalt von Brennstoff Nr. 5 lag zum Zeitpunkt der Probenahme > 36,0 m-%. Allerdings lag der Wassergehalt zum Zeitpunkt des Feuerungsversuches (M_2) bereits bei 30,7 m-%, weshalb dieser Wert später für die Klassifizierung des Brennstoffs nach EN*plus* herangezogen wird.

Die Standartabweichung (mindestens 6 Einzelproben) des Wassergehalts bei Anlieferung ist ebenfalls in Tabelle 12 dargestellt. Sie ist ein Maß für die Homogenität des Brennstoffs. Die Brennstoffe weisen dabei mit einer Standardabweichung von ≤ 3,5 m-% eine eher niedrige Streuung des Wassergehalts über die gelieferten Chargen und damit eine hohe Homogenität auf. Im Vergleich dazu konnte im parallel laufenden, ebenfalls über das BMEL und die FNR finanzierten Verbundprojekt „qualiS“ (FKZ: 22035714) gezeigt werden, dass die Streuungen des Wassergehalts bei frischen Hackschnitzeln bei rund 4,2 m-% (Standardabweichung), bzw. über den gesamter Bereich der Einzelmesswerte (Max–Min) bei 12 m-% und bei Hackgut aus Lagermieten sogar bei bis zu 6,1 m-% (Standardabweichung), bzw. über den gesamter Bereich der Einzelmesswerte (Max–Min) bei 27 m-% liegen kann.

Der wasserfreie Aschegehalt lag in sechs Fällen bei < 1 m-% (EN*plus* A1), in fünf Fällen zwischen 1 und 1,5 m-% (EN*plus* A2) und in einem Fall zwischen 1,5 und 3 m-% (EN*plus* B, Tabelle 12). Bei Brennstoff 8 (Straßenbegleitholz) lag der Aschegehalt sogar bei 4,9 m-% und damit über dem maximal zulässigen Aschegehalt für die EN*plus*-B-Qualität. Hohe Aschegehalte kommen durch einen hohen Anteil an Nadeln, Blättern und Rinde zustande, da sich in diesen Partien viele für den Pflanzenmetabolismus relevante Inhaltsstoffe befinden [29]. Zudem kann der Aschegehalt durch Kontamination mit Bodenmaterial oder anderen Verunreinigungen stark steigen [29]. Da bei Brennstoff 8 der Al/200-Wert [29] bei 4 und damit deutlich über dem für reine Biomasse postulierten Wert von 1 lag und gleichzeitig ein hoher Siliziumgehalt von ca. 10.000 mg/kg vorliegt (siehe Tabelle 15 in Abschnitt 6.2.2), kann mit großer Wahrscheinlichkeit von einer Kontamination mit Bodenmaterial ausgegangen werden [15] [29]. Zusätzlich kann es bei Straßenbegleitholz zu einem erhöhten Eintrag von halmgutartiger Biomasse (z. B. Gräser), Müll, Streusalz, Autoabgase sowie Reifen- und Bremsenabrieb in den Brennstoff gelangen [29]. Daher sollte dieses Material nur in dafür geeigneten größeren Feuerungsanlagen und nicht in häuslichen Hackschnitzelkesseln verwendet werden (siehe auch Abschnitt 6.2.2).

Die Heizwerte der Brennstoffe lagen bis auf eine Ausnahme im typischen Bereich für Holz [15] [50]. Lediglich der Heizwert von Brennstoff 8 lag mit 17,66 MJ/kg geringfügig unter dem als typisch angegebenen Wertebereich für naturbelassenes holziges Material [15]. Dies deutet ebenfalls auf einen Eintrag von nicht brennbarem Material (z. B. Mineralboden) hin [29].

Die auf einen wasserfreien Brennstoff bezogenen Schüttdichten variieren zwischen 154 kg/m^3 und 299 kg/m^3. Bei der Umrechnung der Schüttdichten wurde die Schrumpfung der Hackschnitzel unterhalb des Fasersättigungspunktes bei Wassergehalten unter 25 m-% berücksichtigt [45]. Daher lassen sich die Unterschiede zwischen den Brennstoffen vor allem auf unterschiedliche Holzarten und damit auf unterschiedliche Rohdichten, nicht jedoch auf unterschiedliche Wassergehälter zurückführen [50].

Tabelle 13: Partikelgrößenverteilung, maximale Länge und Partikelklasse der untersuchten Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-1/4 (Angabe der Einzelfraktionen in m-% der Gesamtmasse)

Nr.	0 - 3,15 mm	3,15 - 8 mm	8- 16 mm	16 - 31,5 mm	31,5 - 45 mm	45 - 63 mm	> 63 mm	Max. Länge [mm]	Partikelklasse nach DIN EN ISO	
									17225-1	17225-4
1	0,1	4,7	6,3	84,7	3,7	0,5	0,0	102	P31	P31S
2	2,0	20,5	52,3	24,0	1,2	0,0	0,0	133	P16	P31S
3	3,5	27,0	44,3	23,1	1,9	0,1	0,0	144	P16	P31S
4	2,0	6,8	26,9	46,8	16,7	0,5	0,2	137	P31	P31S
5	3,2	8,8	6,0	74,0	7,1	0,9	0,0	120	P31	P31S
6	0,0	1,2	6,2	75,2	16,1	1,2	0,1	122	P31	P31S
7	24,0	18,9	33,3	22,4	1,0	0,3	0,0	115	P31	n.k.*
8	15,2	24,8	50,3	9,6	0,2	0,0	0,0	170	P31	n.k.*
9	0,6	3,3	12,4	39,4	42,6	1,4	0,2	183	P45	P45S
10	6,3	13,4	23,8	52,4	3,6	0,3	0,2	159	P31	P45S
11	8,1	23,7	50,0	16,9	1,3	0,0	0,0	159	P31	P45S
12	2,2	6,7	5,0	77,2	5,9	2,3	0,6	180	P31	P45S
13	2,3	6,0	6,4	80,3	4,2	0,8	0,1	**240**	P45	n.k.*

Erläuterung: Graue Hinterlegung markiert die Verteilung des Hauptanteils über 1–3 Einzelfraktionen, Fettdruck die Überschreitungen der maximalen Länge oder des Feinanteils. * n.k.: nicht nach DIN EN ISO 17225-4 klassifizierbar wegen Grenzwertüberschreitungen

Tabelle 13 zeigt die Partikelgrößenverteilung sowie die maximale Länge der 13 Hackschnitzelproben. Der Feinanteil lag bei den Brennstoffen 7 und 8 über 15 m-% und übersteigt damit die nach DIN EN ISO 17225-4 für alle Klassen gültigen Grenzwerte (P16S, P31S und P45S) [16]. Deshalb kann für die Brennstoffe 7 und 8 keine Partikelklasse nach DIN EN ISO 17225-4 angegeben werden. Bezüglich der Partikelgrößenverteilung

sind bei allen Brennstoffen klare Unterschiede hinsichtlich der Homogenität der Gesamtproben zu erkennen. Während sich bei den Brennstoffen 1, 5, 6, 12 und 13 prozentual die Hauptfraktion der jeweiligen Probe auf genau eine Partikelfraktion konzentriert (16–31,5 mm), verteilen sich die Hauptfraktionen der restlichen Proben auf 3 bis 4 verschiedene Partikelgrößen. Die für die Qualitätsklasse B nach DIN EN ISO 17225-4 höchstens zulässige maximale Länge von 200 mm wurde nur im Fall von Brennstoff 13 überschritten.

Vergleicht man die Einstufung der Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225-1 und 17225-4 so fällt auf, dass die Klasse häufig nicht 1:1 übereinstimmen. In vielen Fällen wird die Hauptfraktion der Partikelkasse nach Teil 4 der Norm aus der nächst-kleineren Klasse nach Teil 1 der Norm gebildet. So bestehen P31S Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 häufig aus P16 Hackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-1 und P45S Hackschnitzel nach Teil 4 aus P31 nach Teil 1 der Norm. Limitierend für die Einteilung nach Teil 4 der Norm ist seltener die Hauptfraktion als vielmehr die maximal zulässige Länge, die für die jeweiligen „S“-Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225-4 geringer ist als für die Klassen nach DIN EN ISO 17225-1 [15] [16].

6.2.2 Inhaltsstoffliche Parameter (Hauptbestandteile, Spurenelemente und Aerosolbildner)

Die in Tabelle 14 aufgelisteten Gehalte an C, H, N, S, O und Cl liegen alle im für Holzbrennstoffe üblichen Bereich [15] [29]. Die ebenfalls für die Verbrennung eine wichtige Rolle spielenden Elemente Kalium (K), Natrium (Na), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) sind in Tabelle 15 dargestellt.

Die in den Spezifikationen B1 und B2 nach DIN EN ISO 17225-4 und damit die in den Anforderungen nach EN*plus* geforderten Höchstwerte für N, S und Cl wurden in keinem Fall überschritten [16]. Den höchsten Stickstoffgehalt wies Brennstoff 8 mit 0,4 m-% auf. Auch die Brennstoffe 3, 7 und 11 zeigen hohe Stickstoffgehalte. Bei dem Ausgangsmaterial handelt es sich um Waldrestholz (siehe Tabelle 10). Der erhöhte Stickstoffgehalt könnte somit v. a. auf einen erhöhten Nadelanteil zurückgeführt werden, da Stickstoff metabolisch bedingt vornehmlich in grüner Biomasse benötigt wird [15].

Die Elemente Kalium und Natrium, aber auch Silizium, spielen eine wichtige Rolle bei der Aerosolbildung. Die Elemente Calcium und Magnesium führen mit steigender Konzentration zu einer Erhöhung des Ascheerweichungspunktes, während Kalium in Verbindung mit Silizium eher zu einer Senkung der Ascheerweichungstemperatur beiträgt [45]. Lediglich Brennstoff 8 weist verhältnismäßig erhöhte Natrium- und Silizium-Konzentrationen auf. Die anderen Brennstoffe liegen innerhalb der für das jeweilige Sortiment typischen Wertebereiche [15].

Tabelle 14: Makroelemente C, H, N, S, O und Cl der Brennstoffe in m-% (wasserfreie Bezugsbasis) inklusive Grenzwert nach DIN EN ISO 17225-4

Nummer	C	H	N	S	O	Cl
DIN EN ISO 17225-4	-	-	≤ 1	≤ 0,1	-	≤ 0,05
1	51,1	5,9	0,09	< 0,005	42,1	-
2	50,2	5,9	0,07	0,006	43,7	0,020
3	50,3	5,7	0,24	0,017	43,2	0,016
4	49,9	5,9	0,14	0,007	43,6	0,048
5	50,8	6,0	0,08	< 0,005	42,2	-
6	50,9	6,0	0,09	< 0,005	42,2	-
7	50,2	5,7	0,33	0,022	42,9	0,009
8	48,1	5,7	0,40	0,026	43,8	0,019
9	50,7	5,9	0,17	< 0,005	41,5	-
10	50,2	6,1	0,13	0,012	43,3	0,021
11	50,4	6,1	0,32	0,021	42,4	0,033
12	50,5	6,0	0,11	< 0,005	41,9	-
13	50,1	5,9	0,11	0,006	43,6	0,010

Tabelle 15: Für die Verbrennung relevante Inhaltsstoffe K, Na, Ca, Mg, Si und Al der Brennstoffe (in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis)

Nr.	Na	K	Ca	Mg	Si	Al
Er*	10–50	200–500	500–1.000	100–200	100–200	300–400
Wrh*	75–300	1.000–4.000	2.000–8.000	400–2.000	200–10.000	n. s.
1	<10	1.010	1.080	200	202	21
2	<10	340	750	110	106	<10
3	35	1.160	2.950	390	507	80
4	<10	560	2.520	240	518	43
5	12	1.020	950	190	663	58
6	12	940	980	180	379	28
7	67	1.240	3.800	520	2.620	290
8	370	2.550	5.060	440	9.870	810
9	14	680	3.460	270	530	95
10	<10	490	950	170	568	38
11	190	1.630	3.110	390	1.320	120
12	12	1.220	1.960	180	898	120
13	14	470	860	200	715	96

*Typischer Wertebereich für Energierundholz (Er) und Waldrestholz (Wrh) nach DIN EN ISO 17225-1 [15]. n. s. = nicht spezifiziert

Die Schwermetallgehalte der 13 untersuchten Holzhackschnitzel sowie die maximal zulässigen Höchstwerte nach DIN EN ISO 17225-4 für die Spezifikation B sind in Tabelle 16 dargestellt. Lediglich die Probe aus Brennstoff 8 übersteigt den für Spezifikation B1 und B2 maximal zulässigen Wert für Chrom (Cr) um 2 mg/kg. Außerdem konnte nur bei diesem Brennstoff mit 3 mg/kg ein messbarer Bleigehalt festgestellt werden. Sowohl Cr, als auch Pb könnten im Fall von Straßenbegleitholz auf einen Einfluss durch Autoabgase und/oder Reifenabrieb hinweisen [44][46]. Die hier verwendeten, aus Straßenbegleitgrün produzierten Hackschnitzel (Tabelle 10) sind also sowohl hinsichtlich der Schwermetalle als auch hinsichtlich des Aschegehalts (Tabelle 12) nicht als Hackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 und somit ebensowenig nach EN*plus* geeignet.

Tabelle 16: Schwermetallgehalte der untersuchten Holzhackschnitzel (in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis) und Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-4 (k.A. = keine Angabe)

Nummer	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Pb	V	Zn
DIN EN ISO 17225-4	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 0,1	≤ 10	k.A.	≤ 100
1	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	21
2	< 0,8	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,05	< 2	< 1	7
3	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	24
4	< 0,8	< 0,2	< 1	5	< 1	< 0,05	< 2	< 1	28
5	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	19
6	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	18
7	< 0,8	< 0,2	2	3	1	< 0,05	< 2	< 1	29
8	< 0,8	0,3	**12**	6	7	< 0,05	3	4	42
9	< 0,8	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	29
10	< 0,8	0,3	< 1	< 1	< 1	< 0,05	< 2	< 1	16
11	< 0,8	< 0,2	2	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	28
12	< 0,8	0,3	< 1	2	< 1	< 0,05	< 2	< 1	32
13	< 0,8	0,3	< 1	< 1	< 1	< 0,05	< 2	< 1	15

Die Summe der Aerosolbildner ist in Abbildung 44 kumulativ dargestellt, wobei Kalium den Hauptteil der Aerosolbildner ausmacht (> 86 %). Vergleicht man die Summe der Aerosolbildner mit der Herkunft der Hackschnitzel (Tabelle 10) wird deutlich, dass Brennstoffe aus Sägerestholz (2, 4 und 13) sowie gesiebtes Waldrestholz (9) und die Waldhackschnitzel (10) deutlich niedrigere Gehalte an aerosolbildenden Elementen aufweisen als ungesiebtes Waldrestholz (7 und 11) Dies liegt vermutlich am niedrigeren Rindenanteil, sowie am niedrigeren Nadel- bzw. Feinanteil bei dem gesiebten Waldrestholz bzw. beim Sägerestholz. Bedingt durch den Pflanzenmetabolismus ist der Kaliumgehalt in Nadeln (ca. 6.000 mg/kg) oder Blättern (ca. 13.000 mg/kg) und Rinde (bis 3.900 mg/kg bei Nadelbäumen und bis 2.900 mg/kg bei Laubbäumen) wesentlich höher ist als im Holz

(Derbholz von Laubbäumen bis 1.900 mg/kg und von Nadelbäumen bis 600 mg/kg) [38] [53]. Somit sollten für die Brennstoffe 2, 4, 9, 10 und 13 deutlich niedrigere Staubemissionen zu erwarten sein als für die Brennstoffe mit Elementgehalten über 1.000 mg/kg.

Auch bei den aerosolbildenden Elementen zeigt Brennstoff 8 mit fast 3.000 mg/kg die mit Abstand höchsten Gehalte. Dies liegt vermutlich am erhöhten Rinden- und v. a. am erhöhten Grünanteil des Straßenbegleitholzes; aber auch ein Eintrag von halmgutartiger Biomasse ist möglich [29]. Brennstoff 8 weist zudem gleichzeitig die höchsten Natrium- und Silizium-Konzentrationen auf. Analog zum hohen Aschegehalt deutet dies auf eine Kontamination mit Mineralboden (Si) sowie mit Streusalz (Na) hin (siehe auch Abschnitt 6.2.1) [29].

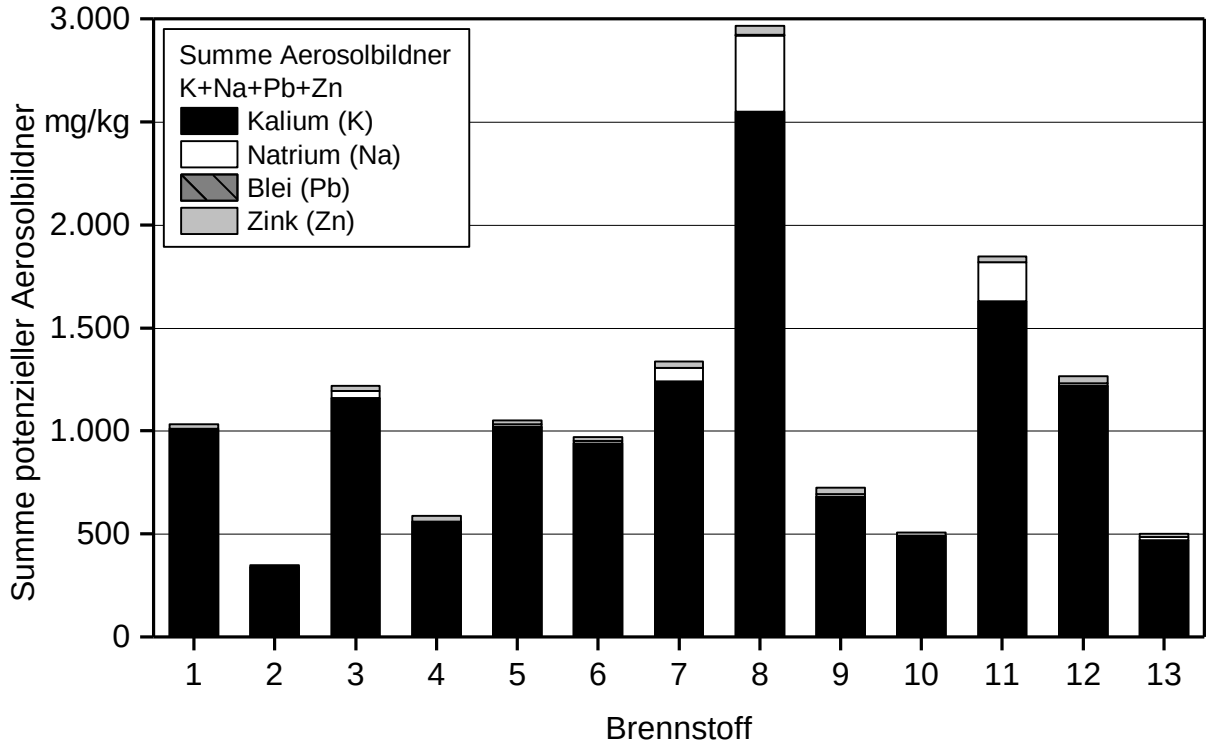


Abbildung 44: Summe der Aerosolbildner (∑(K, Na, Pb, Zn) in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis) der untersuchten Holzhackschnitzel

Trägt man die Summe der Aerosolbildner über den Aschegehalt auf lässt sich ein klarer Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Aerosolbildnern für die hier untersuchten Proben erkennen (Abbildung 45). Dies ist nach bisherigem Kenntnisstand allerdings nur für Proben gegeben, die vornehmlich aus reinem Pflanzenmaterial bestehen und keine Anhaftung von Bodenmaterial oder sonstigen Verunreinigungen beinhalten [29]. Daher ist eine Abschätzung der aerosolbildenden Elemente anhand des Aschegehaltes in der Praxis nicht generell möglich [29].

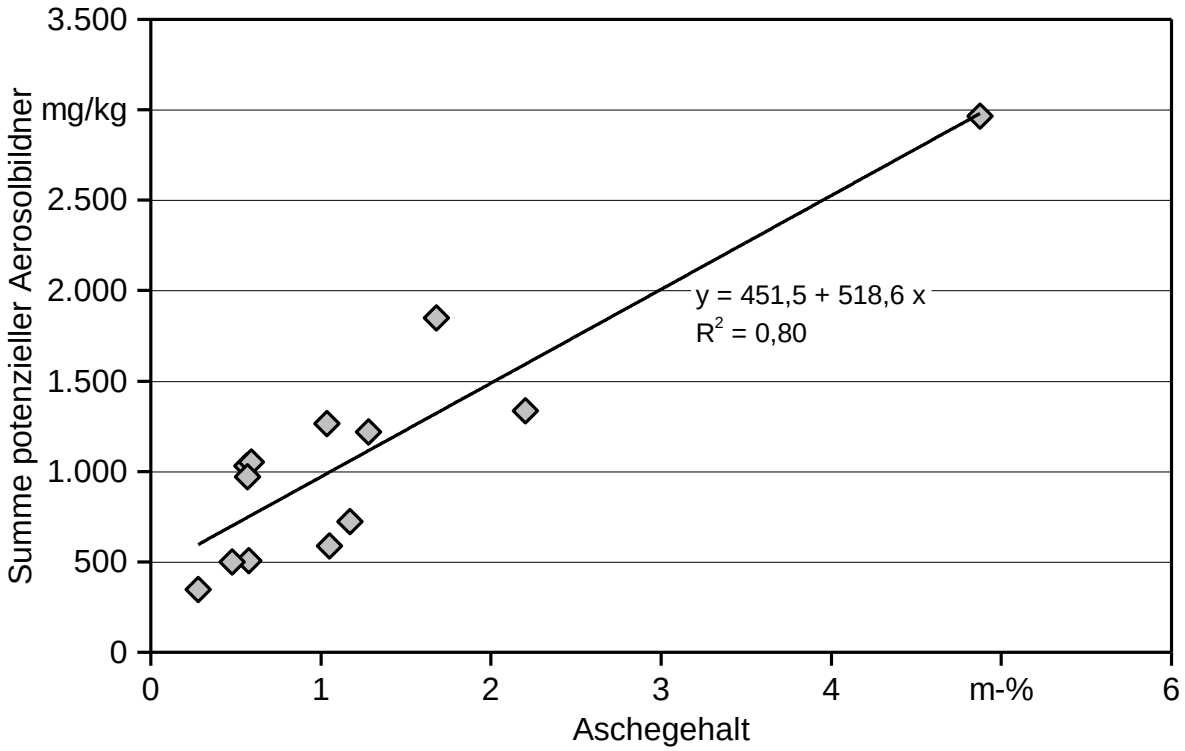


Abbildung 45: Lineare Regression der Aerosolbildner in Abhängigkeit vom Aschegehalt (auf wasserfreier Bezugsbasis)

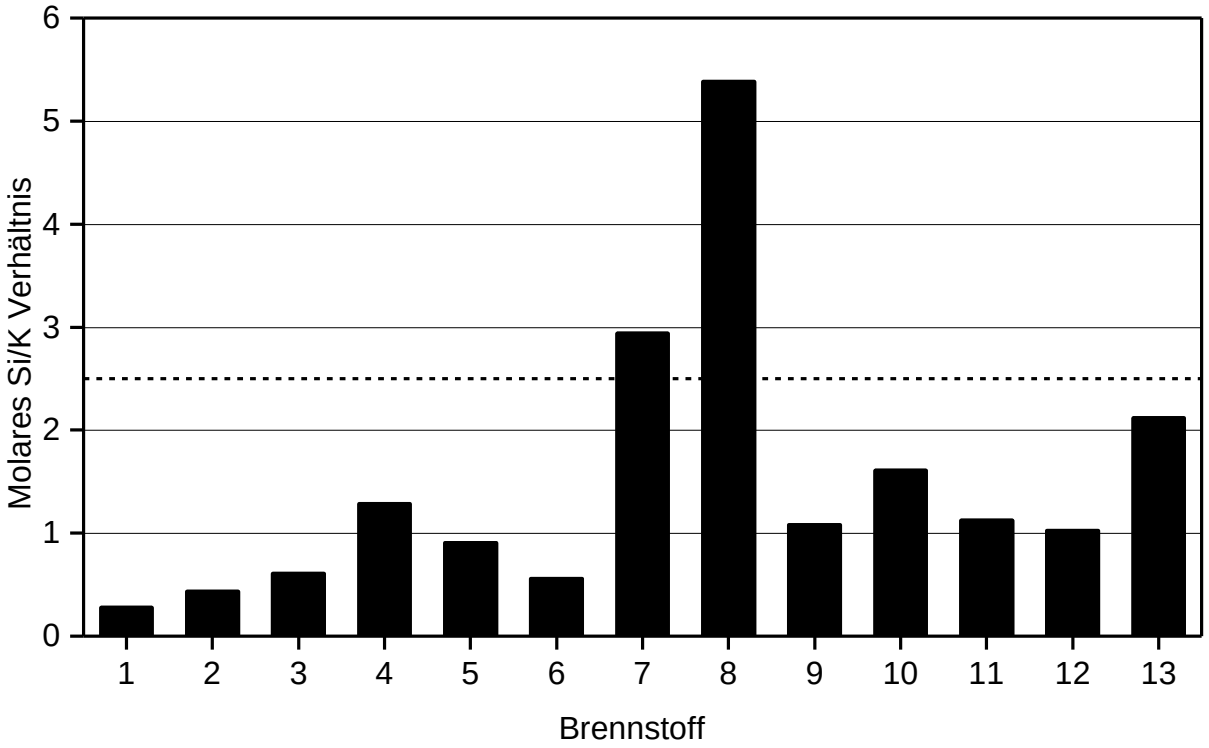


Abbildung 46: Molares Si/K-Verhältnis der untersuchten Hackschnitzelproben (unterbrochene Linie zeigt Schwellenwert von 2,5; oberhalb dieses Wertes kann die K-Freisetzung in die Gasphase durch K-Fixierung verringert sein)

Abbildung 46 zeigt das molare Si/K-Verhältnis der untersuchten Brennstoffproben. Lediglich die Brennstoffe 7 und 8 weisen ein molares Si/K Verhältnis von über 2,5 aber auch gleichzeitig hohe Gehalte an aerosolbildenden Elementen auf. Theoretisch sollte durch das molare Si/K-Verhältnis über 2,5 die K-Freisetzung bei diesen Brennstoffen zumindest zum Teil gemindert werden (siehe Abschnitt 6.1.1).

6.2.3 Klassifizierung der untersuchten Hackschnitzel nach EN*plus*

Tabelle 17 zeigt die Klassifizierung der 13 untersuchten Hackschnitzellieferungen nach EN*plus*. Die Angaben der Lieferanten zu den gelieferten Brennstoffen lagen in den meisten Fällen relativ nahe an den Ergebnissen der Messungen. Dabei zeigt sich jedoch, dass die Einstufung seitens der Brennstoffproduzenten nicht in jedem Fall zutreffend war.

Tabelle 17: Klassifizierung der untersuchten Hackschnitzel nach ENplus (n. k. nicht klassifizierbar)

Nr.	Lieferant	Qualität nach Lieferantenaussage	Tatsächliche Qualität nach EN*plus*	Grund wenn nicht klassifizierbar
1	A	EN*plus* A, P31S, M15	EN*plus* A1, P31S, M15	-
2	B	EN*plus* A, P31S, M15	EN*plus* A2, P31S, M15	-
3	C	EN*plus* A, P31S, M15	EN*plus* A2, P31S, M15	-
4	D	EN*plus* A, P31S, M25	EN*plus* A2, P31S, M25	-
5	A	EN*plus* A, P31S, M35	EN*plus* A2, P31S, M35	-
6	A	EN*plus* A, P31S, M35	EN*plus* A2, P31S, M35	-
7	**C**	**EN*plus* B, P31S, M15**	**n. k., n. k., M15**	**F > 10 m-%**
8	**E**	**EN*plus* B, P31S, M25**	**n. k., n. k., M15**	**F > 10 m-%, A > 3 m-%, Cr > 10 mg/kg**
9	D	Keine Angabe	EN*plus* A2, P45S, M25	
10	F	EN*plus* A, P45S, M25	EN*plus* A2, P45S, M25	
11	F	EN*plus* A, P45S, M35	EN*plus* B, P45S, M35	
12	A	EN*plus* B, P45S, M35	EN*plus* A2, P45S, M35	
13	**E**	**EN*plus* A, P31S, M15**	**n. k., n. k., M35**	**Max. Länge > 200 mm**

Erläuterung: Fettdruck symbolisiert Proben, bei denen die tatsächliche Einteilung nach EN*plus* von den Angaben der Hersteller abgewichen ist.

Brennstoff Nr. 8 (Straßenbegleitholz) wich gleich bei drei Kriterien (Aschegehalt, Feingehalt und Chrom) von den EN*plus*-Vorgaben ab. Das bestätigt, dass der Einsatz von Straßenbegleitholz in Kleinfeuerungsanlagen generell kritisch hinterfragt werden sollte [29]. Brennstoff Nr. 13 enthielt eine maximale Partikellänge von 240 mm und ist somit

ebenfalls nicht nach EN*plus* klassifizierbar. Auch Brennstoff Nr. 7 wich von den Vorgaben nach EN*plus* ab. Bei Brennstoff Nr. 7 wurde jedoch gezielt Brennstoff Nr. 3 verändert, indem der beim Hersteller zuvor abgsiebte Feingehalt (identisches Ausgangsmaterial) wieder zugemischt wurde, um so eine künstliche Erhöhung des Aschegehalts und damit einen Brennstoff der Qualitätsklasse EN*plus* B für die Versuche zu erzeugen. Eine mögliche Abweichung von den Vorgaben ist somit nicht dem Produzenten anzulasten. Dabei konnte durch die Zumischung des Feingehalts ein Aschegehalt von 2,2 m-% erreicht werden. Der hohe Feingehalt ergab jedoch nach der Siebanalyse einen Wert von 24 m-% und lag damit deutlich oberhalb des zulässigen Maximalgehaltes, sowohl nach DIN EN ISO 17225-4, als auch nach EN*plus*. Hierdurch ist somit weder die Einordnung in EN*plus* A1, A2 oder B noch die Einordnung in eine der Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225 möglich [16].

In den meisten anderen Fällen stimmten die Angaben der Lieferanten mit den Messungen zur Brennstoffqualität überein. Lediglich Brennstoff Nr. 11 musste aufgrund seines Aschegehalts von 1,7 m-% als EN*plus* B anstatt als EN*plus* A2 eingeordnet werden.

Zum Zeitpunkt der Probenlieferung wurde noch nicht in die Spezifikationen EN*plus* A1 und EN*plus* A2 unterschieden. Gerade die langfristige Einhaltung der Anforderungen an den Aschegehalt in EN*plus* A1 (A ≤ 1,0 m-%) aber auch die strengere Begrenzung der maximalen Partikellänge (≤ 120 mm für P31S nach EN*plus* A1) könnten weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Produktion erfordern. Insgesamt sind die Erfahrungen jedoch positiv zu werten, da in vielen Fällen die geforderte Brennstoffqualität von den Produzenten eingehalten werden konnte.

6.3 Ergebnisse der Emissionsmessungen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Emissionsmessungen an den beiden verwendeten Hackgutfeuerungen dargestellt. Der Aufbau der Messstrecke sowie die verwendeten Messgeräte wurde bereits im Kapitel 6.1.2 erläutert. Für die Bewertung der Emissionen werden nachfolgend die Grenzwerte der derzeit gültigen 1. BImSchV herangezogen. Einen Ausblick auf zukünftige Regelungen der Ökodesign Richtlinie gibt Abschnitt 6.5.

6.3.1 Ergebnisse mit der 50 kW Kipprostfeuerung (Kessel A)

Die Mittelwerte der CO Emissionen von der 50 kW Kipprostfeuerung (Kessel A) sowie der dazugehörige Grenzwert der Stufe 2 der 1. BImSchV [8] sind in Abbildung 47 dargestellt. Darin wird zudem der jeweilige Lambda-Wert gezeigt.

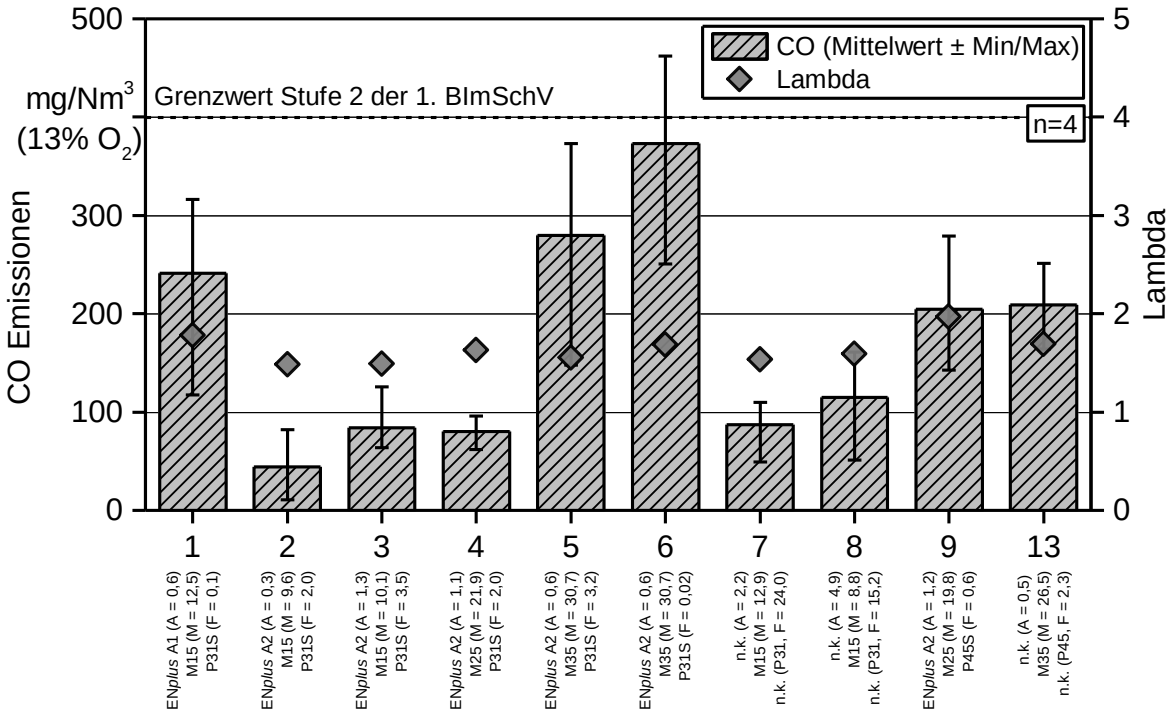


Abbildung 47: Mittlere Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen und Luftverhältniszahl (Lambda) der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-% (wasserfrei); F: Feinanteil in m-%)

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den EN*plus* Qualitätsklassen und den CO Emissionen lässt sich nicht feststellen. Lediglich hinsichtlich des Wassergehalts ist ein Anstieg der Emissionen bei Werten über 30 m-% zu beobachten. Der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV für Kohlenmonoxid von 400 mg/Nm^3 wurde aber mit keinem der eingesetzten Brennstoffe überschritten. Das bestätigen auch die Messungen in den parallel laufenden Verbundprojekten „qualiS“ und „OptiChip“, bei denen derselbe Kessel eingesetzt wurde; die CO Emissionen im Volllastbetrieb hatten auch bei diesen Messungen immer unterhalb des Grenzwertes gelegen, lediglich im Teillastbetrieb war der Grenzwert um ein Vielfaches überschritten worden (siehe Endberichte der Projekte „OptiChip“ und „qualiS“).

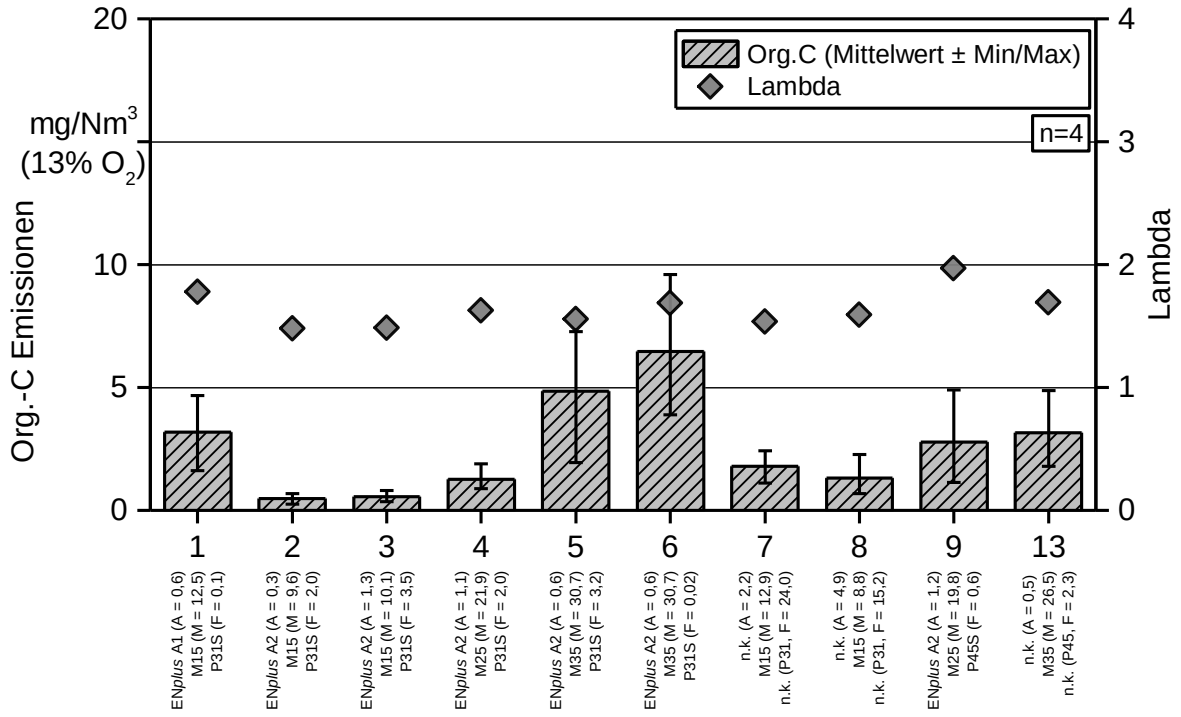


Abbildung 48: Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Es zeigt sich, dass die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen vom Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffs abhängen (Abbildung 48). Wassergehalte über 30 m-% wirken sich dabei im Fall der hier eingesetzten Feuerung negativ auf die Verbrennung aus und führen neben erhöhten CO Emissionen auch zu erhöhten Org.-C-Emissionen. Dieser Effekt war auch in den Projekten „qualiS“ und „OptiChip“ beobachtet worden. Für die verwendete 50 kW Kipprostfeuerung wäre eine Korrektur des maximalen Wassergehaltes der EN*plus* A2 Qualität von 35 m-% auf 30 m-% oder die Verwendung von Brennstoff der Klasse A1 empfehlenswert, zumal gerade 30 m-% von vielen Kesselherstellern für Kleinfeuerungsanlagen als maximal zulässiger Wassergehalt angeben wird.

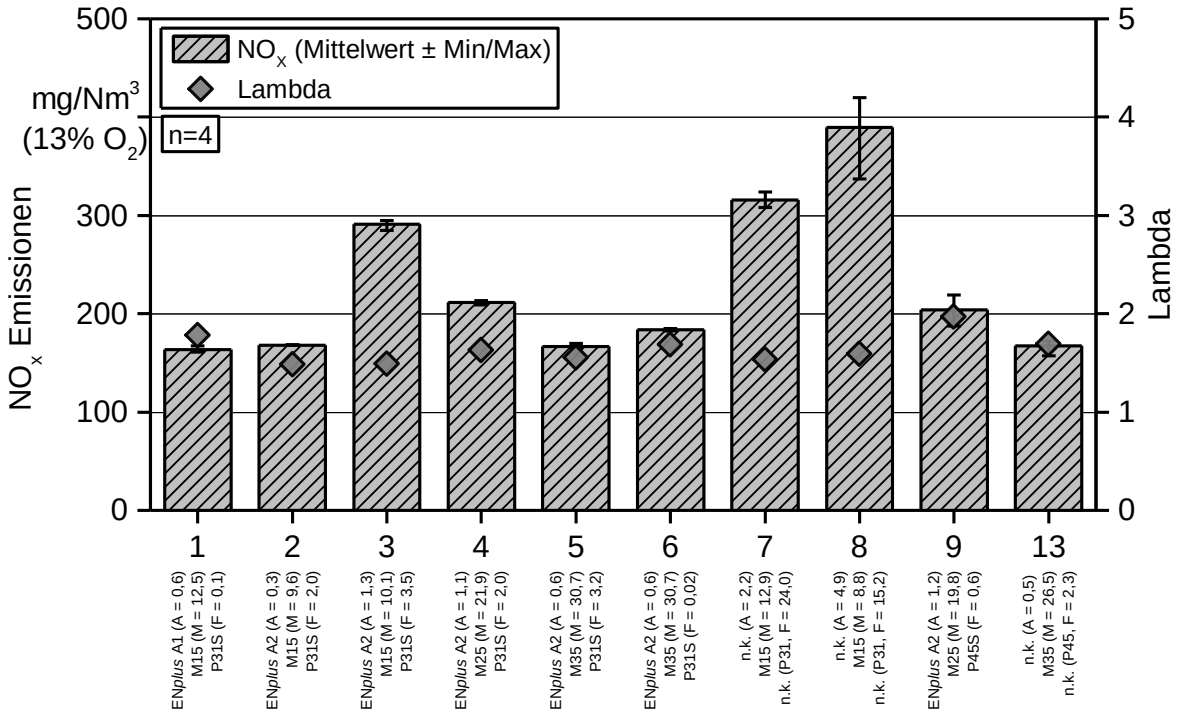


Abbildung 49: Stickstoffoxid-(NO_X)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Abbildung 49 zeigt die NO_X Emissionen der Messreihe an der 50 kW Feuerung. Die höchsten NO_X Emissionen wiesen die Brennstoffe Nr. 3, 7 und 8 auf. Hierbei handelt es sich um Waldrestholz und Straßenbegleitholz mit einem höheren Stickstoffgehalt, verglichen mit Energierundholz oder Sägerestholz. Die Höhe der NO_X Emissionen stehen somit nicht direkt im Zusammenhang mit der EN*plus* Qualitätsklasse sondern eher mit der Brennstoffart bzw. Herkunft, der Art der Aufbereitung und dem damit verbundenen Gesamtgehalt an Brennstoffstickstoff (vgl. auch Abschnitt 6.4). Im Projekt „qualiS“ ergab sich nach dem Absieben von Waldrestholz in den meisten Fällen eine deutliche Reduktion der NO_X Emission, was auf eine Reduktion des Brennstoffstickstoffgehalts zurückzuführen ist.

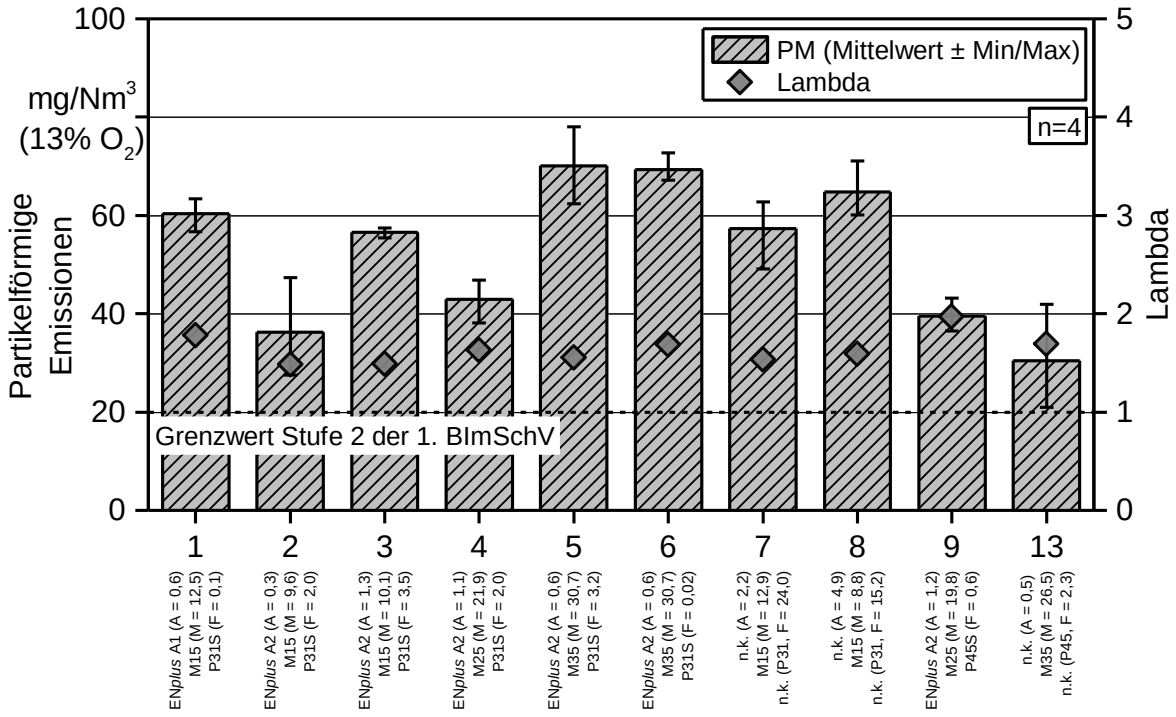


Abbildung 50: Partikelförmige Emissionen (Gesamtstaub) und Luftverhältniszahl Lambda der 50 kW Kipprostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen (Abbildung 50) konnte der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV in keinem Fall eingehalten werden, wenn – wie im vorliegenden Fall – die Referenzmessmethode für Staub zugrunde gelegt und kein Abzug für die Messunsicherheit vorgenommen wurde. Auch für diesen Messparameter ist kein offensichtlicher Einfluss der ENp*lus* Qualitätsklassen erkennbar. Interessanter Weise wurden sogar die niedrigsten partikelförmigen Emissionen mit der 50 kW Kipprostfeuerung mit Brennstoff 13 erreicht, der nach EN*plus* wegen Überschreitung der maximalen Länge von 200 mm nicht klassifizierbar war. Brennstoff Nr. 13 weist jedoch einen sehr niedrigen Aschegehalt und einen sehr niedrigen Gehalt an aerosolbildenden Elementen auf (vgl. Abschnitt 6.2).

Analog zu den Emissionen an CO und Org.-C ergaben sich auch für die partikelförmigen Emissionen die höchsten Messwerte bei Wassergehalten um und über 30 m-%. Ähnliche Trends konnten auch in den Projekten „qualiS“ und „OptiChip“ beobachtet werden.

Die Partikelemissionen konnten in einem zusätzlichen Versuch mit den beiden Brennstoffen 5 und 6, bei welchem die Kesseleinstellungen durch den Hersteller auf den Brennstoff hin optimiert werden sollten, nicht weiter verringert werden (siehe Tabelle 18). Im Gegenteil, hier nahmen die partikelförmigen Emissionen im Vergleich mit den bereits optimierten Kesseleinstellungen aus dem Projekt „OptiChip“ (Versuchsphase 1) sogar noch zu. Im Fall der Partikelmessungen kam dabei anstelle der Messung nach VDI 2066 [62] das Schornsteinfegermessgerät Wöhler SM 500 zum Einsatz (vgl. Kapitel 7). Hierbei darf in Anlehnung an VDI 4207 [64] die erweiterte Messunsicherheit von 40 % vom

Messwert abgezogen werden. Betrachtet man jedoch die Messwerte des Wöhler SM 500 wird deutlich, dass auch nach Abzug der der 40 % Messunsicherheit (mSTU Tabelle 18) der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV in keinem Fall für die Brennstoffe 5 und 6 eingehalten wurden.

Tabelle 18: Staubemissionen der 50 kW Anlage gemessen mit Wöhler SM 500 im Ausgangszustand der Kesselparameter (optimierte Einstellungen aus dem Projekt OptiChip – Phase 1) und schrittweise während der Parameteranpassung durch den Hersteller.

Einstellungen Kessel		OptiChip Phase 1		Optimierung durch Hersteller			
Brennstoff		5	6	5	5	6	6
mST*	mg/Nm^3	76	73	121	285	70	102
mSTU*	mg/Nm^3	46	44	73	171	42	61
Materialmenge min.	%	25		40	100	40	55
Materialmenge max.	%	85		95	100	70	75
Verbrennungsregelung	-	nein		ja	ja	ja	ja
Leistungsregelung	-	ja		nein	nein	nein	nein
O_2 Sollwert	%	9		7	7	7	7
Verbrennungsluftgebläse Drehzahl	%	80		65	70	60	60
Brennraum Solltemperatur	°C	650		650	650	650	660
Primärluft Maximum	%	18		18	20	15	15
Primärluft Minimum	%	30		30	35	25	30

*mST: Staubmesswert Wöhler SM 500 ohne Abzug der erweiterten Messunsicherheit. *mSTU: Staubmesswert Wöhler SM 500 nach Abzug der erweiterten Messunsicherheit nach VDI 4207.

6.3.2 Ergebnisse mit der 100 kW Drehrostfeuerung (Kessel B)

Wie auch bei der 50 kW Anlage lagen die CO Messwerte bei den Messungen mit der 100 kW Drehrostfeuerung (Kessel B) im Mittel unterhalb des Stufe-2-Grenzwertes der 1. BImSchV (Abbildung 51). Ein Zusammenhang zwischen der Qualitätsklasse nach EN-*plus* und den CO Emissionen war auch hier nicht eindeutig zu erkennen. Allerdings zeigten sich wie auch schon für die 50 kW Anlage die höchsten absoluten CO Emissionen und die höchsten Schwankungen bei Wassergehalten über 30 m-%.

Die CO Emissionen der 100 kW Anlage lagen für die verwendeten Brennstoffe teilweise höher, teilweise aber auch niedriger als bei der 50 kW Anlage. Ein eindeutiger Trend zwischen beiden Kesseln konnte somit nicht erkannt werden. Hinsichtlich der CO Emissionen zeichnet sich somit kein Vorteil für eine der beiden Technologien ab.

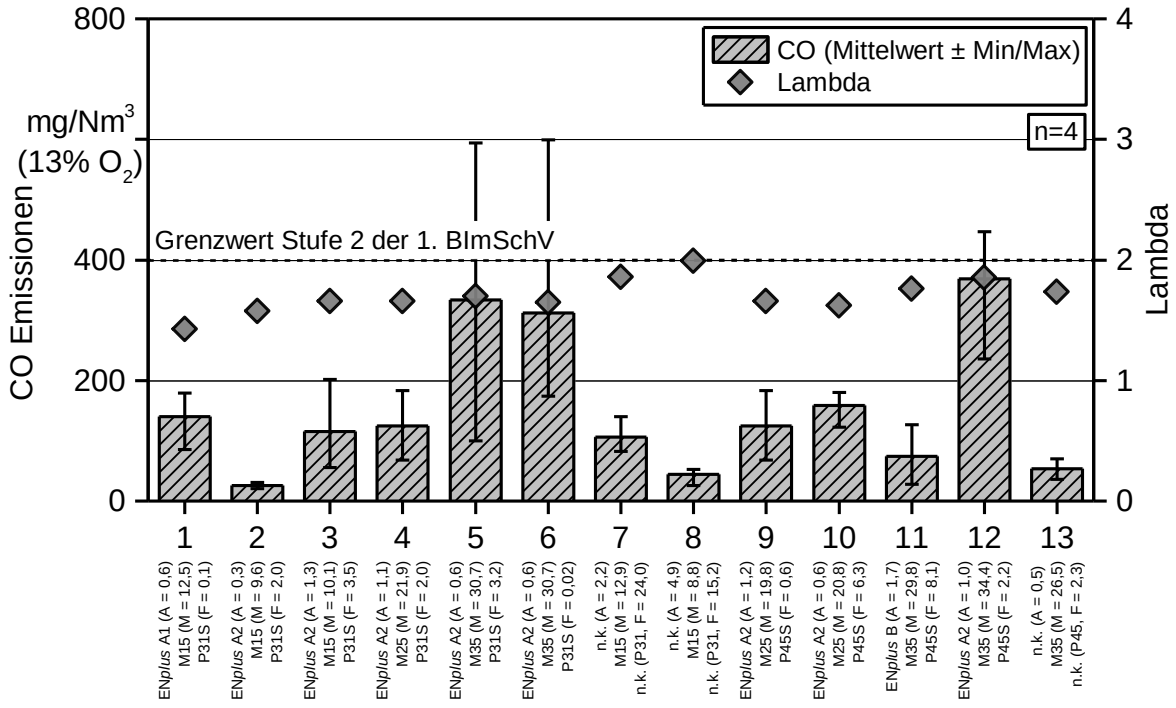


Abbildung 51: Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

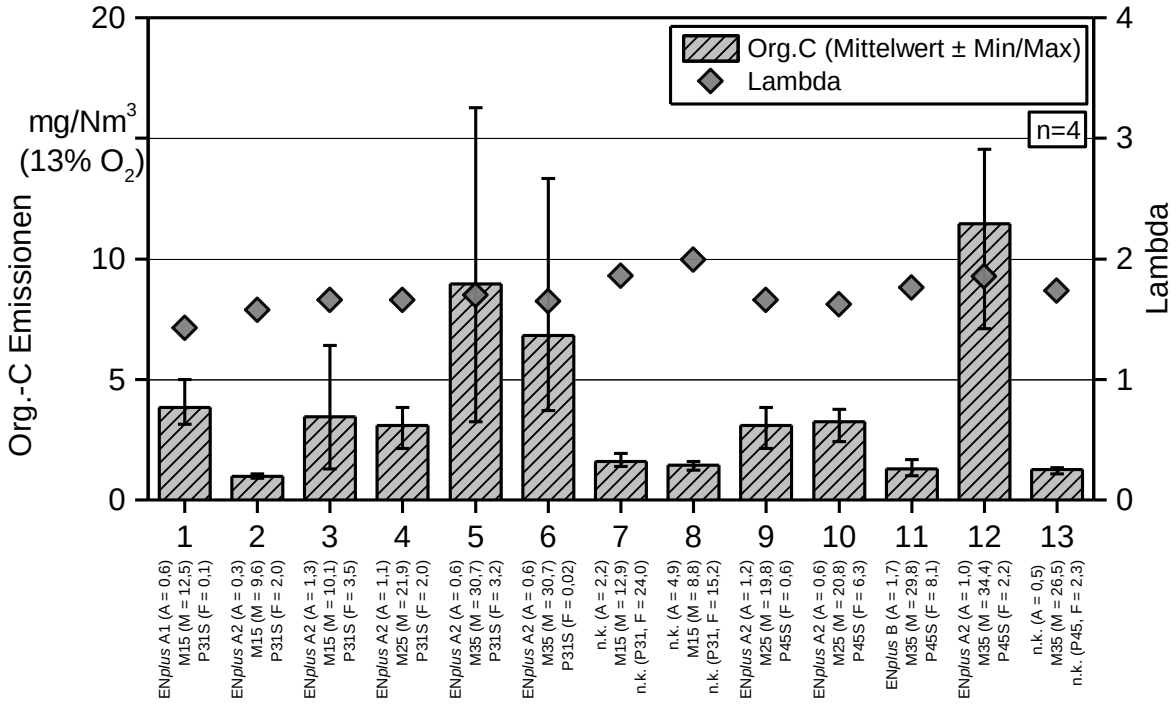


Abbildung 52: Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung. (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen (Abbildung 52) lagen auf einem ähnlichen, leicht erhöhten Niveau im Vergleich zu der 50 kW Anlage. Die Brennstoffe 1, 5 und 6 sowie der nur an der 100 kW Anlage verfeuerte Brennstoff 12 zeigten deutlich erhöhte Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Vergleich zu den anderen Messungen. Dies lässt sich wiederum auf den hohen Wassergehalt zurückführen.

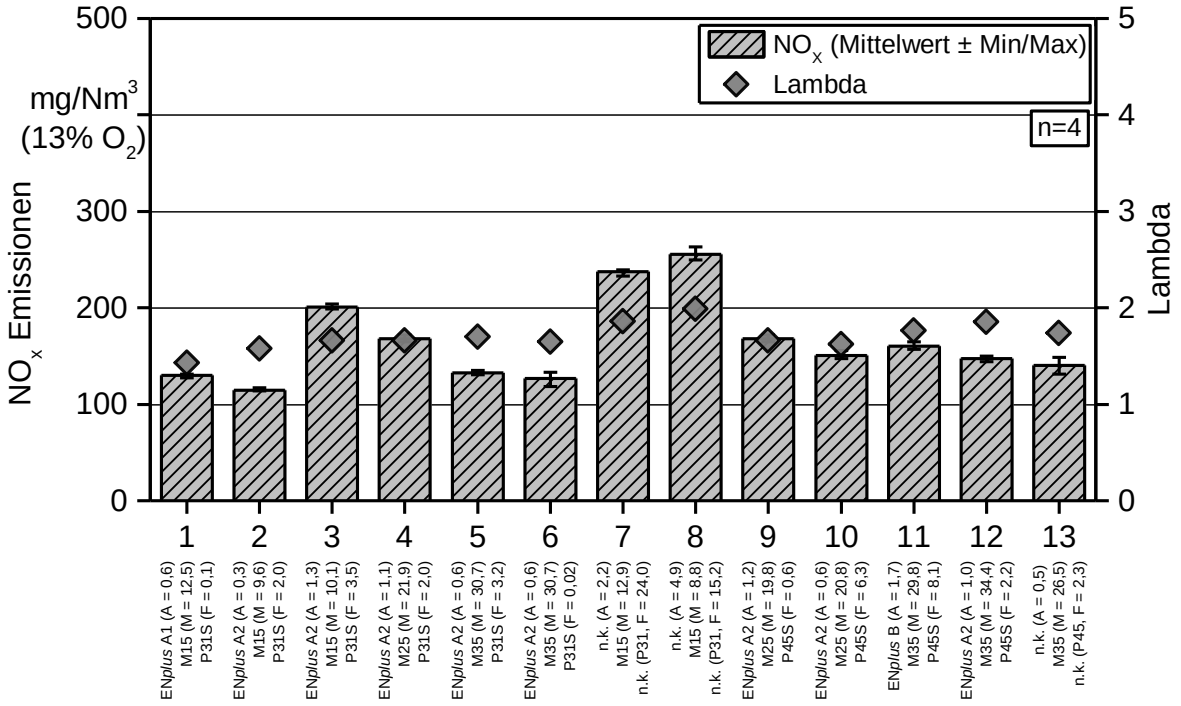


Abbildung 53: Stickstoffoxid-(NO_X)-Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung. (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Im Gegensatz zur Kipprostfeuerung scheint die Drehrostfeuerung hinsichtlich der NO_X Emissionen im Vorteil zu sein (Abbildung 53). Durchschnittlich lagen diese verglichen mit der 50 kW Anlage um 16 bis 35 % niedriger. Gründe hierfür könnten eine bessere Homogenisierung und eine bessere Strömungsführung der Verbrennungsgase über dem Rost sowie durch die Luftstufung bedingte Zonen mit Sauerstoffmangel (reduzierende Bedingungen) sein [37] [45] [51].

Die Brennstoffe 3, 7 und 8 wiesen wie auch schon bei der 50 kW Anlage die höchsten NO_X Emissionen auf. Diese Brennstoffe hatten gleichzeitig die höchsten Stickstoffgehalte.

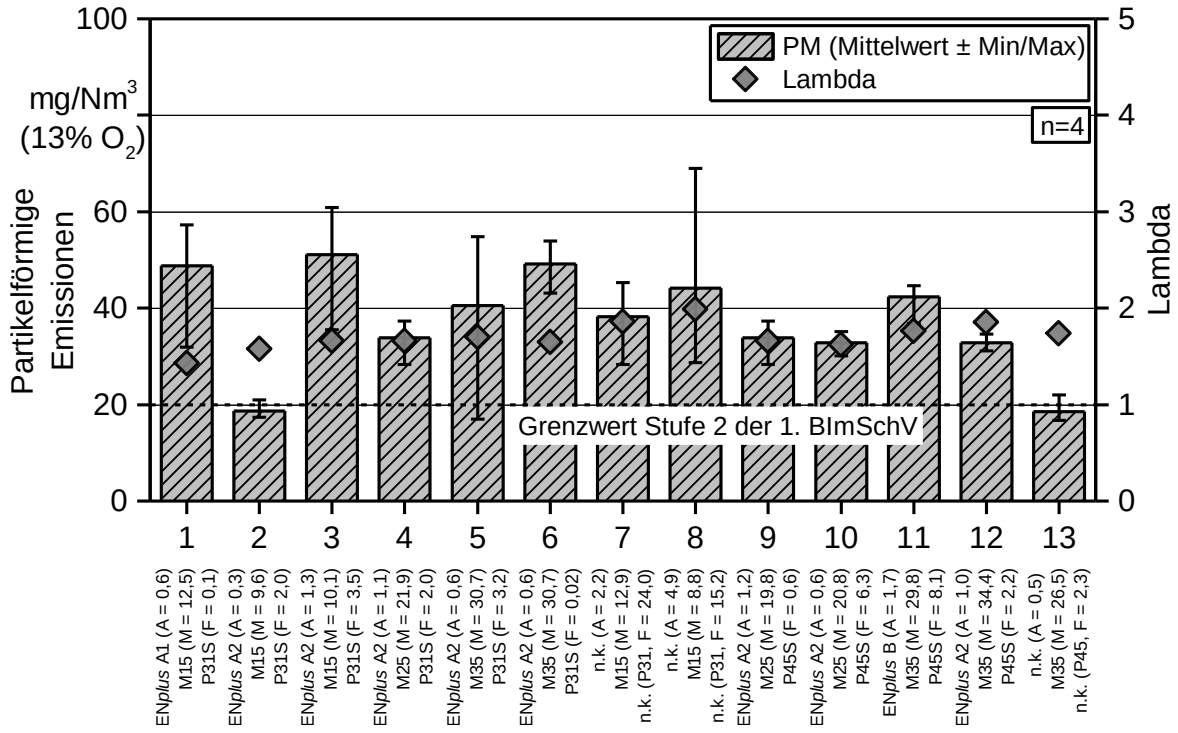


Abbildung 54: Partikelförmige Emissionen und Luftverhältniszahl Lambda der 100 kW Drehrostfeuerung (Klassifizierung nach Kap. 6.2.3; M: Wassergehalt in m-%; A: Aschegehalt in m-%; F: Feingehalt in m-%)

Hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen (Abbildung 54) konnte der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV mit der 100 kW Drehrostfeuerung für die Brennstoffe 2 und 13 ohne weitere Staubminderungsmaßnahmen eingehalten werden, obgleich – wie im vorliegenden Fall – die Referenzmessmethode für Staub zugrunde gelegt und kein Abzug für die Messunsicherheit vorgenommen wurde. Bei beiden Brennstoffen handelt es sich um Sägerestholz (niedriger Rinden-/Nadelanteil) mit einem Aschegehalt < 0,5 m-% (Abschnitt 6.2.1 Tabelle 12). Gleichzeitig wurden in Brennstoff 2 und 13 die niedrigsten Gehalte an aerosolbildenden Elementen gefunden (Abschnitt 6.2.2 Abbildung 44). Beide Brennstoffe wurden ebenfalls in der 50 kW Anlage verwendet und wiesen auch dort die niedrigsten Partikelemissionen auf.

Mit allen anderen Brennstoffen wurde der Grenzwert meist deutlich überschritten. Daran ließ sich auch durch Optimierung der Kesseleinstellung auf den Brennstoff 12 nichts ändern (siehe Tabelle 19). Wie auch bei der 50 kW Anlage zeigte sich hierdurch eher ein Anstieg der partikelförmigen Emissionen. Außerdem wird auch für die Optimierungsversuche – trotz der hier zulässigen Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit von 40 % nach VDI 4207 [64] – der Grenzwert von 20 mg/Nm^3 überschritten (siehe hierzu auch Abschnitt 7).

Die partikelförmigen Emissionen (Gesamtstaub) der 100 kW Drehrostfeuerung liegen für die in beiden Anlagen verfeuerten Brennstoffe um 20 bis 48 % niedriger als bei der 50 kW Kipprostfeuerung. Hierbei spielen vermutlich Unterschiede in Luftstufung, Strömungsführung, Brennraumgeometrie und Brennraumtemperatur eine wichtige Rolle [45].

Tabelle 19: Staubemissionen der 100 kW Anlage gemessen mit Wöhler SM 500. Kesselparameter wurden schrittweise durch den Hersteller angepasst.

Kesseleinstellung		Optimierungsversuche durch Hersteller		
Brennstoff		12	12	12
mST	mg/Nm^3	70	59	75
mSTU	mg/Nm^3	42	35	45
Materialeinschub aktiv	sek/min	22	27	25
Saugzuggebläse V1	%	95	98	99
Sekundärluft V2	%	25	25	25
Lambda	-	550	570	575
Abgastemperatur	°C	180	205	210
Regelbereich Saugzug V1	%	5	8	8
Regelbereich Sekundärluft V2	%	5	8	8

*mST: Staubmesswert Wöhler SM 500 ohne Abzug der erweiterten Messunsicherheit. *mSTU: Staubmesswert Wöhler SM 500 nach Abzug der erweiterten Messunsicherheit nach VDI 4207.

Zur sicheren und konsequenten Einhaltung des Stufe-2-Staubgrenzwertes der 1. BImSchV ohne zusätzliche Staubminderungsmaßnahme reichen die zur Klassifizierung als EN*plus* Hackschnitzel verwendeten Brennstoffparameter für die hier untersuchten Feuerungen offenbar nicht aus. Dies wird auch durch die Messergebnisse aus den Projekten „OptiChip“ und „qualiS“ bestätigt, in denen die gemessenen Staubemissionen auch für weitere hochwertige Hackschnitzelqualitäten nach DIN EN ISO 17225-4 meistens oberhalb des Staubgrenzwertes von 0,02 g/Nm^3 lagen.

6.4 Regressionsberechnungen

Die gemessenen Emissionen von Kessel A = 50 kW, Kessel B = 100 kW werden im Folgenden anhand der Brennstoffqualität bewertet. Dabei wird zunächst auf die partikelförmigen Emissionen, danach auf CO und NO_X eingegangen.

6.4.1 Partikelförmige Emissionen

Der Anteil an den Gesamtstaubemissionen mit einem Partikeldurchmesser < 1 µm (PM1) ist häufig direkt abhängig von der Summe der aerosolbildenden Elemente im Brennstoff (K, Na, Pb, Zn) [40] [59]. Da bei handelsüblichen automatisch beschickten Feuerungen der Anteil von PM1 am Gesamtstaub meist über 80 % liegt [45] lässt sich dieser Zusammenhang vereinfacht auch auf den Gesamtstaub übertragen.

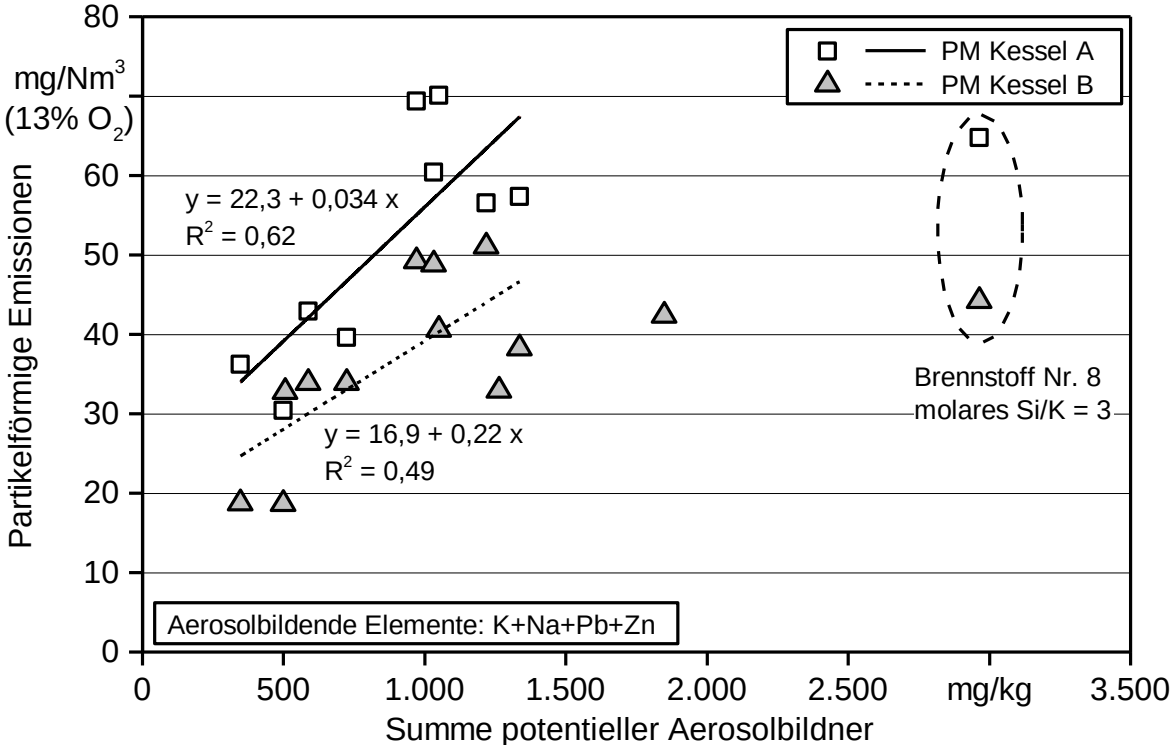


Abbildung 55: Lineare Regression der Partikelemissionen in Abhängigkeit von der Summe potentieller Aerosolbildner ∑(K, Na, Pb, Zn) (auf wasserfreier Bezugsbasis) in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). Datenpunkte > 1.500 mg/kg an aerosolbildenden Elementen wurden in der Regressionsberechnung nicht berücksichtigt.

Abbildung 55 zeigt die Partikelemissionen der beiden verwendeten Kessel in Abhängigkeit von der Summe der aerosolbildenden Elemente im Brennstoff. Bis zu einem Gehalt von ca. 1.500 mg/kg kann für beide Kessel ein linearer Anstieg von knapp unter 20 bis ca. 50 mg/Nm³ (Kessel B, R^2 = 0,49), bzw. von ca. 35 bis 70 mg/Nm³ (Kessel A, R^2 =

0,69) beobachtet werden. Die aerosolbildenden Elemente scheinen demnach ein geeigneter Indikator für eine brennstoffabhängige Abschätzung des erwarteten Staubemissionsniveaus an einer jeweils betrachteten Anlage zu sein.

Neben dem Gehalt an aerosolbildenden Elementen haben weitere Brennstoffparameter einen Einfluss auf den Gesamtstaub. So könnten z. B. die K-Freisetzung bei der Verbrennung und damit die Aerosolbildung bei hohen Gehalten an Si im Brennstoff limitiert sein [59]. Bei dem Datenpunkt mit den höchsten Gehalten an aerosolbildenden Elementen (Brennstoff 8, ca. 3.000 mg/kg) lag das molare Si/K-Verhältnis > 3 und damit deutlich oberhalb der Gehalte der übrigen Brennstoffe (Abbildung 46, Abbildung 55). Brennstoff 8 wurde deshalb bei den Regressionsberechnungen in Abbildung 55 nicht beachtet. Dennoch zeigt sich, dass die Partikelemissionen trotz hoher Gehalte an Aerosolbildnern bei sehr hohen molaren Si/K-Verhältnissen > 3 reduziert sein können (Abbildung 55) [59]. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem molaren Si/K-Verhältnis und der Höhe der partikelförmigen Emissionen lässt sich aus der geringen vorliegenden Datengrundlage nicht ableiten. Dennoch passen die Beobachtungen gut zu weiteren Beobachtungen aus der Literatur [59].

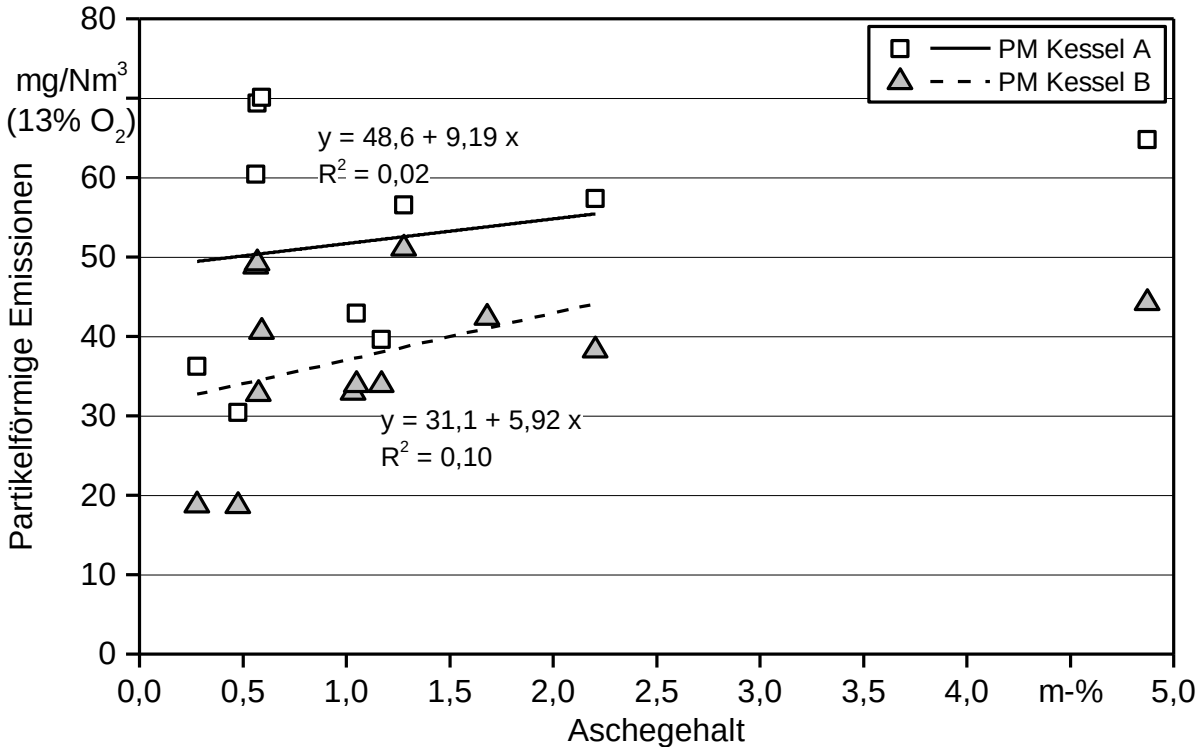


Abbildung 56: Lineare Regression der Partikelemissionen in Abhängigkeit vom Aschegehalt (auf wasserfreier Bezugsbasis) in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung). Aschegehalte > 3 m-% wurden in der Regressionsberechnung nicht berücksichtigt.

Zur Abschätzung des Anteils an aerosolbildenden Elementen und damit der partikelförmigen Emissionen wird gelegentlich der Aschegehalt als möglicher Indikator diskutiert.

Die gute Korrelation beider Brennstoffparameter in den hier untersuchten Proben lässt ähnliches vermuten (vgl. hierzu Abbildung 45). Bei der Verbrennung jedoch, besteht weder für Kessel A (50 kW, R^2 = 0,02) noch für Kessel B (100 kW, R^2 = 0,10) ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Aschegehalt und den Partikelemissionen, das zeigt Abbildung 56. Diese Beobachtung wurden auch in den Projekten „qualiS“ und „OptiChip“ gemacht. Der Aschegehalt ist demnach nur wenig geeignet, das erwartete Staubemissionsniveau an einer Feuerung brennstoffabhängig vorhersagen zu können.

Auffällig ist, dass selbst bei sehr niedrigen Aschegehalten zwischen 0 und 1 m-% eine erhebliche Streuung der partikelförmigen Emissionen zu beobachten ist. Diese ist bei höheren Aschegehalten > 1 m-% in den hier durchgeführten Versuchen nicht mehr so stark ausgeprägt ist. Der Übergangspunkt, ab dem die partikelförmigen Emissionen konstant erhöht sind, scheint bei ca. 0,5 m-% zu liegen. Oberhalb dieses Schwellenwertes lagen die Partikelemissionen beider Kessel zwischen 33 und 70 mg/Nm^3. Unterhalb eines Wertes von 0,5 m-% Asche konnte jedoch der Stufe-2-Grenzwert von 20 mg/Nm^3 der 1. BImSchV mit Kessel B ohne weitere Staubminderungsmaßnahmen eingehalten werden. Auch die Emissionen von Kessel A waren unterhalb von 0,5 m-% am niedrigsten. Die Anzahl an Datenpunkten ist jedoch zu gering, um allgemeine Schlussfolgerungen zu ermöglichen.

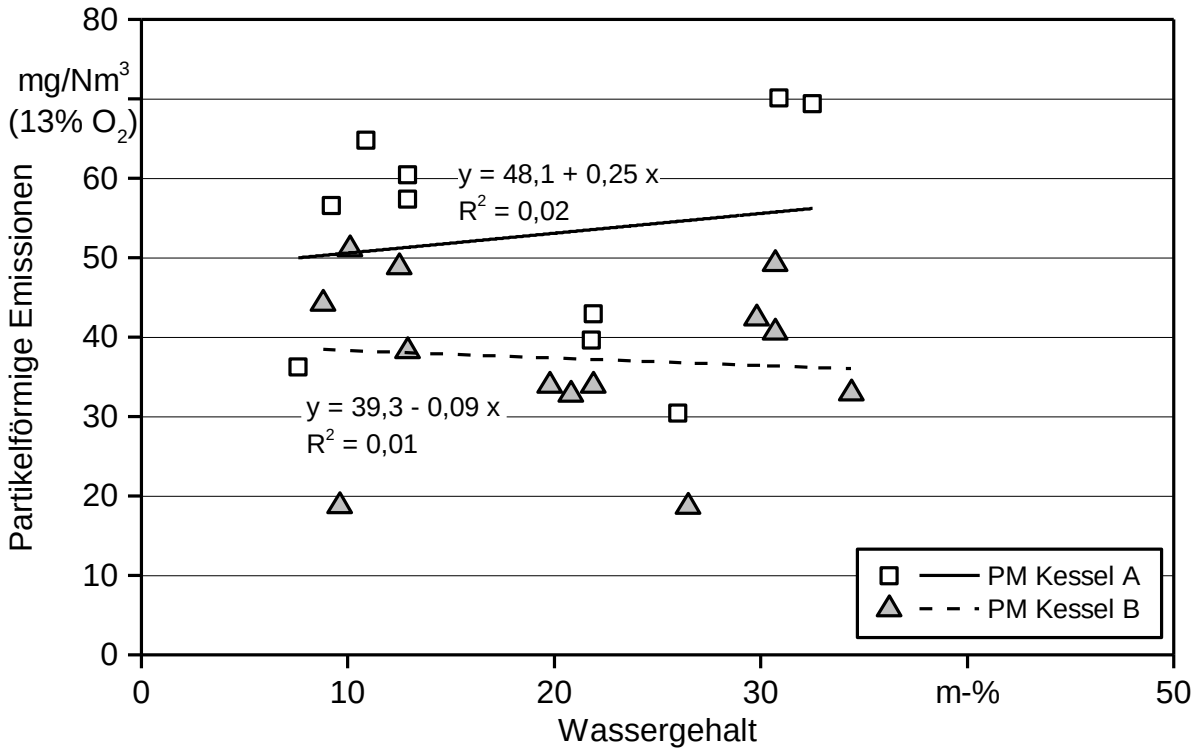


Abbildung 57: Lineare Regression der partikelförmigen Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung)

Neben Aschegehalt und den aerosolbildenden Elementen kann der Wassergehalt einen Einfluss auf die Staubemissionen haben [31] [41], das zeigt auch Abbildung 57. Ein klarer durchgehender Trend geht aber aus den hier vorliegenden Messdaten nicht hervor. Für Kessel A (50 kW) scheinen die partikelförmigen Emissionen jedoch oberhalb von 30 m-% anzusteigen. Ebenso werden Hinweise aus früheren Messungen (vgl. [41]) tendenziell bestätigt, dass auch sehr trockener Brennstoff ohne gleichzeitige Anpassung der Feuerungseinstellungen nach Möglichkeit zu meiden ist, da er ebenfalls zu Nachteilen beim Staubausstoß führen kann.

Aus früheren Messungen [40] ist auch bekannt, dass sich die Partikelgrößenverteilung aus Hackschnitzelfeuerungen mit zunehmendem Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes ändert. Dies hatte wiederum einen direkten Einfluss auf den PM1-Anteil am Gesamtstaub, welcher von 89 % bei 15 m-% Wassergehalt auf 64 % bei 35 m-% Wassergehalt bei ansonsten gleichen Brennstoffqualitäten absank [40]. Daher könnten die Effekte einer starken Wassergehaltsschwankung bei gleichzeitiger Änderung anderer Brennstoffparameter, z. B. der Summe aerosolbildender Elemente, sich gegenseitig abmildern oder verstärken, was für das relativ niedrige Bestimmtheitsmaß der Regressionen in Abbildung 55 verantwortlich sein könnte.

6.4.2 Emissionen an CO und organischen Kohlenwasserstoffen

Im Gegensatz zu den partikelförmigen Emissionen hat der Wassergehalt einen deutlichen Einfluss auf CO und die organischen Kohlenwasserstoffe (Abbildung 58, Abbildung 59).

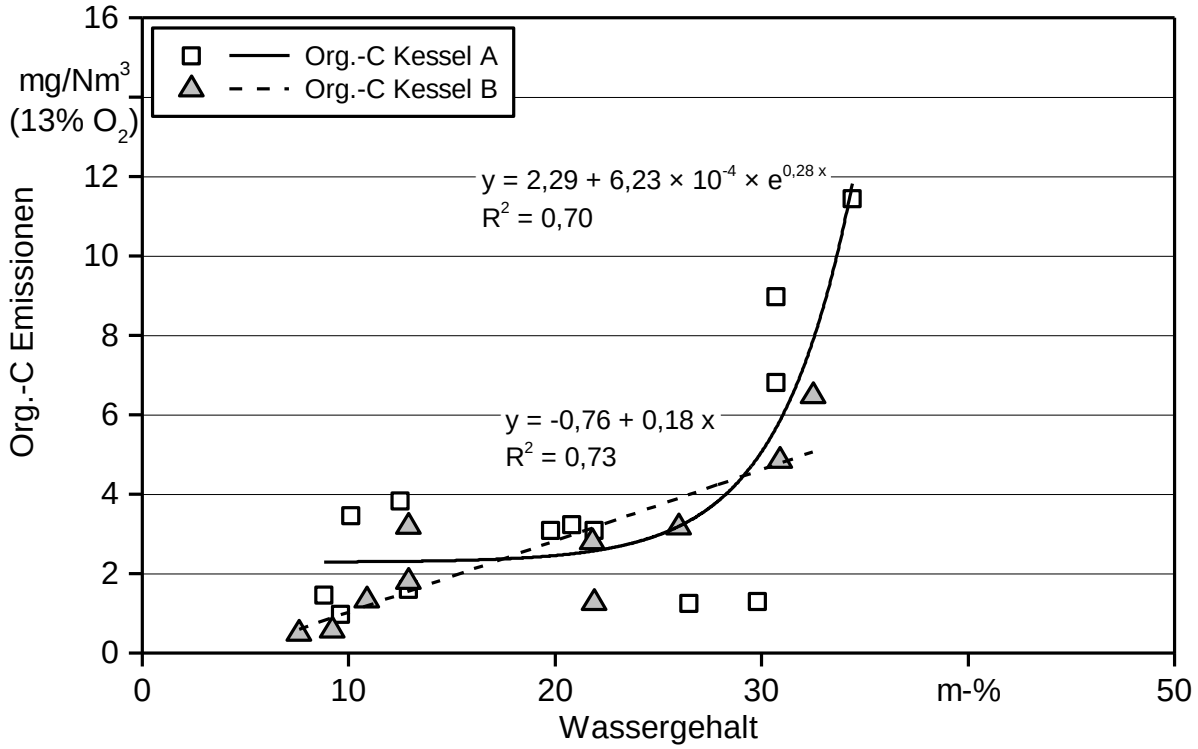


Abbildung 58: Regression der Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen (Org.-C) in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung).

So liegen z. B. die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen mit < 2 mg/Nm^3 in beiden Kesseln bei Wassergehalten unter 10 m-% generell auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei Wassergehalten zwischen 10 m-% und 30 m-% liegen die Org.-C-Emissionen für beide Kessel zwischen 1,4 mg/Nm^3 und 4 mg/Nm^3. Ab einem Wassergehalt von > 30 m-% steigen die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen jedoch um ein Vielfaches an, auf Werte von bis zu 14 mg/Nm^3 (Kessel A). Dies liegt vermutlich an der durch den erhöhten Energiebedarf zur Trocknung des Brennstoffs sinkenden Brennraumtemperatur, die dadurch zu einer weniger vollständigen Verbrennung geführt haben könnte [45]. Dabei scheint Kessel B (100 kW) relativ linear (R^2 =0,73), Kessel A (50 kW) sogar exponentiell (R^2 = 0,70) auf den steigenden Wassergehalt zu reagieren.

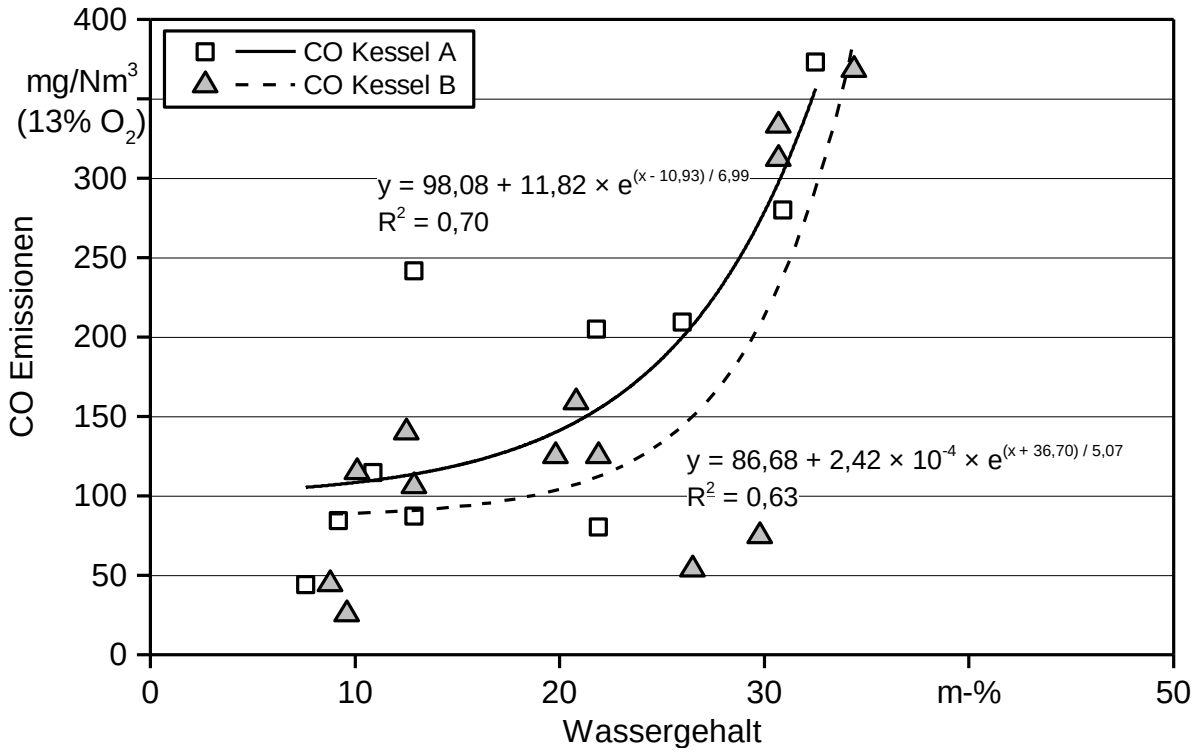


Abbildung 59: Regression der Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt in Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung).

Analog wiesen die gemessenen CO Emissionen der beiden Hackschnitzelkessel starke Unterschiede in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Brennstoffe auf (Abbildung 59). Dabei stiegen die CO Emissionen für beide Kessel mit zunehmendem Wassergehalt (ab ca. 25 m-%) exponentiell an. Als Grund hierfür wird dieselbe Ursache wie für Org.-C Emissionen angenommen. Durch den erhöhten Trocknungsenergiebedarf des Brennstoffs im Kessel sinkt vermutlich die Temperatur der Brennkammer und führt somit zu einer weniger vollständigen Verbrennung der Brennstoffe, d. h. die Emissionen an CO und an Org.-C nehmen zu [45]. Für die beiden verwendeten Kleinfeuerungsanlagen scheinen Wassergehalte über 30 m-% daher nicht gut geeignet zu sein.

6.4.3 Stickoxidemissionen

Analog zu den Staubemissionen und den Emissionen an CO und Org.-C. lassen sich die Stickoxidemissionen (NO_X) auf die Brennstoffqualität zurückführen. Abbildung 60 zeigt einerseits die lineare Abhängigkeit zwischen Brennstoffstickstoff und NO_X Emissionen, andererseits gleichzeitig aber auch den Einfluss der jeweiligen Feuerungstechnologie (Drehrost, Kipprost) (vgl. Abschnitt 6.3.2). Die Ergebnisse aus den Projekten „qualiS“ und „OptiChip“ deuten in dieselbe Richtung. Eine Verminderung des Stickstoffgehalts im Brennstoff kann somit als wirksame Stellschraube für die Reduzierung von NO_X Emissionen angenommen werden [45] [29] [59].

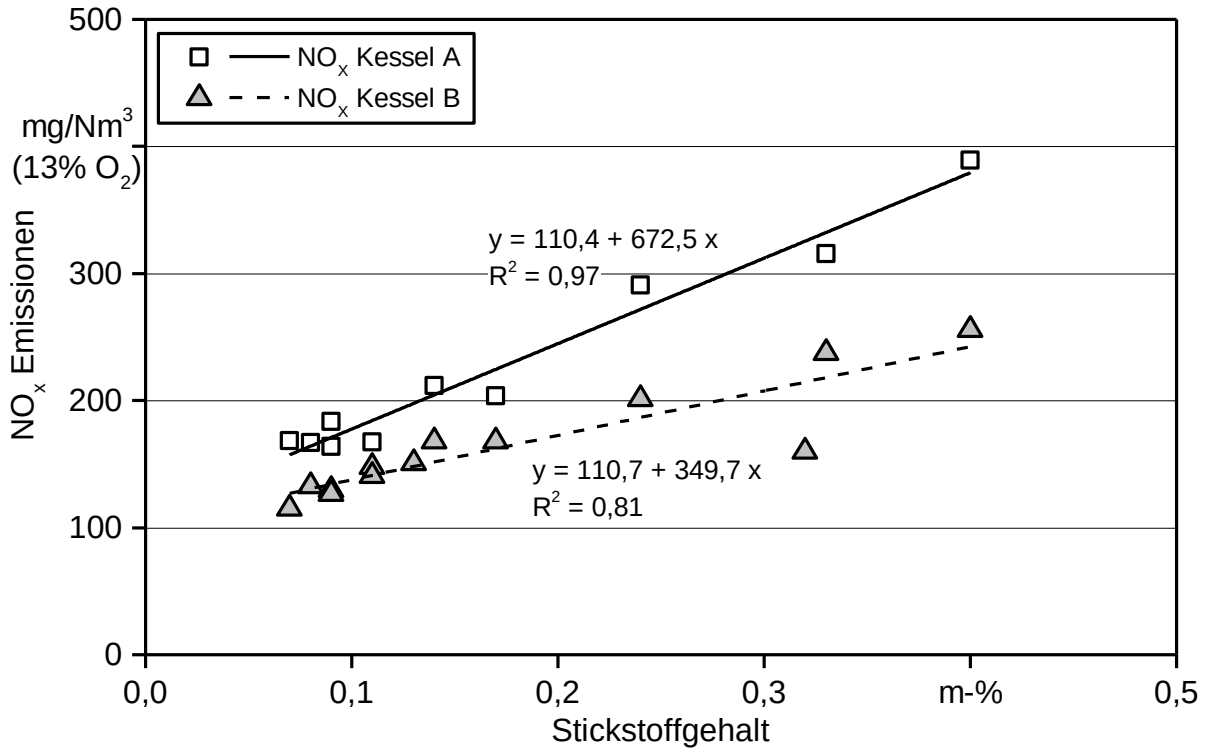


Abbildung 60: Lineare Regression der NO_X Emissionen in Abhängigkeit vom Brennstoffstickstoffgehalt für Kessel A (50 kW Kipprostfeuerung) und Kessel B (100 kW Drehrostfeuerung).

Die durchweg niedrigeren NO_X Emissionen von Kessel B im Vergleich zu Kessel A könnten wie bereits in Abschnitt 6.3.2 diskutiert durch eine bessere Homogenisierung und eine bessere Strömungsführung der Verbrennungsgase über dem Rost sowie durch die Luftstufung bedingte Zonen mit Sauerstoffmangel (reduzierende Bedingungen) bedingt sein [37] [45] [51].

6.4.4 Abschließende Bemerkungen

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass ausgewählte Brennstoffparameter wie der Wassergehalt, der Stickstoffgehalt oder die Summe der aerosolbildenden Elemente vielversprechend sind, um Tendenzen bei den Emissionen von automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlagen vorhersagen zu können. Weitere Brennstoffparameter wie die Partikelgröße oder der Feinanteil zeigten für die hier verwendeten Brennstoffe und Kessel keine eindeutigen Trends (Daten nicht gezeigt). Hierzu sind Auswertungen mit einer breiteren Datengrundlage notwendig.

Außer beim Einfluss des Stickstoffgehalts auf die Stickoxidemissionen sind die Berechnungen jedoch starken Schwankungen unterworfen. Ein eindeutiger Parameter mit dem sich z. B. die partikelförmigen Emissionen einigermaßen zuverlässig abschätzen lassen, kann sich aus den bisherigen Betrachtungen nicht abgeleitet werden. Da es sich bei den untersuchten Brennstoffen um Naturprodukte aus sehr unterschiedlichen Ausgangsma-

terialien handelt, bei denen sich immer eine Vielzahl an Brennstoffparametern gleichzeitig ändert, ist ein direkter Rückschluss über einen einzelnen Brennstoffparameter aufgrund der geringen Versuchsanzahl schwierig. Dabei kann es zu Überlagerungen der Effekte mehrerer Parameter kommen, die teils gegenläufige Einflüsse auf die Emissionsbildung haben, z. B. die gleichzeitige Änderung von Wassergehalt, Feingehalt, Aschegehalt oder den Gehalt an aerosolbildenden Elementen. Auch können z. B. chemische Inhaltsstoffe aufgrund von unterschiedlichen Herkünften (Holz, Mineralboden, etc.) in unterschiedlicher Bindungsform vorliegen [29]. Sie können somit bei der Verbrennung unterschiedlich reagieren.

Durch eine gemeinsame Analyse der Daten aus den drei Verbundprojekten „HackZert“, „qualiS“ und „OptiChip“ kann für die Auswertung eine deutlich breitere Datenbasis zugrunde gelegt werden. Hierdurch werden bessere Aussagen über einen größeren Wertebereich, z. B. hinsichtlich der Rolle des Si/K-Verhältnisses bei der Aerosolbildung möglich. Eine abschließende Gesamtbetrachtung aller drei Verbundprojekte wird im Laufe des Jahres 2017 in der Schriftenreihe „Berichte aus dem TFZ“ veröffentlich.

6.5 Ausblick Ökodesign Richtlinie (1. BImSchV, Ökodesign)

Im Laufe der kommenden Jahre werden neue, auf europäischer Ebene beschlossene Richtlinien für die Luftreinhaltung in nationalen Richtlinien umgesetzt. Für Kleinfeuerungsanlagen ist die sogenannte „Ökodesign-Richtlinie“ ausschlaggebend.

Tabelle 20 zeigt die Stufe-2-Grenzwerte der 1. BImSchV (Stand 2010) [8] im Vergleich mit den geforderten Grenzwerten nach Ökodesign (Stand 2015) [4], die für Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von bis zu 500 kW ab dem 1.1.2020 gelten sollen. Die Emissionsgrenzwerte nach Ökodesign-Richtlinie werden auf die sogenannten „Raumheizungs-Jahres-Emissionen“ bei 10 % Bezugssauerstoff bezogen. Der für Kleinfeuerungsanlagen neu hinzukommende Grenzwert für NO_X läge dementsprechend z. B. bei 200 mg/Nm^3 (bei 10 % O_2) bzw. bei ca. 145 mg/Nm^3 (bei 13 % O_2).

Tabelle 20: Vergleich des Stufe-2-Grenzwertes der 1. BImSchV mit den Grenzwerten der Ökodesign Richtlinie für automatisch beschickte Feuerungen, bezogen auf 13 % Bezugssauerstoff

	1. BImSchV	Ökodesign*
Datum/Stand	26.01.2010	28.04.2015
Umzusetzen bis	-	01.01.2020
Anwendungsbereich	> 4 kW bis < 1 MW	bis 500 kW
CO in mg/Nm^3	400	364
Org.-C in mg/Nm^3	-	15
NO_X in mg/Nm^3	-	145
Staub in mg/Nm^3	20	29

*Nachweis erfolgt durch Prüfstandsmessung (Typenprüfung), keine wiederkehrende Messung durch den Schornsteinfeger. Alle Angegebenen Grenzwerte wurden auf einen einheitlichen Sauerstoffgehalt von 13 % umgerechnet.

Die Raumheizungs-Jahres-Emissionen berechnen sich bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, sowie bei automatisch befeuerten Festbrennstoffkesseln auf folgende Weise [4]:

$$E_s = 0{,}85 * E_{s,p} + 0{,}15 * E_{s,n}$$

E_s entspricht dabei der Raumheizungs-Jahres-Emission, $E_{s,p}$ bezeichnet die Emission bei Teillast (30 % der Nennlast bei automatisch beschickten Feuerungen) und $E_{s,n}$ ist die Emission bei Nennwärmeleistung. Die Raumheizungs-Jahres-Emissionen und die damit geforderten Grenzwerte setzen sich also aus einer Gewichtung der Emissionen bei Nenn- (15%) und bei Teillast (85%) zusammen. Dabei werden im Gegensatz zu den Werten der 1. BImSchV allerdings nur Prüfstandsmessungen (Typenprüfung) herangezogen. Eine wiederkehrende Überprüfung durch den Schornsteinfeger ist in der EU-Richtlinie nach aktuellem Stand nicht vorgesehen.

Für die die CO Emissionen der hier verwendeten Kessel können die Raumheizungs-Jahres-Emissionen direkt anhand der Typenprüfergebnisse (Tabelle 21) berechnet werden. Dadurch würden sich für Kessel A Raumheizungs-Jahres-Emissionen von rund 156 mg/Nm^3 und für Kessel B rund 81 mg/Nm^3 ergeben, womit der CO Grenzwert nach Ökodesign in beiden Fällen eingehalten wäre.

Tabelle 21: Typenprüfergebnisse (in mg/Nm^3 bei 13% O_2) der 50 kW Kipprostfeuerung und der 100 kW Drehrostfeuerung bei Nennlast und Teillast (Quelle: BAFA-Liste der förderfähigen automatisch beschickten Biomasseanlagen [7])

	CO bei Nennlast	CO bei Teillast	Staub bei Nennlast
Kessel A 50 kW	105	168	15
Kessel B 100 kW	10	94	13

Für Staub liegen derzeit leider nur Typenprüfergebnisse bei Nennlast vor. NO_x sowie Org.-C Emissionen sind derzeit nicht Bestandteil der Typenprüfung bzw. der 1. BImSchV. Daher liegen hier ebenfalls keine Typenprüfungsergebnisse vor. Um trotzdem eine Aussage zu den zukünftigen Grenzwerten treffen zu können, werden im Folgenden Werte von Praxismessungen aus dem Projekt „OptiChip“ herangezogen. Hier wurde Kessel A sowohl bei Nennlast als auch bei Teillast mit qualitativ sehr hochwertigen Hackschnitzeln ohne Rinde (ähnlich den Brennstoffen für die Typenprüfung) betrieben. Trotzdem sollten diese Werte auf keinen Fall mit Typenprüfergebnissen direkt verglichen werden, da diese aus Erfahrung tendenziell auf einem deutlich niedrigeren Niveau liegen als bei praxisnahen Prüfungen auf dem Feuerungsprüfstand. So lagen die CO Emissionen bei den Messungen aus dem Projekt „OptiChip“ bei Teillast erwartungsgemäß durchschnittlich um das 15 bis 20-fache höher als bei der Teillastmessung nach Typenprüfung. Der Grenzwert der Ökodesign Richtlinie von 364 mg/Nm^3 wäre hier in diesem Fall überschritten gewesen. Die CO Emissionen bei Nennlast lagen interessanterweise mit 39 bis 66 mg/Nm^3 niedriger als die Werte der Typenprüfung (Tabelle 21).

Die partikelförmigen Emissionen waren bei Teillastmessung im Projekt „OptiChip“ durchschnittlich um das ca. 3- bis 6-fache höher als bei Nennlast. Der Grenzwert der Ökodesign Richtlinie von 29 mg/Nm^3 wäre auch in diesem Fall überschritten worden. Allerdings lagen auch die Messwerte bei Nennlast mit 24 bis 61 mg/Nm^3 deutlich über dem Wert aus der Typenprüfung (Tabelle 21).

Der Grenzwert für NO_X von 145 mg/Nm^3 bei 13% O_2 scheint auf den ersten Blick relativ streng, jedoch sind erfahrungsgemäß die NO_X Emissionen bei Teillast durch die niedrigere Brennraumbelastung (weniger Brennstoffeintrag) tendenziell niedriger als bei Nennlast [45]. Im Projekt „OptiChip“ lagen die NO_X Emissionen der 50 kW Anlage bei Teillast um ca. 24 % niedriger als bei Volllast. Somit führten die Messwerte im Projekt „OptiChip“ bei Volllast und bei Teillast mit den untersuchten Brennstoffen zu Raumheizungs-Jahres-Emissionen, die konstant unter dem Grenzwert von 145 mg/Nm^3 bei 13 % O_2 lagen.

Die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen lagen im Projekt „OptiChip“ bei Teillast im Durchschnitt um das ca. 2 bis 20-fache höher als bei Nennlast. Damit konnte der Grenzwert der Raumheizungs-Jahres-Emissionen nur in einem von 6 Fällen eingehalten werten.

Im Gegensatz zu den Messergebnissen aus dem Projekt „OptiChip“ verwenden Kesselhersteller typischerweise während der Typenprüfung bei Teillast andere Kesseleinstel-

lungen als bei der Nennlastmessung (Aussage Kesselhersteller A). Im Projekt „OptiChip“ wurden aber identische Einstellungen bei Teil- und Nennlast verwendet um einen besseren Praxisbezug zum Realbetrieb im Feld darzustellen (modulierender Betrieb). Daher sollten die genannten Tendenzen der Org.-C, CO, NO_X und Staubemissionen im Hinblick auf die Chancen für das Bestehen einer Ökodesign-Prüfung nicht überbewertet werden.

Eine abschließende Bewertung der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie wird erst möglich sein, wenn die tatsächlichen nationalen Regelungen bekannt sind. Dennoch zeigen die Ergebnisse für die NO_x Emissionen jetzt schon, dass, sollten keine weiteren nationalen Verschärfungen hinzukommen, es mit aktueller Feuerungstechnik möglich ist die NO_X Grenzwerte nach Ökodesign ohne Sekundärmaßnahmen einzuhalten.

6.6 Zusammenfassung der Emissionsmessungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kriterien für die Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln nach EN*plus* von den Brennstoffproduzenten eingehalten werden kann. In den meisten Fällen stimmen zudem die Angaben zur Brennstoffqualität seitens der Produzenten mit den tatsächlichen Messungen überein.

Beide im Versuch verwendeten Kessel konnten mit Hackschnitzeln nach EN*plus* die Grenzwerte für CO der Stufe 2 der 1. BImSchV einhalten. Die Einhaltung des Grenzwertes für partikelförmige Emissionen der Stufe 2 der 1. BImSchV konnte mit den im Projekt HackZert verwendeten Brennstoffen und Kesseln nicht grundsätzlich gewährleistet werden, sofern zur Messung die Referenzmessmethode der Staubkonzentrationsbestimmung (ohne Abzug einer Messunsicherheit) angewendet wurde. Auch eine nachträgliche Anpassung der Kessel brachte dabei keine besseren Ergebnisse.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die in den gängigen Normen verwendeten Kriterien und Qualitätsparameter, wie die Partikelgrößenverteilung, der Aschegehalt, der Wassergehalt und der Feingehalt, zur Beschreibung von Qualitätshackschnitzeln nur bedingt geeignet sind, um das erwartete Emissionsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen ausreichend sicher abschätzen zu können. Vor allem hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen kann damit bisher keine Gewährleistung zur Einhaltung des Stufe-2-Grenzwertes der 1. BImSchV gegeben werden. Erste Ansätze sind jedoch aus den hier vorliegenden Messdaten möglich. So zeigt sich, dass für die hier verwendeten Kleinfeuerungsanlagen der Wassergehalt optimaler Weise nicht über 25 m-% liegen sollte (EN*plus* A1). Bei der Verwendung dieser Qualitätsklasse sollte es auch bei weiteren aktuellen Kesseln keine Probleme mit der Einhaltung des CO Grenzwertes und mit Geruchsbelästigungen durch hohe Org.-C Emissionen geben. Hierbei ist jedoch auf die Angabe des optimalen Wassergehalts seitens der Hersteller zu achten.

Bezüglich der partikelförmigen Emissionen scheinen Aschegehalte von < 0,5 m-% sinnvoll zu sein, um die Emissionen in Richtung des 20 mg/Nm^3 Grenzwertes der Stufe 2 der 1. BImSchV abzusenken. Eine sichere Bereitstellung von Brennstoffen mit Aschegehalten < 0,5 m-% wird in der Praxis jedoch nur mit sehr großen Aufwand und Kosten reali-

sierbar sein. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass der Aschegehalt ein sehr unsicherer Parameter für die Abschätzung der erwarteten partikelförmigen Emissionen ist.

Zu bemerken ist, dass in den hier dargestellten Versuchen die erweiterte Messunsicherheit der Schornsteinfegermessgeräte von 40 % [64] sowie der in manchen Bundesländern bis 2018 zulässige Abzug des Brennstoffunsicherheitswertes von 7 mg [64] nicht verwendet wurden. Diese dürfen bei den Messungen der partikelförmigen Emissionen nach VDI 2066 [62], welches das Referenzmessverfahren für die Bewertung dieser Messunsicherheit darstellt, nicht berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 7).

Nach Abschluss der drei Projekte „HackZert“, „qualiS“ und „OptiChip“ werden die gesammelten Ergebnisse in einer Gesamtauswertung aller Feuerungsversuche analysiert, um weitere Erkenntnisse auf einer breiteren Datenbasis gewinnen zu können. Die Veröffentlichung dieser ist nach Projektende in der Schriftenreihe des TFZ für den Sommer/Herbst 2017 geplant.

7 Messgenauigkeit von Schornsteinfegermessgeräten

7.1 Hintergrund der Vergleichsmessungen

Im Rahmen von wiederkehrenden Überprüfungen von Feuerstätten in Privathaushalten kam es in der Vergangenheit bereits zu einigen Beanstandungen bezüglich der Nichteinhaltung der Grenzwerte gemäß der 1. BImSchV. Diese Beanstandungen müssen nicht zwangsweise der Feuerstätte oder dem Brennstoff angelastet werden, sondern könnten auch von dem jeweiligen Messgerät selbst verursacht werden. Die zugelassenen Messgeräte können dabei teilweise erhebliche Abweichungen vom Referenzmessverfahren aufweisen. Deshalb wird den Geräten derzeit gemäß der VDI 4207-2 eine 40 %-ige Messtoleranz bezüglich Gesamtstaub und eine 20 %-ige Messtoleranz für Kohlenmonoxid eingeräumt [64]. Diese als „erweiterte Messunsicherheit“ bezeichnete Toleranz wird vom jeweiligen Messwert rechnerisch abgezogen. Hierbei besteht u. a. die Vermutung, dass die Messgeräte auf die (je nach Brennstoff) schwankenden Staubeigenschaften unterschiedlich reagieren, zumal die Schornsteinfegermessgeräte verschiedene Messprinzipien aufweisen.

Im Teilvorhaben 2 des Projekts „HackZert“ erfolgte ein direkter Vergleich von nach VDI 4206 (Teil 1 und 2 [60] [61]) eignungsgeprüften Messgeräten an einer Messstrecke mit identischen Abgas- und Staubzusammensetzungen. Die Messungen aller Geräte wurden zeitgleich durchgeführt, wodurch diese direkt mit den entsprechenden Referenzmessverfahren verglichen werden konnten. Ziel der Vergleichsmessungen war es, die Messgenauigkeit der Geräte unter Praxisbedingungen zu überprüfen und u. a. mögliche brennstoffabhängige Abweichungen qualitativ zu bewerten. Hierdurch lässt sich die Breitbandtauglichkeit der Messgeräte für den Praxisbetrieb beurteilen.

7.2 Material und Methoden

7.2.1 Ausgewählte Messgeräte

Für den Messgerätevergleich kamen folgende zugelassene Geräte und Verfahren zum Einsatz (Abbildung 61):

- Staubmessverfahren nach VDI 2066/ VDI 4206 (zweimal, jeweils vor und nach den Schornsteinfegermessgeräten),
- Afriso STM 225 Set (Staub) und MULTISYSER® Ste (Abgasanalyse),
- Testo 380 (Staub) und testo 330 (Abgasanalyse),
- Wöhler SM 96 und das
- Wöhler SM 500.

Die Reihenfolge der Nennung der Geräte entspricht nicht der Reihenfolge im Versuchsaufbau. Die Messungen erfolgten gemäß Bedienungsanleitung des jeweiligen Gerätes.

Afriso:
STM 225 Set
(Staub)
MULTISYSER® Ste
(Abgasanalyse)

Testo:
380 (Staub)
330 (Abgasanalyse

Wöhler:
SM 96

Wöhler:
SM 500

Abbildung 61: Eingesetzte Schornsteinfegermessgeräte für die Vergleichsmessungen

Das Referenzmessverfahren nach VDI 2066 [62] ist bereits in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Es kam die Staubsonde von Paul-Gothe zum Einsatz. Die 12-mm-Düse war stets entgegengesetzt der Strömungsrichtung in den Abgastunnel eingebaut (180° Düsenorientierung) und die Probenahme erfolgte isokinetisch. Für die Vergleichsmessungen wurde diese Methode an die Eignungsprüfung nach VDI 4206 (Blatt 1 und 2) angepasst. Dies betrifft die eingestellte Filtrationstemperatur auf 100 °C während der Staubprobenahme sowie der thermischen Nachbehandlung aller Filtermedien bei 110 °C für eine Stunde [61]. Außerdem wurde die Probenahmesonde nach jeder Staubmessungen dreimal mit einem Aceton/Isopropanol-Gemisch (1:1) gespült und die Rückstände ebenfalls bei 110 °C abgedampft und getrocknet. Nach der thermischen Behandlung wurden die Filtermedien und Spülbehälter für mindestens 8 Stunden in einem Exsikkator getrocknet. Jede verwertbare Messung dauerte 15 Minuten, da die Schornsteinfegermessgeräte immer über diesen Zeitraum die zu überwachenden Kenngrößen bestimmten.

Das **Afriso**-Gerät hat eine auf 60 °C beheizte Probenahmeleitung und die Staubentnahmesonde ist in entgegengesetzter Strömungsrichtung ausgerichtet. Das Messgerät ist nach 11 Minuten betriebsbereit und es können zwei verschiedene Messbereiche vor der Messung eingestellt werden: „Unter 100 mg/Nm^{3}“ bzw. „über 100 mg/Nm^{3}“. Weitere Details können der Bedienungsanleitung entnommen werden.

Das **testo 380** hat eine auf 120 °C beheizte Probenahmeleitung. Die Staubentnahmesonde ist im rechten Winkel zur Strömungsrichtung angeordnet. Das auf 120 °C beheizte Abgas wird in einen Rotationsverdünner geleitet und auf 80 °C abgekühlt. Je nach Staubbeladung wird während einer sogenannten Stabilisierungsphase vor der eigentlichen Messung entweder ein Verdünnungsverhältnis von 1:60 bzw. 1:120 vom Gerät selbst ausgewählt. Das Messgerät ist nach ca. 10 bis 15 Minuten betriebsbereit. Zum

Zeitpunkt der Messungen war für den CO-Gehalt eine Messunsicherheit von 11,4 % hinterlegt und für den Gesamtstaub ein Faktor in Abhängigkeit vom zu überwachenden Grenzwert. Auch an diesem Gerät konnten zwei Messbereiche voreingestellt werden: „Unter 20 mg/Nm^3“ und „bis 150 mg/Nm^3“.

Das dritte Messgerät war das Wöhler SM 96, welches eine auf 70 °C beheizte Sonde aufweist und die Staubentnahme in entgegengesetzter Strömungsrichtung erfolgt. Das Absaugvolumen beträgt 9 Nl/min und wird über eine voreingewogene Glasfaserfilterhülse als Abscheidemedium geleitet. Die Filterhülse wird nach der Messung bei 110 °C thermisch für eine Stunde behandelt und anschließend im Exsikkator über Nacht abgekühlt. Das Gerät ist nach ca. 2 Minuten betriebsbereit und die Bestimmung von CO erfolgt einmalig am Ende der Messung, indem das gesammelte Abgas aus dem Beutel analysiert wird. Dieses Messgerät ist das älteste der verwendeten Geräte und ist für die Überwachung der Grenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV nicht zugelassen (nur bis Stufe 1). Weil derartige Geräte noch im Einsatz sind und auch bei der Feuerungsprüfung auf Prüfständen zum Einsatz kommen, wurde es hier mit berücksichtigt.

Das vierte Messgerät war das Wöhler SM 500 mit einer Sonden-und Abscheidetemperatur von 75 °C. Die Staubentnahmesonde erfolgt in entgegengesetzter Strömungsrichtung. Es sind keinerlei Vor- oder Nachbehandlung der Filtermedien notwendig, da die Gewichtszunahme über eine kontinuierliche interne Wiegung erfolgt. Für die Versuche wurde stets eine frische Filterpatrone verwendet. Das Gerät benötigt ca. 12 Minuten Vorlaufzeit sowie eine ein-minütige Nullungsphase unmittelbar vor der Messung. Es können zwei Messbereiche vor der Messung eingestellt werden: Stufe 1 mit einem Absaugvolumen von 3,0 Nl/min bzw. Stufe 2 mit einem Absaugvolumen von 4,5 Nl/min.

Alle Geräte geben die Emissionswerte in einem anderen Format mit verschiedenen Bezeichnungen aus. Für den Messgerätevergleich wurden stets die gemessenen Werte für CO und Staub herangezogen, ohne dass die zugelassenen erweiterten Messunsicherheiten der Geräte abgezogen wurden.

7.2.2 Versuchsaufbau für die Vergleichsmessungen

Für die Vergleichsmessungen wurde der gleiche 50 kW Hackschnitzelkessel mit Kipprostfeuerung wie bei den bisher gezeigten Feuerungsversuchen eingesetzt (vgl. Abschnitt 6). In der folgenden Abbildung ist der Versuchsaufbau für die Vergleichsmessungen dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass für die vergleichende Beurteilung die Messgeräte anonymisiert werden. Dabei befindet sich das Gerät A an der ersten Messstelle und das Gerät D an der vierten Messstelle, Abbildung 62. Vor und nach den Schornsteinfegermessgeräten erfolgte die Gesamtstaubbestimmung nach dem Referenzverfahren nach VDI 2066 [62].

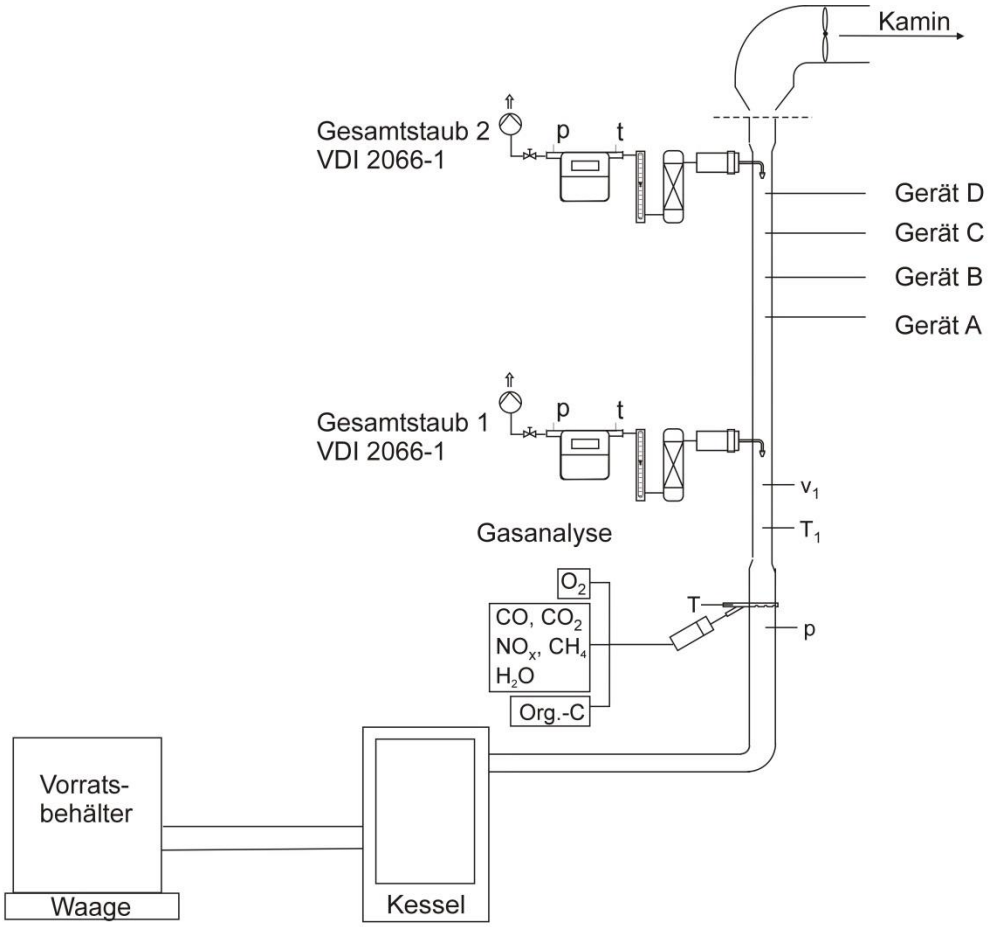


Abbildung 62: Versuchsaufbau für die Vergleichsmessungen mit vier Schornsteinfegermessgeräten

Um ein möglichst breites Spektrum an Gesamtstaubemissionen zu realisieren wurden unterschiedliche Brennstoffe verwendet. Es kamen zwei Pellet-Sortimente (Gemisch aus Kiefer und Fichte, Gemisch aus 30 % Weide und 70 % Fichte) bei Volllast zum Einsatz, um den unteren Messbereich mit ca. 20 mg/Nm^3 zu repräsentieren. Ebenso wurden sechs unterschiedliche Holzhackschnitzelqualitäten (HHS) bei Volllast und zwei Hackschnitzelsortimente bei Teillast eingesetzt. Für den oberen Bereich der Gesamtstaubemissionen wurden dabei Hackschnitzel aus Silberweide (KUP) nach einem 6-jährigen Umtrieb verwendet.

Der Kessel wurde stets mit dem jeweiligen Brennstoff auf stationäre Bedingungen eingestellt, ehe die jeweiligen 15-minütigen Schornsteinfeger-Messungen durchgeführt wurden. Je Versuch wurden 5 Messungen durchgeführt. Die Umrüstdauer (Reinigung der Messgeräte, Filterwechsel, erneutes Temperieren der Geräte und Probenahmesonden) betrug ca. eine Stunde. Für eine Messkampagne waren vier Personen erforderlich.

7.3 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

7.3.1 Überprüfung der Schornsteinfegermessgeräte

Bevor die Vergleichsmessungen durchgeführt wurden, erfolgte eine Überprüfung der einzelnen Geräte, um die Funktionstüchtigkeit zu testen. Hierzu wurden die Schornsteinfegermessgeräte mit einem Kalibriergas aus unterschiedlichen Anteilen von CO in Stickstoff beaufschlagt. Die Geräte zeigten eine gute Übereinstimmung (Daten nicht gezeigt).

7.3.2 Ergebnisse der Messgeräte bezüglich Kohlenmonoxid

Alle eingesetzten Messgeräte können die CO-Konzentration bestimmen. Als Referenzsystem wurde die stationäre Gasanalyse des TFZ gewählt, wobei CO mit Hilfe eines FTIR-Gerätes gemessen wurde (vgl. Kapitel 6.1). Ebenso wurde der Sauerstoffgehalt im Abgas für die Umrechnung auf 13 % ermittelt.

Die tatsächlichen CO-Konzentrationen im Abgas variierten von 10 bis 1.400 mg/Nm^3, wobei die höchsten Emissionen bei der Verbrennung der Silberweide (KUP) nachgewiesen wurden.

Für CO besteht eine erweitere Messunsicherheit von 20 Prozent. Dieser Wert wird in den in den folgenden Auswertungen (Abbildung 63 bis Abbildung 66) berücksichtigt und durch die unterbrochenen, schwarzen Linien dargestellt. Die obere der beiden Linien gibt dabei den Messwert wieder, den das Gerät maximal anzeigen darf, um mit Abzug einer Messunsicherheit von 20 % den Referenzwert nicht zu überschreiten. Die untere Linie gibt den Referenzwert nach Abzug der 20 % Messunsicherheit wieder. Liegen Werte außerhalb der Messunsicherheit, wären die zulässigen Abweichungen vom Referenzwert überschritten.

Das Gerät A misst die CO-Konzentration über den gesamten Messbereich sehr zuverlässig. Dabei sind keine besonderen Auffälligkeiten erkennbar. Das Bestimmtheitsmaß beträgt ist mit R^2 = 0.99 sehr hoch (siehe Abbildung 63).

Das Gerät B zeigt im Gegensatz zum Gerät A Abweichungen bezüglich CO auf. Vor allem bei der Verwendung von Hackschnitzeln aus Silberweide (KUP) kam es zu einer Unterschätzung der CO-Konzentration, was zu einem durchschnittlichen Minderbefund von 17 % führt (siehe Abbildung 64). Werden die Messungen aus den Versuchen mit Silberweide eliminiert, verbessert sich die Messgenauigkeit des Gerätes B und es kommt lediglich zu einer Unterschätzung von ca. 5 % (hier nicht grafisch dargestellt).

Das Gerät C bestimmt den CO-Gehalt ebenfalls zuverlässig über den gesamten Messbereich, unabhängig vom eingesetzten Brennstoff. Das Bestimmtheitsmaß ist mit R^2 = 0,99 ebenfalls sehr hoch (siehe Abbildung 65).

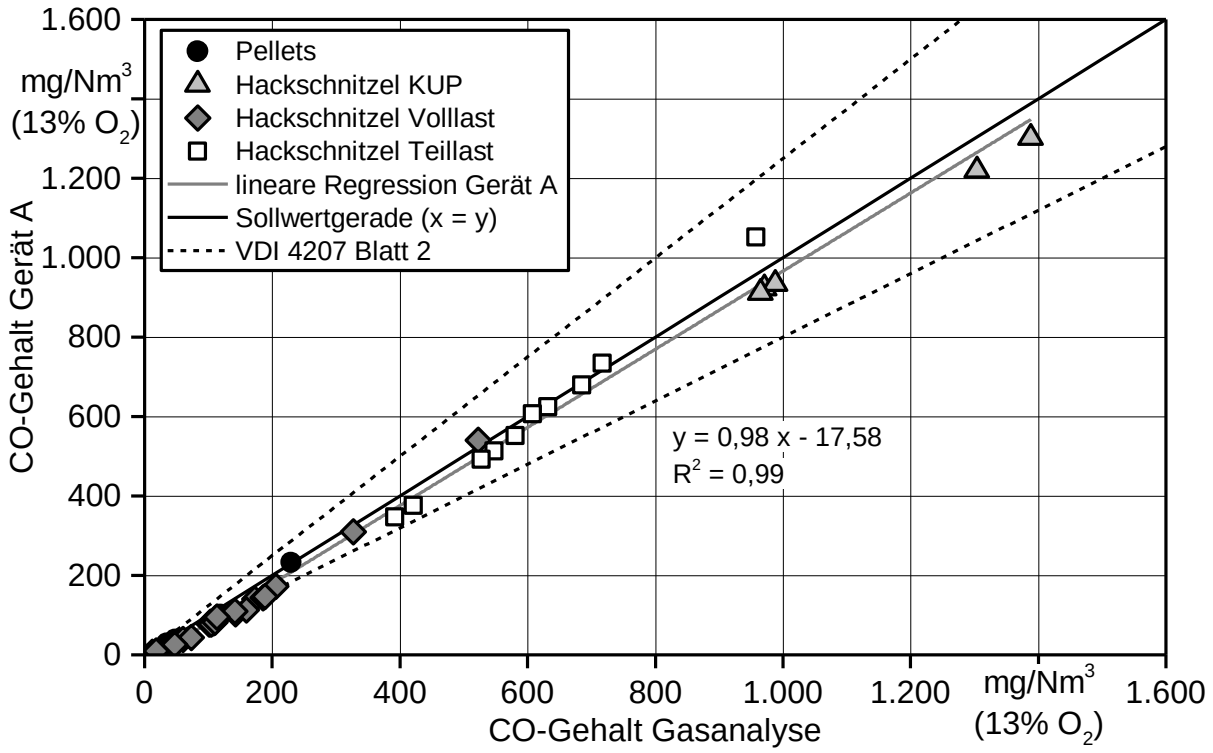


Abbildung 63: Ergebnisse von Gerät A bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2.

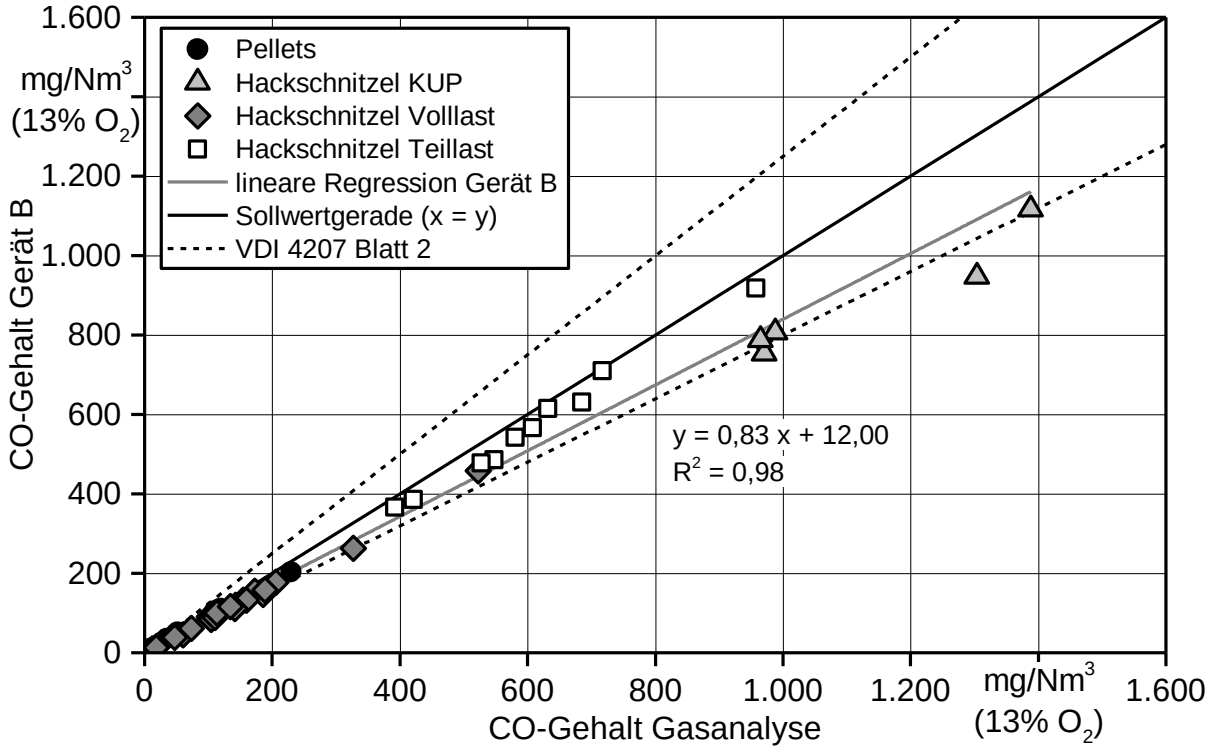


Abbildung 64: Ergebnisse von Gerät B bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2.

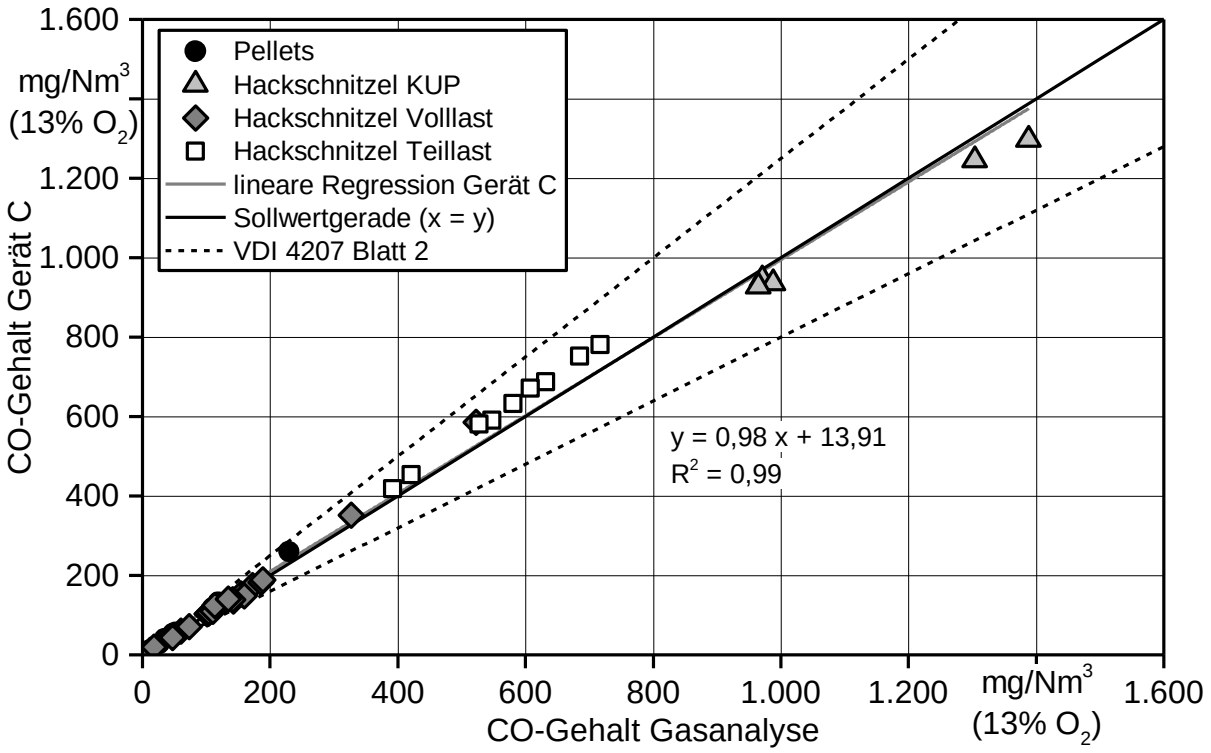


Abbildung 65: Ergebnisse von Gerät C bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2.

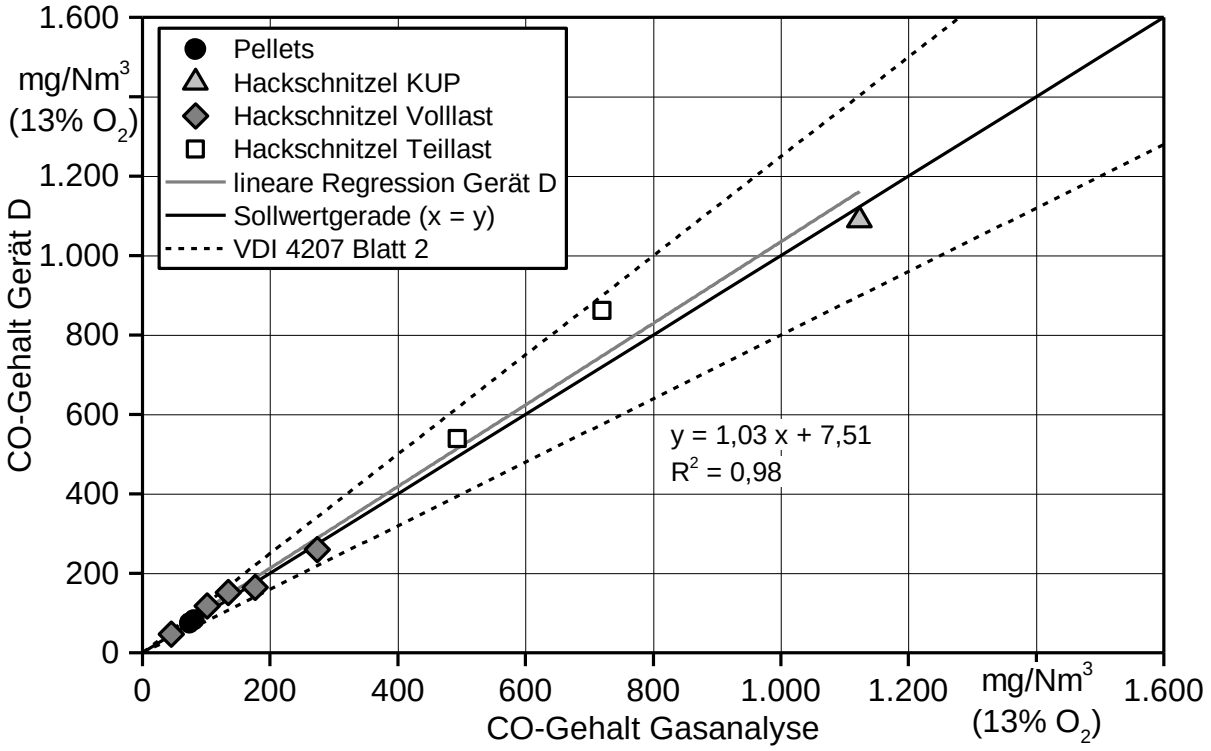


Abbildung 66: Ergebnisse von Gerät D bezüglich der CO-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 20 %-ige erweiterte Messunsicherheit nach VDI 4207-2.

Bei Gerät D wurde nicht für jede einzelne Messung die CO-Konzentration im Abgas ermittelt, sondern das entnommene Abgas über die fünf Messungen in einem Abgassammelbeutel gesammelt und erst danach analysiert (Abbildung 66). Somit repräsentieren diese Ergebnisse lediglich den Mittelwert aller fünf durchgeführten Messungen. Dementsprechend wurden die CO-Emissionen des Bezugssystems (Gasanalyse) ebenfalls über diese fünf Messzyklen gemittelt und als Vergleichswerte herangezogen.

Allgemein zeigten die Schornsteinfegermessgeräte eine gute Übereinstimmung bei der Ermittlung der CO-Konzentration und lagen fast alle im Rahmen der zulässigen 20 %-igen Messunsicherheit. Lediglich Gerät B unterschätzte den CO-Gehalt im Abgas in zwei Fällen.

7.3.3 Ergebnisse der Messgeräte bezüglich Gesamtstaub

7.3.3.1 Vergleich der beiden Referenzmessstellen

Um die Messgenauigkeit der Schornsteinfegermessgeräte validieren zu können, wurden zunächst die beiden Referenzmessstellen miteinander verglichen um eventuelle Staubminderbefunde durch Ablagerungen im Abgastunnel auszuschließen. Ebenfalls wurden die ermittelten Werte beider Messstellen nach der VDI 4206-1 geprüft und ggf. wurden ungültige Messungen für den Gerätevergleich eliminiert. Nachfolgend sind zwei Diagramme dargestellt, wobei in Abbildung 67 lediglich die Staubmengen auf den Filtermedien berücksichtigt wurden. In Abbildung 68 werden beide Referenzmessstellen ebenfalls aufgezeigt mit dem Unterschied, dass hier auch die durch das Spülen der Probenahmesonde gewonnenen Staubablagerungen mit berücksichtigt wurden.

Somit wurden Gesamtstaubgehalte zwischen 20 und 160 mg/Nm^3 ohne Spülen bzw. zwischen 23 und 183 mg/Nm^3 mit Spülen erzielt. Werden die Staubablagerungen in der Probenahmesonde nicht berücksichtigt, so treten nur marginale Abweichungen zwischen beiden Staubmessstellen auf und das Bestimmtheitsmaß beträgt R^2 = 0,99. Werden jedoch die Spülungsanteile mit berücksichtigt, so ist eine etwas stärkerer Streuung der Messwerte zu beobachten und das Bestimmtheitsmaß reduziert sich auf R^2 = 0,97. Eine mögliche Ursache könnte im Wiegen der gläsernen Spülbehälter am TFZ in einer speziellen wasserdampffreien Wiegekammer liegen. Es wurde festgestellt, dass diese Behälter sich in dieser besonderen Wiegeatmosphäre elektrostatisch aufladen, wodurch elektrostatische Abstoßungskräfte entstehen, die das Wiegeergebnis beeinflussen können.

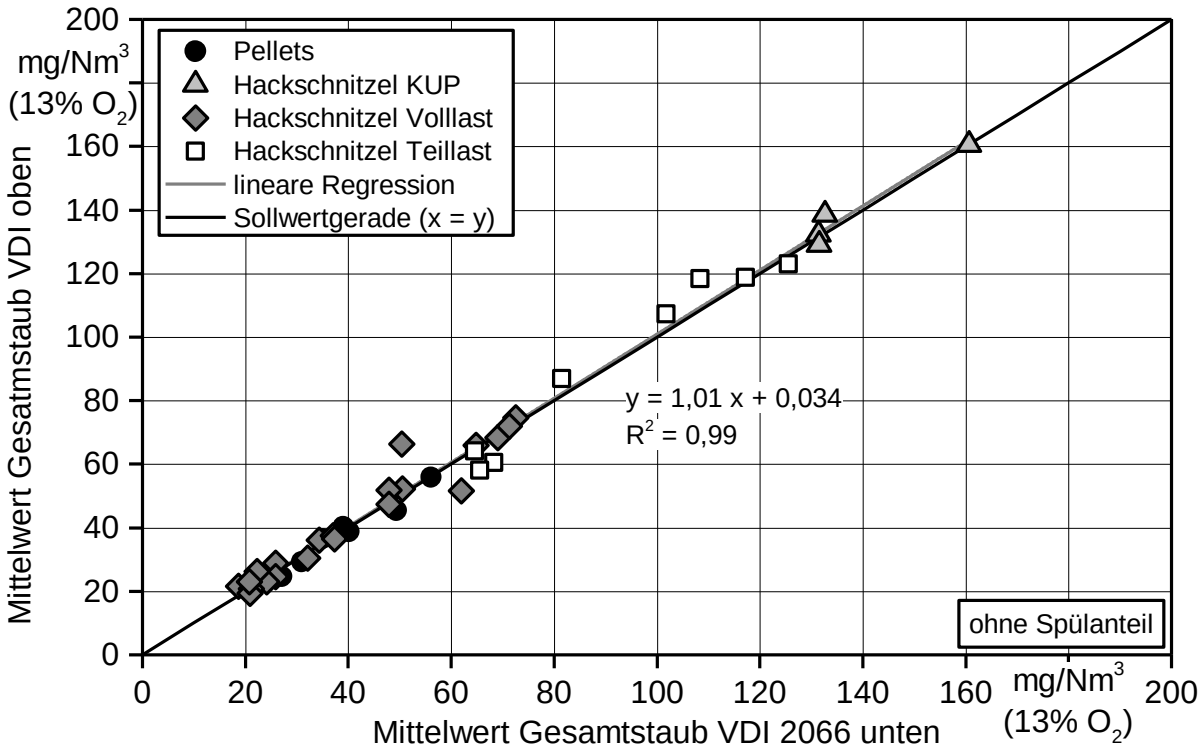


Abbildung 67: Vergleich der beiden Staubreferenzmessstellen ohne Berücksichtigung der Staubablagerungen in der Probenahmesonde

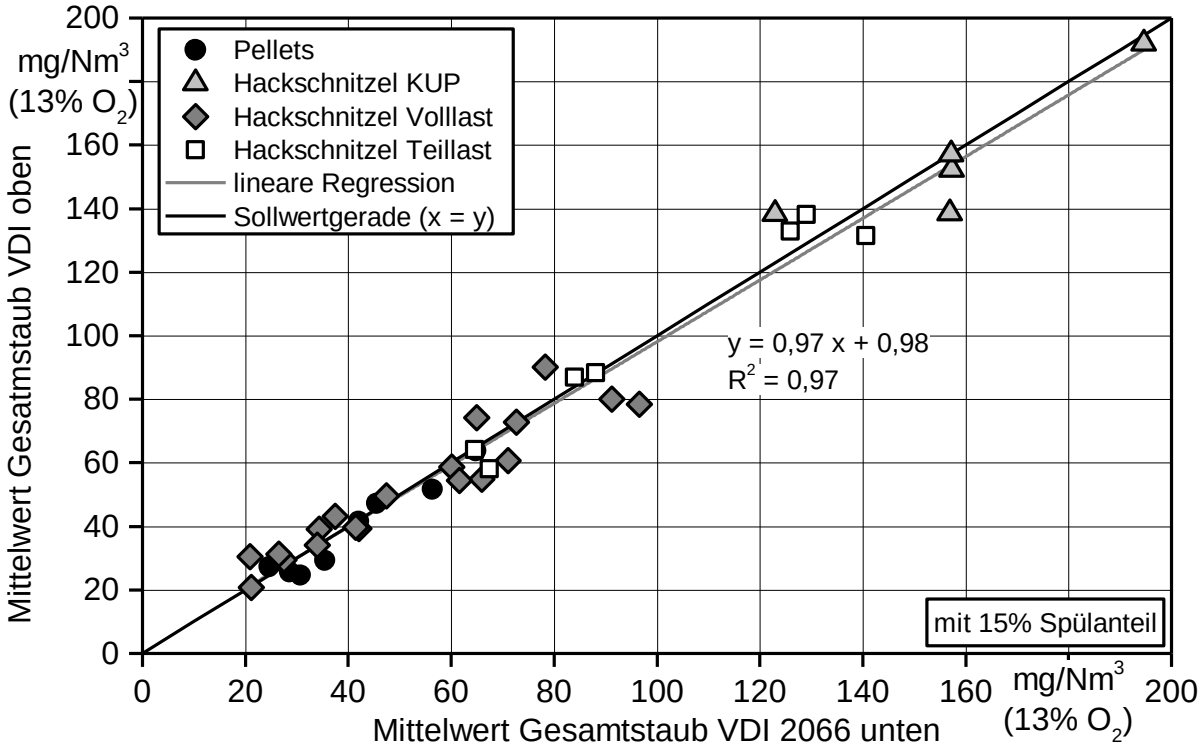


Abbildung 68: Vergleich der beiden Staubreferenzmessstellen mit Berücksichtigung der Staubablagerungen in der Probenahmesonde

Das Spülen der Probenahmesonde führte zu einer durchschnittlichen 15 %-igen Steigerung des Gesamtstaubs. Da diese Werte jedoch mit Werten zwischen 0 und ca. 50 % stark streuen, wurde mit einem pauschalen Mittelwert der Spülungsanteil von 15 % für den weiteren Vergleich herangezogen (Abbildung 69). Für den weiteren Vergleich der mit den Schornsteinfegermessgeräten wurde anschließend stets der Mittelwert aus den beiden Referenzmessstellen verwendet.

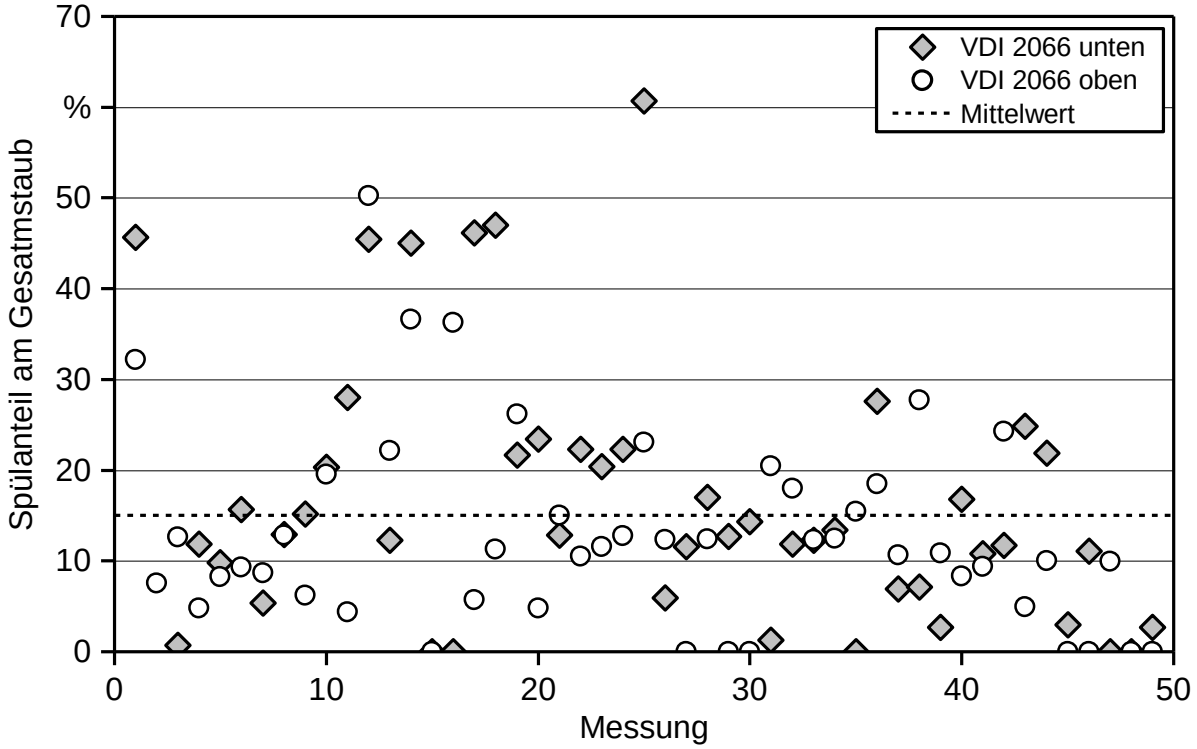


Abbildung 69: Prozentueller Anteil der gespülten Staubablagerungen in der Sonde bezogen auf den Mittelwert der Gesamtstaubmessung an beiden Referenzstaubmessstellen

7.3.3.2 Vergleich der Schornsteinfegermessgeräte mit dem Referenzverfahren

Vor allem bei den Gesamtstaubemissionen war die Unterteilung in die unterschiedlichen Betriebszustände bzw. Brennstoffe wichtig, da die Verbrennungsbedingungen sowie die Elementarzusammensetzung die Eigenschaften der emittierten Stäube beeinflusst. Dies soll eine eventuelle Brennstoffabhängigkeit der Messgeräte mit ihren verschiedenen Messprinzipien aufzeigen. Die hier aufgezeigten Messwerte wurden von den Geräten A bis C direkt nach der Messung ausgegeben, wobei hier stets die realen Messwerte verwendet wurden und nicht die Messwerte, bei welchen die zulässige 40 %-ige Messunsicherheit abgezogen wurde.

Analog der Darstellung der Ergebnisse der CO-Messungen wird die erweitere Messunsicherheit von 40 Prozent für Gesamtstaub in den folgenden Diagrammen (Abbildung 70 bis Abbildung 73) durch die unterbrochenen, schwarzen Linien gekennzeichnet. Die obe-

re der beiden Linien gibt dabei erneut den Messwert wieder, den das Gerät maximal anzeigen darf, um mit Abzug einer Messunsicherheit von 40 % den Referenzwert nicht zu überschreiten. Die untere Linie gibt den Referenzwert nach Abzug der 40 % Messunsicherheit wieder. Liegen Werte außerhalb der Messunsicherheit, wären die zulässigen Abweichungen vom Referenzwert überschritten.

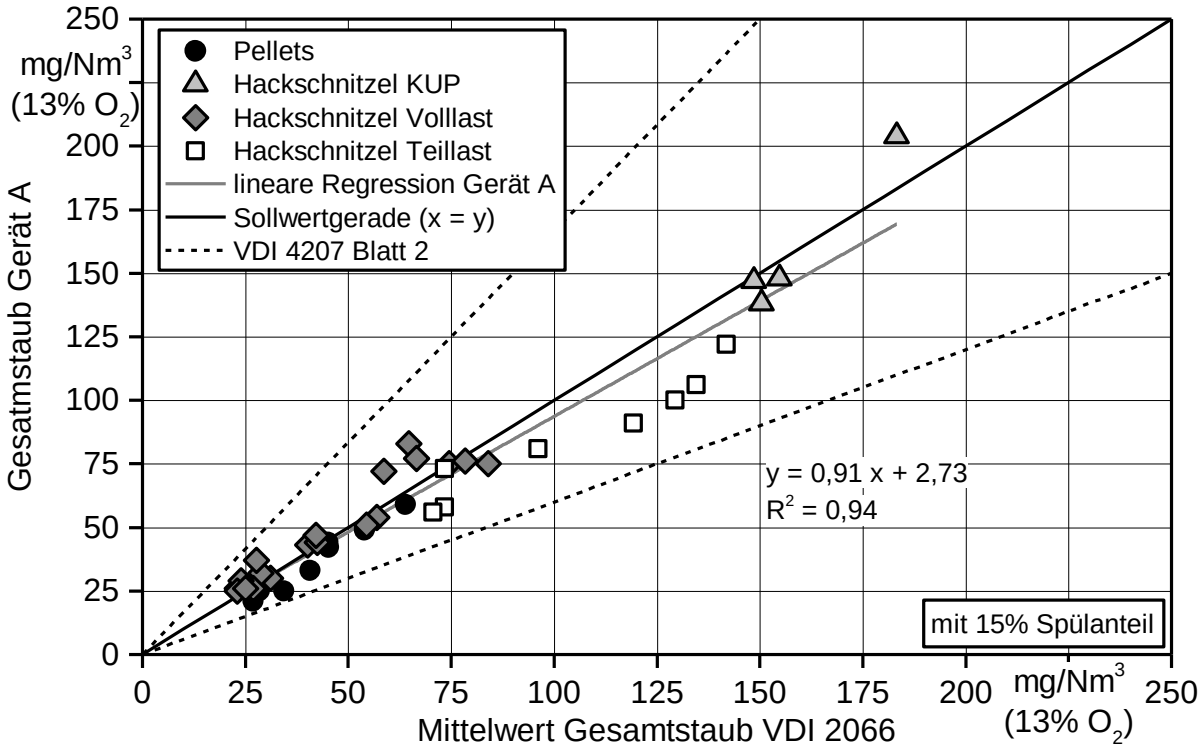


Abbildung 70: Ergebnisse von Gerät A bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2.

Die Ergebnisse für Gerät A sind in Abbildung 70 zusammengestellt. Bei den Feuerungsversuchen mit Pellets und Hackschnitzeln bei Volllast kam es zu einer guten Übereinstimmung der Messwerte mit dem Referenzverfahren. Lediglich bei den Teillastbedingungen wurden die Staubemissionen vom Gerät A etwas unterschätzt, liegt jedoch noch deutlich innerhalb der 40 %-igen Messunsicherheit. Bei Berücksichtigung aller Messungen wurde der Gesamtstaub lediglich um 9 % unterschätzt bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}94$.

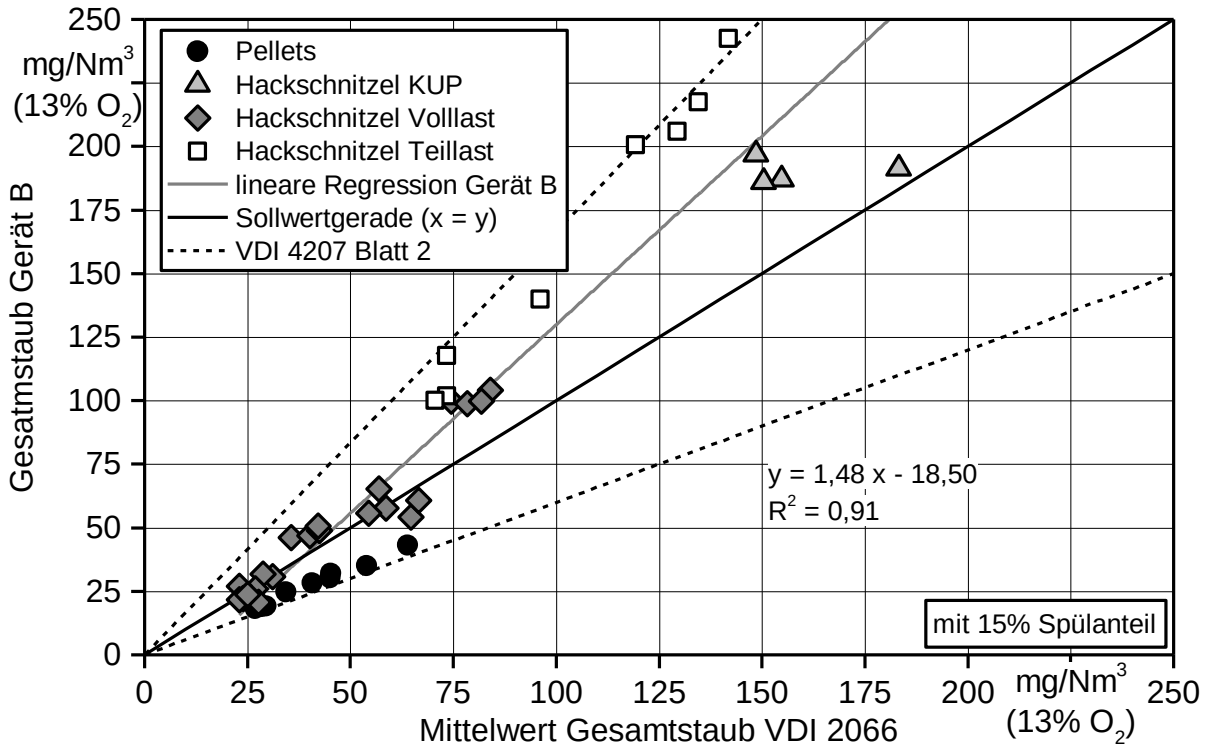


Abbildung 71: Ergebnisse von Gerät B bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2.

Das Gerät B zeigt im Gegensatz zu Gerät A deutlichere Abweichungen vom Referenzverfahren nach VDI (Abbildung 71). Das Gerät B unterschätzt den Gesamtstaub für die Versuche mit Pellets um durchschnittlich 23 %. Bei einem Großteil der Feuerungsversuche mit Hackschnitzeln kam es jedoch zu einer Überschätzung der Gesamtstaubemissionen. Vor allem bei den Teillastversuchen konnte die Messunsicherheit von 40 % gerade noch eingehalten werden. Hier kam es bis zu einer 48 %-igen Überschätzung der Messwerte. Bei einer wiederkehrenden Messung im Praxisbetrieb würde dies zu einem Nichtbestehen der Feuerungsanlage führen.

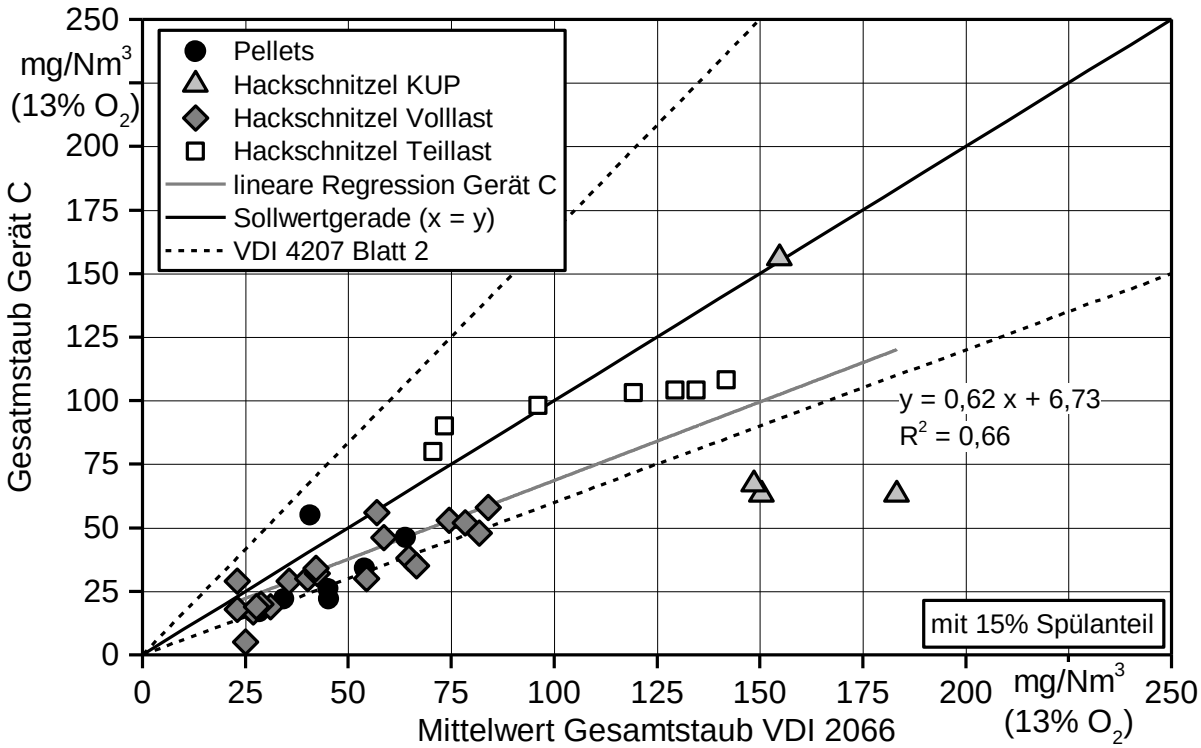


Abbildung 72: Ergebnisse von Gerät C bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-4.

Das Gerät C lieferte die größten Streuungen der Messwerte bezüglich Gesamtstaub, was sich auch in einem geringeren Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}66$ ausdrückt, Abbildung 72. Durchschnittlich unterschätzt dieses Messgerät den Gesamtstaubgehalt im Abgas um ca. 38 %, wobei keinerlei Abhängigkeit von der Brennstoffart erkennbar ist. Auffällig ist in Abbildung 72, dass für die eine Variante mit KUP eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wurde, während bei den anderen drei Messungen die Werte sogar außerhalb der erlaubten Messunsicherheit liegen. Bei dieser KUP-Messreihe wurden zwei unterschiedliche Messbereiche am Gerät vor der Messung eingestellt, wobei nur in der ersten Messung mit der geringeren Grenzwertvorgabe gemessen wurde, was zu der sehr guten Übereinstimmung führte. Erst nach Umstellung auf den (realistischeren) größeren Messbereich kam es zu der deutlichen Unterschätzung des Gesamtstaubes. Verglichen mit Gerät B sind die Chancen auf eine bestandene Schornsteinfegerprüfung mit dem Gerät C höher.

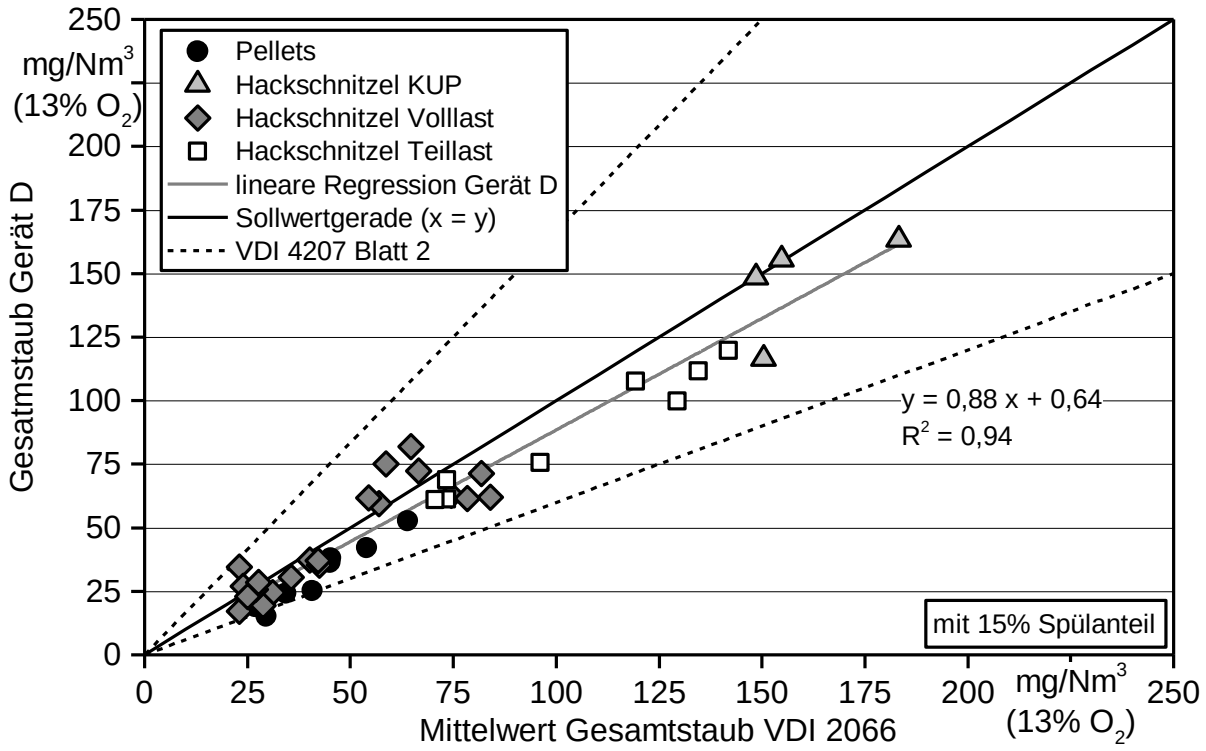


Abbildung 73: Ergebnisse von Gerät D bezüglich der Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Referenzverfahren. Die unterbrochenen Linien markieren die 40 %-ige erweiterte Messunsicherheit gemäß VDI 4207-2.

Das letzte Gerät in diesem Vergleich, Gerät D, lieferte nicht sofort nach der Messung das Ergebnis, da die eingesetzte Filterhülse erst thermisch nachbehandelt und anschließend gewogen werden musste. Die Ergebnisse sind in Abbildung 73 dargestellt. Es konnte für dieses Messgerät keine Brennstoffabhängigkeit festgestellt werden. Allgemein lieferte das es eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzverfahren, durchschnittlich wurden die Gesamtstaubemissionen um ca. 12 % unterschätzt.

7.4 Zusammenfassung der Vergleichsmessungen

In der hier dargestellten Versuchsreihe wurden insgesamt vier Schornsteinfegermessgeräte parallel und zeitgleich mit dem Referenzverfahren für die Gesamtstaubbestimmung nach VDI 2066/VDI 4206 verglichen. Auf gleiche Weise erfolgte auch eine Vergleich der CO-Emissionen. Die Durchführung des Messgerätevergleichs erwies sich als sehr zeit- und personalintensiv.

Bezüglich des CO-Gehaltes im Abgas überzeugten 3 der 4 Schornsteinfegermessgeräte, lediglich Gerät B unterschätzte den CO-Gehalt.

Für den Gesamtstaubgehalt im Abgas wurden zunächst beide Referenzmessstellen miteinander verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erzielt wurde. Aufgrund der schwankenden Anteile des Staubgehaltes, welcher durch das Spülen der Probenahme-

sonde ermittelt wurde, erfolgte eine pauschale Korrektur aller Messwerte ohne Spülungsanteil um 15 % für den weiteren Vergleich.

Die Geräte A und D zeigten ähnliche Gesamtstaubgehalte wie das Referenzverfahren. Das Gerät B unterschätzt den Gesamtstaub deutlich, außer bei den Versuchen mit Pellets. Das Gerät C zeigte deutliche Streuungen der Gesamtstaubgehalte im Abgas, und es reagierte zum Teil empfindlich auf die Auswahl des Messbereiches.

Zusammenfassung

Teilvorhaben 2 des Projekts „HackZert – Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel“ unterstützte die Entwicklung der EN*plus*-Zertifizierung durch wissenschaftliche Begleitforschung. Fokus in Teilvorhaben 2 lag auf der Überprüfung der Genauigkeit von Schnellbestimmungsmethoden für den Wassergehalt von Holzhackschnitzeln mittels manueller Messgeräte und mittels kontinuierlich messender Online-Messverfahren. In umfangreichen Feuerungsversuchen wurde außerdem das Verbrennungsverhalten von EN*plus*-Hackschnitzeln bewertet. Im Rahmen einer Fallstudie wurden Empfehlungen zur repräsentativen Probenahme erarbeitet. Zusätzlich wurde die Messgenauigkeit von nach VDI 4206 eignungsgeprüften Abgasmessgeräten für CO und Staub bewertet, die bei der wiederkehrenden Überprüfung der Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen nach VDI 4207 zum Einsatz kommen.

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 Infrarot-Trockner, fünf dielektrische Verfahren, ein 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 lag zwischen 0,1 m-% (± 3,5 m-%) und 4,0 m-% (± 4,7 m-%). Beste Resultate lieferte dabei der Infrarottrockner MA35, wobei dieser für die Bestimmungen jedoch nur kleine Probenmengen verwendet werden kann. 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.

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 allerdings von keinem der Geräte erreicht werden. Für Abrechnungszwecken 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 ±40 % des Referenzverfahrens. Dieser Bereich wird in der Vorversion der VDI 4206 Blatt 4 als Anforderung an die Eignungsprüfung der Geräte für die Beurteilung von Holzbrenn-

stoffen 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 dritten Versuchsreihe zur Wassergehalts-Schnellbestimmung an Holzhackschnitzeln wurden vier kontinuierlich messende Verfahren bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass analog zu den mobilen Messgeräten eine gute Kalibrierung ausschlaggebend für einen genauen Messwert ist, d. h. eine materialspezifische Kalibrierung kann 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.

Fallstudie zur Homogenisierung des Wassergehalts durch die Umschlagsprozesse während einer Hackschnitzellieferung

Die Homogenisierung des Wassergehalts großer Hackschnitzelschüttungen durch Umschlagsprozesse bei der Lieferung wurde in Rahmen einer Praxisfallstudie analysiert. Begleitet wurde die Lieferung eines sehr inhomogenen Materials aus einer 5 Monate alten Lagermiete (maximale Wassergehaltsspanne: 19,2–68,4 m-%). Durch die einzelnen Umschlagsprozesse kam es zu einer relativ starken Durchmischung und Homogenisierung der Hackschnitzel. Das ließ sich am Wassergehalt ablesen, der am Ende der Prozesskette (kurz vor Eintritt in die Feuerung) als sehr homogen angesehen werden konnte (maximale Wassergehaltsspanne: 43,8–48,6 m-%). Jedoch findet die Probenahme für die Abrechnung üblicherweise bereits früher statt. Das bedeutet, dass schon bei der Anlieferung an das Heizwerk die Schwierigkeit einer repräsentative Probenahme besteht. Hierfür können die im Projekt beschriebenen vereinfachten Methoden zur Erstellung einer Mischprobe aus der Liefercharge den Gesamtaufwand deutlich verringern.

Feuerungsversuche mit Hackschnitzelqualitäten nach EN*plus*

Die Brennstoffqualität von 13 EN*plus*-Versuchsbrennstoffen und ihr Emissionsverhalten in zwei Hackschnitzelkesseln (50 kW und 100 kW) wurden am Feuerungsprüfstand des TFZ analysiert. Die Anforderungen für eine Brennstoffqualität nach EN*plus* konnte von den Brennstoffproduzenten i. d. R. eingehalten werden. Ebenso stimmten in den meisten Fällen die Angaben der Produzenten zur Brennstoffqualität mit den tatsächlichen Messungen überein.

Beide im Versuch verwendete Kessel konnten mit Hackschnitzeln nach EN*plus* die Grenzwerte für CO der Stufe 2 der 1. BImSchV einhalten. Ebenso konnte ein störungsfreier Anlagenbetrieb gewährleistet werden. Die Einhaltung des Grenzwertes für partikelförmige Emissionen der Stufe 2 der 1. BImSchV konnte mit den im Projekt verwendeten Brennstoffen und Kesseln nicht grundsätzlich gewährleistet werden, sofern zur Messung die Referenzmessmethode der Staubkonzentrationsbestimmung (ohne Abzug einer Messunsicherheit) angewendet wurde. Auch eine nachträgliche Anpassung der Kessel brachte dabei keine besseren Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen zudem deutlich, dass die in den gängigen Normen verwendeten Kriterien und Qualitätsparameter, wie die Partikelgrößenverteilung, der Aschegehalt, der Wassergehalt und der Feingehalt, zur Beschreibung von Qualitätshackschnitzeln nur bedingt geeignet sind, um das erwartete Emissionsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen ausreichend sicher abschätzen zu können.

Messgenauigkeit von Schornsteinfegermessgeräten

Vier nach VDI 4206-1/2 eignungsgeprüfte Schornsteinfegermessgeräte wurden mit dem Referenzverfahren nach VDI 2066/VDI 4206-1/2 bezüglich Gesamtstaub bzw. mit der Gasanalyse bezüglich CO-Emissionen an einer hierfür speziell errichteten Messtrecke des Feuerungsprüfstands am TFZ verglichen. Alle Geräte wurden parallel und zeitgleich eingesetzt.

Hinsichtlich des CO-Gehaltes im Abgas überzeugten 3 der 4 Schornsteinfegermessgeräte. Lediglich ein Gerät unterschätzte den CO-Gehalt. Für den Gesamtstaubgehalt im Abgas wurden zunächst beide Referenzmessstellen miteinander verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erzielt wurde. Aufgrund der schwankenden Anteile des Staubgehaltes, welcher durch das Spülen der Probenahmesonde ermittelt wurde, erfolgte eine pauschale Korrektur aller Messwerte ohne Spülungsanteil um 15 % für den weiteren Vergleich.

Zwei der Geräte zeigten ähnliche Gesamtstaubgehalte auf wie das Referenzverfahren. Das dritte Gerät unterschätzt den Gesamtstaub deutlich, außer bei den Versuchen mit Pellets. Das vierte Gerät zeigte deutliche Streuungen der Gesamtstaubgehalte im Abgas und es reagierte zum Teil empfindlich bei Messbereichswechsel.

Insgesamt konnte mit den in diesem Bericht dargestellten Versuchen eine Vielzahl an offenen Fragen beantwortet und praxisrelevante Empfehlungen für die Etablierung eines Zertifizierungssystems für Holzhackschnitzel gegeben werden. Die Ergebnisse ergänzen

zwei weitere über das BMEL geförderte Projekte zur Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln (Projekte „qualiS“ und „OptiChip“). Eine Gesamtauswertung der Feuerungsversuche aller drei Projekte soll im Laufe des Jahres 2017 in der Schriftenreihe des TFZ veröffentlich werden.

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] AMTSBLATT 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. 19 Seiten (Stand 25.11.2015)

[4] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION (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. 15 Seiten (Stand 28.04.2015)

[5] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2013): Streusalz und Split im differenzierten Winterdienst. Merkblatt. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 19 Seiten

[6] BÖHM, T. (2006): Verfahren zur Bestimmung physikalischer Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes biogener Festbrennstoffe. Dissertation. Fachgebiet Technik in Pflanzenbau und Landschaftspflege. Freising: Technische Universität München (TUM)

[7] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (BAFA) (2017): Erneuerbare Energien: Förderbare – automatisch beschickte – Biomasseanlagen. (Stand: 1.03.2017)

[8] BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BimSchV). 23 Seiten (Stand 26.01.2010)

[9] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes–Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). 239 Seiten (Stand 24.06.2002)

[10] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI) (2015): Erneuerbare Energien in Deutschland - Das Wichtigste im Jahr 2014 auf einen Blick. BMWi nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. Stand Dezember 2015

[11] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2015): Klimastation Gelbelsee 2015. Wetterkontor GmbH. Ingelheim

[12] DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM GMBH (DBFZ) (2010): Bionorm II – Prenormative research on solid biofuels for improved European standards. Final report. deutsches Biomasseforschungszentrum, 118 Seiten

[13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2005): DIN EN ISO 14780 (Entwurf). Biogene Festbrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung. Berlin: Beuth-Verlag, 22 Seiten

[14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN EN ISO 12846. Bestimmung von Quecksilber – Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) mit und ohne Anreicherung. Berlin: Beuth-Verlag

[15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, 62 Seiten

[16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Einteilung von Holzhackschnitzeln. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten

[17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17294-2. Wasserbeschaffenheit – Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) – Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope: Beuth-Verlag,

[18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. Berlin: Beuth-Verlag, 18 Seiten

[19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen. Berlin: Beuth-Verlag,

[20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16994. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor. Berlin: Beuth-Verlag, 20 Seiten

[21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): 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. Berlin: ‚Beuth-Verlag, xx Seiten

[22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 17828. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Berlin: ‚Beuth-Verlag, 18 Seiten

[23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18122. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin: ‚Beuth-Verlag, 14 Seiten

[24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18125. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Berlin: ‚Beuth-Verlag, 126 Seiten

[25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren. Berlin: ‚Beuth-Verlag, 12 Seiten

[26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (1999): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistungen bis 300 kW. Juni 1999. Berlin. Beuth, 30 Seiten

[27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2010): DIN EN 14961. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikation und -klassen. Berlin: Beuth Verlag. 58 Seiten.

[28] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI) (2016): Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4. (Stand: 07.12.2016)

[29] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Berichte aus dem TFZ, Nr. 46, 141 Seiten, ISBN 1614-1008

[30] DOSER MESSTECHNIK GMBH & CO.KG (2016): Bedienungsanleitung AD22-CMS22, 7 Seiten

[31] ELLNER-SCHUBERTH, F.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2010): Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 22, 134 Seiten, ISSN 1614-1008

[32] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2015) Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. 12. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 51 Seiten

[33] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2016). Hackschnitzel-Heizungen – Was muss aktuell beachtet werden? 2. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 34 Seiten

[34] GAGGERMEIER, A.; FRIEDRICH, S.; HIENDLMEIER, S. & ZETTINING, C. (2014): Energieholzmarkt in Bayern 2012 – Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch, LWF und C.A.R.M.E.N e.V.

[35] GANN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH (2002): Bedienungsanleitung. GANN Hydromette HT 85 T, 57 Seiten

[36] GHM MESSTECHNIK GMBH-STANDORT GREISINGER (2016): Betriebsanleitung. GMH 3851. Version 2.1, 22 Seiten

[37] GLARBORG P, JENSEN AD, JOHNSSON JE (2003): Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. Progress in energy and Combustion Science 29, S. 89 – 113

[38] GÖTTLEIN, A.; BAIER, R.; MELLERT, K. H. (2011): Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – eine statistische Herleitung aus forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – eine statistische Herleitung aus Van den Burg's Literaturzusammenstellung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Jg. 182, Nr. 9/10, S. 173–186

[39] HAHN, J.; SCHARDT, M.; SCHULMEYER, F.; MERGLER, F. (2014): Der Energieinhalt von Holz. Merkblatt 12. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten

[40] HARTMANN H, ROßMANN P, TUROWSKI P, ELLNER-SCHUBERT F, HOPF N, BIMÜLLER A (2007): Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 13. 127 Seiten, ISSN: 16141008

[41] HARTMANN H., SCHMID V., LINK H. (2003): Partikelgrößenverteilungen, Gesamtstaub und weitere Kenngrößen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 4. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 59 Seiten, ISSN: 1614-1008

[42] HARTMANN, H.; ROßMANN, P.; TUROWSKI, P.; LINK, H., MARKS, A. (2006): Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 10, 84 Seiten, ISSN 16141008

[43] IMKO GMBH (2011): Bedienungsanleitung. HD2-Handmessgerät, 27 Seiten

[44] KABATA-PENDIAS, A. (2011): Trace elements in soils and plants. 4. Aufl. Boca Raton: CRC-Press, 520 Seiten, ISBN 978-1-4200-9368-1

[45] 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

[46] KOCHER, B.; BROSE, S.; FEIX, J.; GÖRG, C.; PETERS, A.; SCHENKER, K. (2010): Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik, Heft V 188, 29 Seiten, ISSN 0943-9331, ISBN 978-3-86509-976-1

[47] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2014): Holzhackschnitzel für Kleinfeuerungsanlagen. Produktion definierter Quellen nach DIN EN ISO 17225-4. Schule und Beratung, Nr. 11/12, S. 31-35

[48] 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

[49] 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

[50] KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K.; DIETZ, E.; TUROWSKI, P.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2015): Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Berichte aus dem TFZ, Nr. 40, 316 Seiten, ISSN 1614-1008

[51] LIU H, CHANEY J, LI J,SUN C (2013) Control of NOx emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging, fuel Nr. 103, s. 792 – 798

[52] NEUHOF, I.; MERGLER, F.; ZORMAIER, F.; WEINERT, B.; HÜTTL, K. (2012): Hackschnitzel richtig lagern! Merblatt 11. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten

[53] RADEMACHER, P. (2005): Nährelementgehalte in den Kompartimenten wichtiger Wirtschaftsbaumarten und deren Bedeutung für die Reststoffverwertung. Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 63, Nr. 4, S. 285–296

[54] REISINGER, K.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; NÜRNBERGER, K. (2009): Schnellbestimmung des Wassergehalts im Holzscheit. Vergleich marktgängiger Messgeräte. Berichte aus dem TFZ. Nr. 16. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, ISSN 1614-1008, 109 Seiten

[55] SAMUELSSON, R.; BURVALL, J. & JIRJIS, R. (2006): Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, Biomass and bioenergy 30, S. 929–934.

[56] SARTORIUS LAB INSTRUMENTS GMBH & CO. KG (2014): Betriebsanleitung - Sartorius Moisture Analyzer. Modell MA35 - Elektronischer Feuchtebestimmer, 33 Seiten

[57] SCHALLER GMBH (2014): Bedienungsanleitung. Messgerät zur Wassergehaltsbestimmung von Biomasse. humimeter BMA, Version 1.9, 20 Seiten

[58] SCHALLER GMBH (2014): Bedienungsanleitung. Universal-Messgerät zur Wassergehaltsbestimmung von Biomasse. humimeter BL2, Version 1.2, 20 Seiten

[59] 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

[60] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2010): VDI 4206 Blatt 1: Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der gasförmigen Emissionen und Abgasparameter. Berlin: Beuth-Verlag, 54 Seiten

[61] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2015): VDI 4206 Blatt 2: Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der partikelförmigen Emissionen. Berlin: Beuth-Verlag, 36 Seiten

[62] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (VDI) (2006): VDI 2066 Blatt 1: Messen von Partikeln – Staubmessung in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. November 2006. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 111 Seiten

[63] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (VDI) (2016): VDI 4206 Blatt 4 (1. Vorversion): Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messgeräte zur Ermittlung der Feuchte von Holzbrennstoffen. Berlin: Beuth Verlag, 20 Seiten

[64] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (VDI) (2016): VDI 4207 Blatt 2: Messen von Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messen an Anlagen für feste Brennstoffe. Juli 2016. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 86 Seiten

[65] VERSCHEURE, P. (1998): Energieinhalt von Hackschnitzeln. Überblick und Anleitung zur Bestimmung. Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Abteilung Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung, 21 Seiten