

43

Berichte aus dem TFZ

Brennstoffqualität von Holzpellets

Europaweites
Holzpelletscreening
mit Fokus auf den
deutschen Pelletmarkt



Brennstoffqualität von Holzpellets



Brennstoffqualität von Holzpellets

**Europaweites Holzpelletscreening mit Fokus auf
den deutschen Pelletmarkt**

Thomas Baumgartner
Andreas Lermer
Claudia Schön
Dr. Daniel Kuptz
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 43

Straubing, Oktober 2015

Titel: Brennstoffqualität von Holzpellets

Projektleiter: Dr. Hans Hartmann

Autoren: Thomas Baumgartner
Andreas Lermer
Claudia Schön
Dr. Daniel Kuptz
Dr. Hans Hartmann

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Europäischen Kommission im Seventh Framework Programme unter dem Förderkennzeichen 606605 gefördert. Die Ergebnisse sind im Projekt „BeReal“ erarbeitet worden (Projektlaufzeit: 01.10.2013 bis 30.09.2016). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



© 2015
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.

ISSN: 1614-1008

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

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Claudia Schön, Dr. Daniel Kuptz

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2015

Gestaltung: Thomas Baumgartner, Andreas Lermer, Claudia Schön, Dr. Daniel Kuptz, Stephanie Neumeier, Uli Eidenschink

Fotonachweis: Technologie- und Förderzentrum; Andreas Lermer (16)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	10
1 Einleitung und Zielsetzung.....	11
2 Auswahl der Pelletproben	13
3 Stand des Wissens.....	15
3.1 Pelletierung	15
3.2 Normen und Zertifizierung	17
3.3 Frühere Untersuchungen von Holzpellets	19
4 Probenahme und Probenaufbereitung für die weiteren Analysen	21
4.1 Repräsentative Probenentnahme	21
4.2 Probenaufbereitung.....	22
5 Brennstofftechnische Eigenschaften und deren Bestimmung ...	23
5.1 Aschegehalt	23
5.2 Wassergehalt	24
5.3 Heizwert	26
6 Physikalische Eigenschaften und deren Bestimmung.....	29
6.1 Schüttdichte	29
6.2 Rohdichte	30
6.3 Feinanteil	32
6.4 Pelletlänge.....	34
6.5 Pelletdurchmesser	38
6.6 Mechanische Festigkeit.....	39
6.7 Pellethärte	40
7 Inhaltsstoffliche Zusammensetzung	45
7.1 Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff.....	45
7.2 Stickstoff	46
7.3 Schwefel	47
7.4 Kalium und Chlor	48
7.5 Kalzium und Magnesium.....	50
7.6 Silizium	51

7.7	Natrium und Zink.....	52
7.8	Chrom und Kupfer.....	53
7.9	Weitere Elemente	54
8	Diskussion und Bewertung der Analyseergebnisse	55
8.1	Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern.....	55
8.1.1	Einfluss von Pellethärte und Pelletlänge	55
8.1.2	Einfluss von Rohdichte und Wassergehalt	58
8.1.3	Einfluss von inhaltsstofflichen Parametern und Aschegehalt.....	61
8.2	Vergleich der Ergebnisse mit den Vorgaben und den Herstellerangaben	64
8.3	Herstellerinterne Vergleiche.....	66
8.4	Prüfung auf Labelbetrug.....	67
8.5	Ergebnisbewertung.....	68
	Zusammenfassung	71
	Quellenverzeichnis	73
	Anhang	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozessschritte bei der Pelletierung	15
Abbildung 2:	Pelletpressen (A = Arbeitsprinzip einer Kollergangpresse mit Ringmatrize, B = Arbeitsprinzip einer Kollergangpresse mit Flachmatrize) [23].....	16
Abbildung 3:	Schema der Probenteilung und -verwendung	21
Abbildung 4:	Aschegehalt der Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	24
Abbildung 5:	Wassergehalt der Pelletproben; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	26
Abbildung 6:	Heizwert Q_{ar} der Pelletproben im Anlieferungszustand („as received“); durchgehende Linie: Mindestanforderung der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	28
Abbildung 7:	Heizwert Q_d der Pelletproben auf wasserfreier Bezugsbasis („dry“); (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	28
Abbildung 8:	Schüttdichte der Pelletproben im Anlieferungszustand; durchgehende schwarze Linie: Mindestanforderung der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	30
Abbildung 9:	Rohdichte (im Anlieferungszustand) der Pelletproben (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	32
Abbildung 10:	Feinanteil der Pelletproben im Anlieferungszustand; durchgehende und gestrichelte schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014 (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	33
Abbildung 11:	Pelletlängenverteilung, gemessen mit Messschieber; durchgehende schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	35
Abbildung 12:	Schematischer Aufbau des verwendeten Bildanalysegeräts	36
Abbildung 13:	Messgrößen der Bildanalyse am Beispiel eines Hackschnittzels	37
Abbildung 14:	Vergleich der Längenmessung mittels Messschieber mit den Werten des Bildanalyseverfahrens.....	38
Abbildung 15:	Mechanische Festigkeit (DU) der Pelletproben im Anlieferungszustand; schwarze Linie: Mindestanforderung der	

	einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014 (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	40
Abbildung 16:	Härteermittlung mittels Pressling-Härteprüfer (a = Pressling- Härteprüfer; b = eingespanntes Pellet; c = erste Risse am Pellet; d = zersprungenes Pellet; e = abgebrochenes Teilstück)	42
Abbildung 17:	Mittlere Pellethärte (in N); Obergrenze des Messgeräts bei 700 N (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	43
Abbildung 18:	Gehalte an Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) der Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	46
Abbildung 19:	Gehalt an Stickstoff (N) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen, Nachweisgrenze bei 0,05 m.-% (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	47
Abbildung 20:	Gehalt an Schwefel (S) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgezogene und gestrichelte schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014, Nachweisgrenze bei 0,005 m.-% (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	48
Abbildung 21:	Gehalte an Chlor (Cl) und Kalium (K) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen für den Chlorgehalt, Nachweisgrenze des Chlorgehalts liegt bei 50 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	49
Abbildung 22:	Gehalte an Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	50
Abbildung 23:	Gehalt an Silizium (Si) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse, Nachweisgrenze bei 100 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	51
Abbildung 24:	Gehalte an Natrium (Na) und Zink (Zn) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen für den Zinkgehalt, Nachweisgrenze des Na bei 10 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	52
Abbildung 25:	Gehalte an Chrom (Cr) und Kupfer (Cu) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen für Chrom- und Kupfergehalt, Nachweisgrenze bei 1 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt).....	53

Abbildung 26:	Einfluss der mittleren Pelletlänge auf die mechanische Festigkeit.....	56
Abbildung 27:	Einfluss der Härte auf den Feinanteil	57
Abbildung 28:	Einfluss der Pelletlänge auf die Schüttdichte.....	58
Abbildung 29:	Einfluss des Wassergehalts der Pellets auf die Schüttdichte	59
Abbildung 30:	Einfluss der Rohdichte der Pellets auf die Schüttdichte	59
Abbildung 31:	Einfluss des Wassergehalts auf den Heizwert (w_f = wasserfrei, a_r = im Anlieferungszustand („as received“))	60
Abbildung 32:	Zusammenhang zwischen Heizwert (wasserfrei) und Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....	61
Abbildung 33:	Zusammenhang zwischen Heizwert (wasserfrei) und Kohlenstoffgehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse, Darstellung einer linearen Trendlinie mit Gleichung und zugehörigem Bestimmtheitsmaß	62
Abbildung 34:	Zusammenhang zwischen der Summe der Gehalte an Kalzium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) und dem Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse, Darstellung einer linearen Trendlinie mit Gleichung und zugehörigem Bestimmtheitsmaß.....	63
Abbildung 35:	Kumulierte Gehalte aerosolbildender Elemente; dunkelgraue Balken: Kaliumgehalt (K); schraffierte Balken: Summe Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Blei (Pb) und Zink (Zn), jeweils bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und möglicher Zertifizierungen (Stand 2014 ²) [14][16][17]. wf = wasserfrei, an = im Anlieferungszustand, m.-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben	18
Tabelle 2:	Bestimmtheitsmaße (R^2) linearer Regressionen zwischen den brennstofftechnischen und physikalischen Qualitätsparametern; Fettdruck kennzeichnet $R^2 > 0,2$	55
Tabelle 3:	Abweichungen der Messwerte von den jeweils geforderten Werten; erste Zeile: jeweilige Gesamtanzahl an Abweichungen von Norm und Zertifizierung; zweite Zeile: Anzahl der Proben mit jeweils einer oder mehreren Abweichungen.....	65
Tabelle 4:	Darstellung ausgewählter Parameter für jeweils mehrere Proben eines Herstellers aus verschiedenen Produktionswerken; Nummer: jeweilige Probennummer; Hersteller: Benennung A und B zur Unterscheidung; Heizwert (wf) Aschegehalt bezogen auf die Trockenmasse Feinanteil in Masseprozent des Anlieferungszustands, Anteil Kalium (K) bezogen auf die Trockenmasse, Anteil der Summe aus Kalium (K), Schwefel (S), Natrium (Na), Chlor (Cl), Blei (Pb) und Zink (Zn) bezogen auf die Trockenmasse	67
Tabelle 5:	Einzelwerte des Pelletscreenings – Aschegehalt, Heizwert, Wassergehalt, Schüttdichte, Feinanteil, mechanische Festigkeit.....	77
Tabelle 6:	Einzelwerte des Pelletscreenings – Rohdichte, mittlere Länge, maximale Länge, Durchmesser und Härte.....	79
Tabelle 7:	Einzelwerte des Pelletscreenings – Gehalt an C, H, O, N, S, Cl, Ca, K, Mg, Si; jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....	81
Tabelle 8:	Einzelwerte des Pelletscreenings – Gehalt an As, Pb, Cd, Cr, Cu, Na, Ni, Hg, Zn; jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....	83
Tabelle 9:	Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und möglicher Zertifizierungen (Stand Oktober 2015). wf = wasserfrei, an = im Anlieferungszustand, m.-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben, Fettdruck = Änderung gegenüber 2014	85

1 Einleitung und Zielsetzung

In Deutschland hat sich im Rahmen der Energiewende in den letzten Jahren die Nutzung biogener Festbrennstoffe zur Wärmebereitstellung immer mehr etabliert. Zu den biogenen Festbrennstoffen zählt neben halmgutartiger Biomasse, Biomasse von Früchten und definierten bzw. undefinierten Mischungen auch die holzartige Biomasse. In diese Kategorie fällt unter anderem Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie, das als Ausgangsmaterial für die Produktion von Holzpellets verwendet werden kann. In Mitteleuropa stellt dieses sogenannte Industrierestholz, vor allem die chemisch unbehandelten Rückstände wie etwa Sägerestholz, den überwiegend eingesetzten Rohstoff für die Pelletproduktion dar [18]. So hatte das Sägerestholz als Rohstoff im ersten Quartal 2014 bei den deutschen Pelletproduzenten einen Anteil von über 80 % [2].

Um aus Industrierestholz Holzpellets herzustellen, sind je nach Beschaffenheit des Ausgangsmaterials mehrere Prozessschritte notwendig. So müssen Sägespäne zu Anfang meist getrocknet werden, bevor sie verarbeitet werden können. Sollen Hackschnitzel zur Pelletherstellung verwendet werden, sind sie vorher auf die benötigte Korngröße zu zerkleinern. Das auf diese Weise erhaltene Rohmaterial wird in einigen Fällen vor der Pelletierung noch konditioniert. Das heißt, es wird Dampf oder Wasser zugegeben, um die Eigenschaften der Presslinge zu beeinflussen. Auf den Einsatz von Presshilfsmitteln (Additivzugabe) wird bei der Holzpelletproduktion oft verzichtet. Auch der Prozessschritt der Konditionierung wird nicht von allen Produzenten angewendet.

Anschließend wird das Rohmaterial einer Presse zugeführt, die es unter Druck in einem kontinuierlichen Verfahren in die gewünschte Form bringt. Der letzte Prozessschritt ist die Kühlung. Diese ist notwendig, um die aus der Presse heiß austretenden Pellets rascher abzukühlen, damit sie besser aushärten und nicht leicht zerfallen [32].

Holzpellets können unter anderem zur thermischen Verwertung in Kleinf Feuerungsanlagen verwendet werden. Meist sind diese Kleinf Feuerungsanlagen als Zentralheizungssystem in Wohnhäusern installiert. Bei dieser Art von Anlagen ist ein Lager üblich, in dem die Pellets als loses Schüttgut aufbewahrt und von wo aus sie dem Kessel vollautomatisch zugeführt werden. Daneben existieren aber auch Pelletöfen, d. h. Einzelraumfeuerungen für Holzpellets [18]. Die in solchen Kaminöfen eingesetzten Pellets werden gewöhnlich als Sackware beschafft. Ein Pelletsack fasst dabei meist 15 kg und ist in Baumärkten oder im Brennstoffhandel erhältlich [32]. Im ersten Quartal 2014 hatte die Sackware einen Anteil von 17 % am gesamten Pelletmarkt in Deutschland [2].

Die Qualität der Sackware sollte im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Ziel der Arbeit war es dabei, die Schwankungsbreiten bei den einzelnen Qualitätsparametern festzustellen (auch zwischen mehreren Pelletproben desselben Herstellers, jedoch aus verschiedenen Produktionsstätten) und die Einhaltung der internationalen Normanforderungen und der Qualitätsvorgaben von Gütesiegeln zu überprüfen. Dadurch sollte eine Momentaufnahme über den Zustand der Pelletqualitäten in Deutschland und Europa entstehen.

Nicht zu allen Qualitätsparametern sind aber auch Anforderungen in Normen oder Gütesiegeln definiert. Beispielsweise ist der Elementgehalt von Kalium, das bei der Verbrennung stark mitverantwortlich für die Aerosolbildung ist, bislang nicht limitiert. Dieses Element – und andere bislang weitgehend unbeachtete Parameter – können aber entscheidenden Einfluss haben. Das wirkt sich insbesondere dann aus, wenn damit eine Normprüfung unter den ansonsten standardisierten Bedingungen eines Feuerungsprüfstands durchgeführt werden soll. Auch zu solchen wenig beachteten Messgrößen sollte daher eine systematische Bestandsaufnahme erfolgen, um schließlich die Definition realitätsnaher Testbrennstoffe für die Forschungs- und Prüfpraxis zu ermöglichen.

Zudem wurden die Korrelationen zwischen den physikalischen, brennstofftechnischen und inhaltsstofflichen Eigenschaften der Holzpellets bislang nur wenig systematisch untersucht. Daher wurden die ausgewählten Pellets auf solche Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern geprüft, um das grundlegende Verständnis zur Bedeutung der einzelnen Messgrößen zu verbessern.

2 Auswahl der Pelletproben

Für die Untersuchungen wurden 42 Pelletproben als Sackware beschafft. Diese kamen aus ganz Europa, wobei der Fokus auf dem deutschen Markt lag. Die Pellets sollten originalverpackt und vorzugsweise nach *DINplus* oder *ENplus* zertifiziert sein. Diese Eigenschaften konnten, mit wenigen Ausnahmen, eingehalten werden. Bei den allermeisten Proben handelte es sich um originalverpackte Säcke, die mit 15 kg Holzpellets gefüllt waren. 27 der 42 Pelletproben waren mit dem *ENplus*-Zeichen gekennzeichnet, 22 mit dem *DINplus*-Zeichen. Einige Proben wiesen beide Zertifikate auf, acht Proben hatten keines der beiden Zertifikate. 20 der untersuchten Pelletproben wurde in Deutschland produziert, einige davon auch in Bayern. Die restlichen 22 Proben kamen aus dem europäischen Ausland und eine aus den USA.

Die Proben wurden beispielsweise in Baumärkten, von Brennstoffhändlern oder auch Pelletproduzenten direkt beschafft. Einige Proben wurden von Forschungspartnern aus dem europäischen Ausland erworben und zur Verfügung gestellt.

Bei einer Vielzahl der Pelletproben fanden sich auf der Verpackung Angaben zu den Eigenschaften der Pellets sowie zum Ausgangsmaterial, aus dem sie hergestellt worden waren. Die Angaben variierten jedoch in ihrer Ausführlichkeit, Genauigkeit und auch in der angegebenen Maßeinheit.

Bereits bei einer Sichtung konnten bei den Pellets große optische Unterschiede festgestellt werden. Während beim Durchmesser, bis auf eine Ausnahme, alle Proben noch gleich ausfielen, konnten bei der Längenverteilung größere Abweichungen untereinander ausgemacht werden. Auch im farblichen Erscheinungsbild wichen die Holzpellets teilweise stark voneinander ab.

3 Stand des Wissens

3.1 Pelletierung

Die Pelletierung besteht im Wesentlichen aus sieben aufeinanderfolgenden Prozessschritten (siehe Abbildung 1).

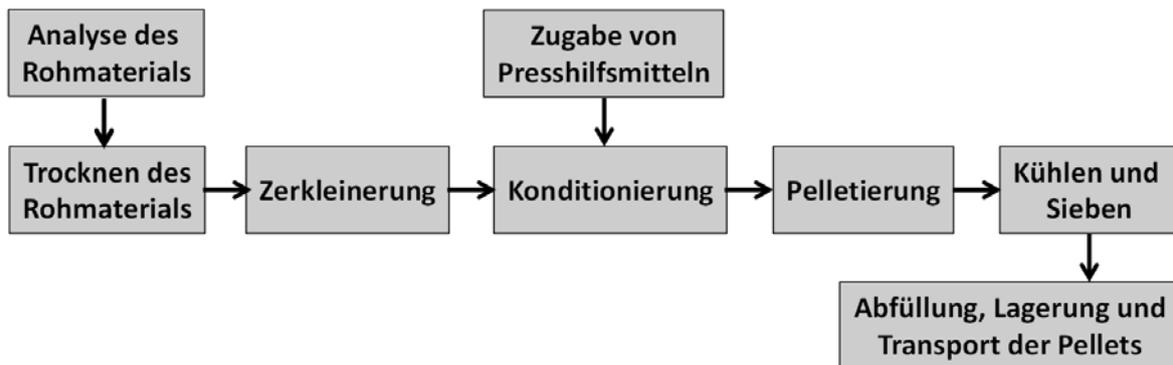


Abbildung 1: Prozessschritte bei der Pelletierung

Zunächst kommt der Auswahl und Analyse des Rohmaterials eine große Bedeutung zu. Hier werden sowohl für die erfolgreiche Pelletierung als auch für die tatsächlich erreichbare Brennstoffqualität wichtige Einflussgrößen bereits festgelegt. Dabei spielen der Wassergehalt, die Form bzw. Stückigkeit und die Faserstruktur des Ausgangsmaterials ebenso wie die verwendete Holzart (z. B. Buche oder Fichte), deren Rindenanteil und die Lagerdauer des Materials eine Rolle.

Häufig wird das Rohmaterial als Späne und Holzmehl aus der Holzverarbeitenden Industrie bzw. aus Sägewerken mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 35 bis 45 m.-% angeliefert. Zunehmend wird auch Waldholz direkt verwendet. In einem ersten Prozessschritt wird das Material bis zu einem Wassergehalt von 10 bis 14 m.-% in direkt oder indirekt befeuerten Trommel- oder Bandtrocknern getrocknet und im darauffolgenden Systemschritt zerkleinert [23]. Ziel der Zerkleinerung ist es, ein möglichst homogenes Ausgangsmaterial mit möglichst gleichmäßiger Korngrößenverteilung zu erhalten. Dazu wird das Rohmaterial i. d. R. in robusten Hammermühlen so lange gemahlen, bis die Korngröße etwa 1 mm kleiner als der gewünschte Pelletdurchmesser ist. Je feiner das Material dabei gemahlen wird, desto leichter kann das im Holz enthaltene natürliche Bindungsmittel Lignin während der Pressung aufgespalten werden, wodurch sich die natürlichen Bindungseigenschaften erhöhen [32].

Nach der Zerkleinerung erfolgt die Konditionierung. Hierzu wird das Material je nach Wassergehalt durch Befeuchtung (bei < 10 m.-%) oder Trocknung (bei > 15 m.-%) auf einen einheitlichen Wassergehalt gebracht. Ziel dabei ist, das Lignin im Holz zu erweichen und die Bindungseigenschaften weiter zu erhöhen [23]. Bei der Konditionierung

kann es auch zur Zugabe biogener Presshilfsmittel wie Weizen- oder Maisstärke kommen, die ebenfalls die Bindung verbessern sollen.

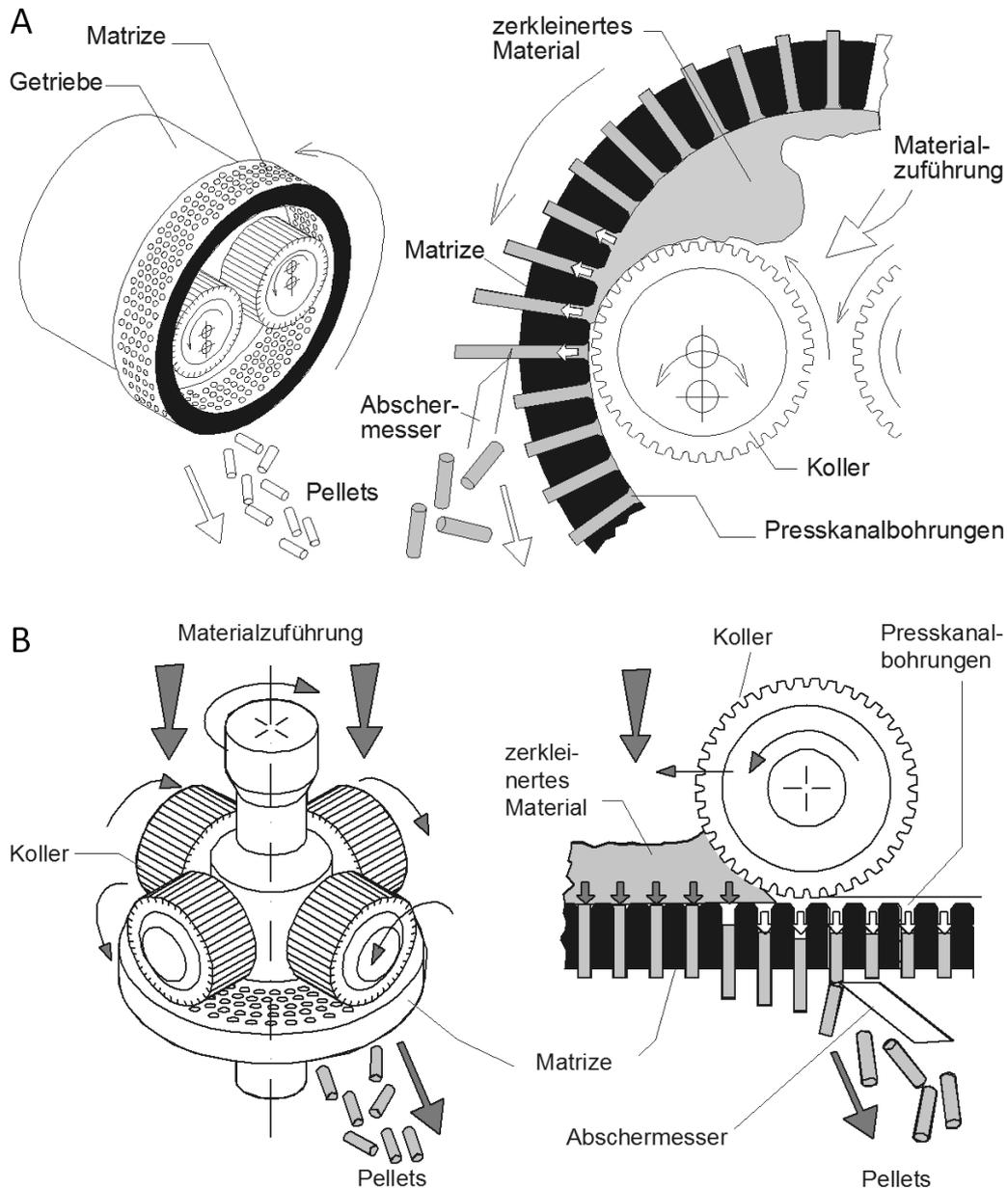


Abbildung 2: Pelletpressen (A = Arbeitsprinzip einer Kollergangpresse mit Ringmatrize, B = Arbeitsprinzip einer Kollergangpresse mit Flachmatrize) [23]

Nach der Konditionierung erfolgt die Pressung des Materials zu der typischen zylindrischen Pelletform, die in Europa meist einen Durchmesser von 6 oder 8 mm hat. Die Pressung erfolgt durch Kollergangpressen mit Lochmatrizen. Zur Anwendung kommen dabei sowohl Ringmatrizen, bei denen die Koller auf der Innenseite einer ringförmigen Matrize laufen (Abbildung 2A), aber auch Flachmatrizen, bei denen die Koller über eine

tellerförmige Matrize geführt werden (siehe Abbildung 2B) [23]. Im Anschluss daran werden die Pellets durch ein Abschermesser auf die richtige Länge geschnitten. Dieses Messer fehlte bei früheren Herstellungsprozessen, bei denen die Pellets selbsttätig auf eine zufällige Länge zerbrachen. Da heute besonders harte Pellets angestrebt werden, um den Abrieb zu verringern, brechen die Pellets bei der Produktion nicht mehr selbsttätig, wodurch sich die maximale Pelletlänge erhöht [32]. Eine zu große Pelletlänge kann jedoch zu Blockierungen der Beförderungssysteme führen. Deshalb werden die Pellets heute mechanisch abgeschnitten. Durch die Verwendung des Abschermessers ist es dabei möglich, Pellets mit einer festgelegten Maximallänge, z. B. von 40 mm, zu produzieren.

Nach dem Pressen müssen die Pellets, die sich aufgrund der Reibung beim Pressvorgang auf bis zu 130 °C aufgeheizt haben, möglichst schnell auf 25 °C abgekühlt werden, um gut auszuhärten [23][32]. Anschließend wird das Material gesiebt, um möglichen Feinanteil abzutrennen. Danach stehen die Pellets zur Abfüllung als Sackware, zur Lagerung in Silos oder zum Transport in Silofahrzeugen bereit.

3.2 Normen und Zertifizierung

Die international gültig Normenreihe DIN EN ISO 17225 (Teile 1–8) soll die Brennstoffqualität biogener Festbrennstoffe klassifizieren, damit es für Anbieter und Käufer möglich ist, in einfacher Art und Weise untereinander zu kommunizieren und effizienten Handel miteinander zu betreiben. Teil 2 der Norm beschäftigt sich mit Holzpellets für die nicht industrielle Verwendung. In der Einleitung der Norm ist beschrieben, in welchen Feuerungssystemen die betreffenden Pellets eingesetzt werden können: Pelletöfen, Pelletbrenner, Pelletheizkessel oder Systeme mit integriertem Pelletbrenner [14]. Die DIN EN ISO 17225-2 ersetzt seit September 2014 die vorher gültige europäische Norm DIN EN 14961-2 [9].

In Tabelle 1 sind in den entsprechenden Spalten die Normanforderungen an die Holzpellets für die Klasse A1 dargestellt. Um die DIN EN ISO 17225-2 zu erfüllen, müssen die Pellets aus Stammholz oder aus chemisch unbehandelten Holzrückständen, wie etwa Wald- oder Sägerestholz, hergestellt sein. Des Weiteren enthält die Norm Grenzwerte und Mindestanforderungen für die physikalischen Eigenschaften Durchmesser, Länge, Feinanteil, mechanische Festigkeit und Schüttdichte. Bei den brennstofftechnischen Eigenschaften sind Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert nach oben bzw. unten limitiert. Zudem bestehen für den Gehalt einiger inhaltsstofflicher Elemente Grenzwerte, die von den Pellets einzuhalten sind. Eine Angabe zum Ascheschmelzverhalten der Holzpellets wird in der Norm zwar empfohlen, ist aber nicht verpflichtend [14].

Tabelle 1: Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und möglicher Zertifizierungen (Stand 2014²) [14][16][17]. wf = wasserfrei, an = im Anlieferungszustand, m.-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben

Eigenschaftsklasse	DIN EN ISO 17225-2 A1	DINplus	ENplus A1
Herkunft und Quelle	Stammholz, chemisch unbehandelte Holzrückstände	k. A.	Stammholz, chemisch unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie
Durchmesser d [mm]	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1
Länge l [mm]	3,15 ≤ l ≤ 40 ¹	3,15 ≤ l ≤ 40	3,15 ≤ l ≤ 40
Wassergehalt [m.-%]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Aschegehalt (wf) [m.-%]	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7
Mech. Festigkeit [m.-%]	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 97,5 ²
Feinanteil [m.-%]	≤ 1,0	≤ 1,0 (Schüttgut) ≤ 0,5 (Sackware bis 20 kg)	≤ 1,0 ²
Additive (wf) [m.-%]	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	k. A.
Heizwert H _u (an) [MJ/kg]	≥ 16,5	≥ 16,5	16,5 ≤ H _u ≤ 19 ²
Schüttdichte (an) [kg/m ³]	≥ 600	≥ 600 ²	≥ 600 ²
Stickstoff (wf) [m.-%]	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3
Schwefel (wf) [m.-%]	≤ 0,04	≤ 0,03 ²	≤ 0,03 ²
Chlor (wf) [m.-%]	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02
Arsen (wf) [mg/kg]	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cadmium (wf) [mg/kg]	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Kupfer (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Blei (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Quecksilber (wf) [mg/kg]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zink (wf) [mg/kg]	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Ascheschmelzverhalten [°C]	Sollte angegeben werden	Muss konkret angegeben werden ²	Erweichungstemperatur ≥ 1 200

¹ Die Masse an Pellets > 40 mm darf 1 m.-% betragen. Überlange Pellets müssen ≤ 45 mm sein.

² Die Angaben beziehen sich auf die Anforderungen, welche zum Zeitpunkt der Probenahmen und der Analysen gültig waren. Aktuelle Anforderungen ab dem Jahr 2015 weichen von diesen leicht ab und werden im Anhang (Tabelle 9) wiedergegeben.

Neben der Norm für Holzpellets sind in Tabelle 1 auch die Anforderungen zweier Zertifizierungssysteme aufgeführt. Zum einen ist dies der *DINplus*-Standard, der von dem Unternehmen DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH entwickelt wurde. Um das *DINplus*-Label zu erhalten, muss der Pellethersteller der Prüfstelle eine Probe seiner Pellets zur Verfügung stellen, die dann auf die in der Tabelle aufgeführten Parameter hin untersucht wird. Werden alle Voraussetzungen eingehalten, erhält der Hersteller von DIN CERTCO ein für fünf Jahre gültiges Zertifikat.

Das Zertifikat kann um jeweils fünf Jahre verlängert werden, wenn die Herstellerfirma der Holzpellets alle Überwachungsmaßnahmen ordnungsgemäß durchführt. Diese werkseigene Produktionskontrolle wird von DIN CERTCO jährlich überprüft. Zugleich wird eine Stichprobe genommen und auf die relevanten Parameter hin untersucht [17].

Das zweite in Tabelle 1 dargestellte Zertifikat ist der *ENplus*-Standard. Diese Zertifizierung war anfangs für Deutschland und Österreich vorgesehen, findet heute aber weltweit Verwendung. Der Grundgedanke hinter dem *ENplus*-Standard und damit auch der wichtigste Unterschied zur *DINplus*-Zertifizierung ist, dass bei *ENplus* neben dem Produkt selbst auch die nötigen Prozesse und das Managementsystem berücksichtigt werden. Konkret heißt das, dass auch die Brennstoffhändler, über die die Pellets vertrieben werden, in den Zertifizierungsprozess eingebunden werden. Durch diese Verfahrensweise soll eine hohe Qualität der Pellets auf dem gesamten Weg bis zum Endverbraucher sichergestellt werden.

Eine weitere Besonderheit bei diesem Zertifikat ist, dass bei der Qualitätsklasse A1 eine Mindestanforderung für die Ascheerweichungstemperatur existiert. Die Ascheerweichungstemperatur hat maßgeblichen Einfluss auf den störungsfreien Betrieb einer kleinen Pelletfeuerung. Das *ENplus*-Qualitätssiegel, das derzeit über 90 % der in Deutschland produzierten und fast die Hälfte der im Land gehandelten Pellets tragen, wird in Deutschland von der Deutschen Pelletinstitut GmbH geführt. Von dort ausgehend werden die zertifizierten Unternehmen jährlich einer Werkskontrolle unterzogen. Daneben müssen die betreffenden Firmen auch eine interne Qualitätskontrolle durchführen und die Mitarbeiter sind verpflichtet, Schulungen zu absolvieren [3].

Die in Tabelle 1 dargestellten Anforderungen beziehen sich auf den Zeitpunkt der Probenahme und der Analysen im Jahr 2014. Die Anforderungen der Zertifikate wurden im Jahr 2015 für die mechanische Festigkeit (nur *ENplus*), die Schüttdichte, den Heizwert, den Schwefelgehalt und das Ascheschmelzverhalten (nur *DINplus*) angepasst. Die aktuellen Anforderungen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes im Jahr 2015 finden sich im Anhang (Tabelle 9).

3.3 Frühere Untersuchungen von Holzpellets

In Slowenien wurde im Jahr 2013 vom slowenischen Forstinstitut eine Qualitätsanalyse für Pellets durchgeführt. Die Verbraucher dort fragen üblicherweise Sackware nach, weshalb ausschließlich solche betrachtet wurde. 16 Proben verschiedener Anbieter wur-

den hinsichtlich Schüttdichte, mechanischer Festigkeit, Wassergehalt und Aschegehalt analysiert. Nur drei der Proben konnten die Anforderungen der Klasse A1 der Norm DIN EN 14961-2 erfüllen, während sechs Proben nicht einmal mehr für die Klasse B geeignet waren. In einer zweiten Versuchsreihe mit 20 Pelletproben von Anbietern aus ganz Slowenien untersuchte das Forstinstitut wiederum Aschegehalt, mechanische Festigkeit, Schüttdichte und Wassergehalt sowie zusätzlich den Heizwert. Die Analysen wurden dabei nach den entsprechenden europäischen Prüfnormen durchgeführt. Auch diese Versuchsreihe lieferte alarmierende Ergebnisse. Vor allem der Aschegehalt erwies sich als sehr kritischer Wert. Hier konnten nur 10 % der Qualitätsstufe A1 zugeordnet werden, jede vierte Probe erfüllte nicht einmal die Anforderungen der Qualitätsstufe A2. Der zweite kritische Wert war die mechanische Festigkeit. Auch hier konnten 20 % der Proben die Anforderungen der Norm nicht erfüllen. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen war, dass die auf die Pelletsäcke gedruckten Angaben in vielen Fällen lückenhaft oder auch mit Fehlern behaftet waren. So war den Aufschriften oft weder das Herkunftsland noch der Hersteller zu entnehmen oder es gab falsche Informationen zu den Qualitätsparametern der Pellets. Als Konsequenz aus den Testergebnissen beschloss das slowenische Forstinstitut, die Qualitätsanalysen in Zukunft weiterhin durchzuführen [30].

Die Stiftung Warentest führte in Deutschland eine ähnliche Untersuchung im Jahr 2009 durch. Gegenstand dieser Analyse waren zehn deutsche Pelletproben als Sackware. Der Fokus wurde bei den Tests auf die Verbrennungseigenschaften gelegt. Daneben wurden aber auch weitere Umwelteigenschaften und technische Eigenschaften sowie die Angaben auf den Pelletsäcken untersucht und eine Anbieterbefragung durchgeführt. Sowohl bei den Verbrennungseigenschaften als auch bei technischen Eigenschaften und Umwelteigenschaften schnitten die untersuchten Proben durchweg positiv ab. Als Vergleichswerte zog die Stiftung Warentest die Anforderungen der DIN*plus*-Zertifizierung heran. Einzig bei den auf den Säcken aufgedruckten Angaben lieferten einige Anbieter Anlass zur Kritik. So waren etwa die Angaben nicht in deutscher Sprache oder es fehlten wichtige Parameter. Als Gesamtergebnis erhielten jedoch alle zehn Holzpelletproben ein gutes Testurteil [34].

4 Probenahme und Probenaufbereitung für die weiteren Analysen

4.1 Repräsentative Probenentnahme

Von fast allen untersuchten Proben standen 15 kg Probenmaterial zur Verfügung. Da für die einzelnen Analysen jedoch eine geringere Menge benötigt wurde, musste eine Probenentteilung durchgeführt werden. Das Schema dazu zeigt Abbildung 3.

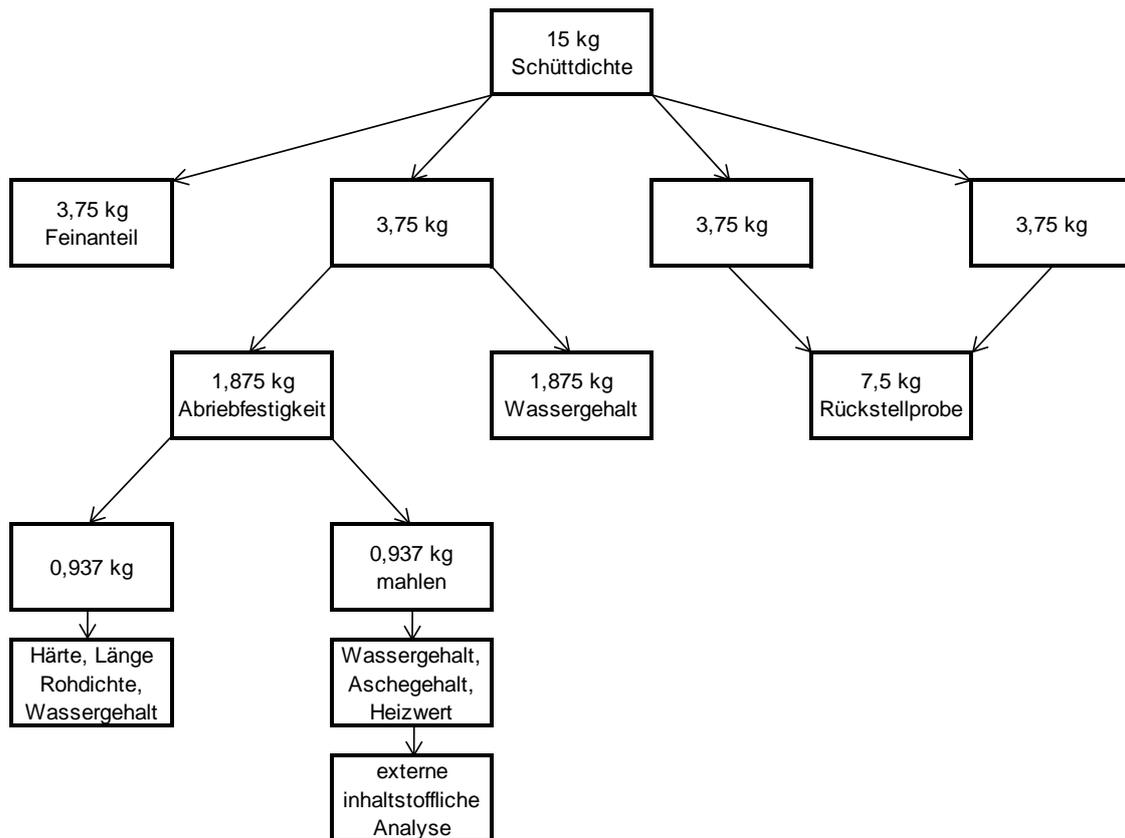


Abbildung 3: Schema der Probenentteilung und -verwendung

Die 15 kg konnten mithilfe eines großen Probenteilers in vier gleich große Teilmengen aufgeteilt werden. Zwei dieser Teilmengen wurden wieder in den Pelletsack verpackt und dienen als Rückstellprobe. Eine Teilprobe mit 3,75 kg war für die Bestimmung des Feinanteils vorgesehen. Die übrigen 3,75 kg mussten in einem kleinen Probenteiler ein weiteres Mal geteilt werden. Die Teilmengen von je ca. 1,875 kg wurden zur Bestimmung der Abriebfestigkeit bzw. des Wassergehalts verwendet. Nach Abschluss der Abriebfestigkeitsbestimmung wurde die Probe erneut geteilt. Aus einer der beiden Proben à 0,937 kg wurden durch weitere Probenreduktion Teilproben für die Bestimmung der Pelletlänge, Pellethärte und Rohdichte gewonnen. Aus der anderen konnten die Holzpellets für die

brennstofftechnischen Analysen und die inhaltsstoffliche Untersuchung aufbereitet werden (siehe Unterkapitel 4.2).

4.2 Probenaufbereitung

Den ersten Schritt der Probenaufbereitung stellte eine Zerkleinerung der Holzpellets auf eine Korngröße von 1 mm dar. Dieser Vorgang wurde mit einer Schneidmühle (Retsch SM 2000, Retsch GmbH) durchgeführt, die mit einem Siebeinsatz mit 1 mm Lochweite versehen war. Da eine weitere Zerkleinerung auf 0,5 mm Korngröße erforderlich war, kam eine Zentrifugalmühle (Retsch ZM 100, Retsch GmbH) mit einem entsprechenden Sieb zum Einsatz. Das Mahlgut jeder Probe wurde in zwei luftdicht verschließbare Probefläschchen gefüllt. Ein Fläschchen wurde am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) für die Durchführung der Analysen zu den brennstofftechnischen Parametern Aschegehalt und Heizwert verwendet. Das zweite Fläschchen wurde zur Analyse an ein externes Labor verschickt.

5 Brennstofftechnische Eigenschaften und deren Bestimmung

Die dargestellten Ergebnisse werden mit den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-2 sowie den zum Zeitpunkt der Probenahme und der Analysen im Jahr 2014 gültigen Anforderungen an den Brennstoff nach *DINplus* und *ENplus* verglichen (Tabelle 1). Die Anforderungen der Zertifikate wurden im Jahr 2015 für die mechanische Festigkeit (nur *ENplus*), die Schüttdichte, den Heizwert, den Schwefelgehalt und das Ascheschmelzverhalten (nur *DINplus*) angepasst. Die aktuellen Anforderungen finden sich im Anhang (Tabelle 9), können aber für die Bewertung der Brennstoffqualität von Pellets, welche im Jahr 2014 produziert wurden, nicht herangezogen werden.

5.1 Aschegehalt

Als Asche wird der anorganische Rückstand bezeichnet, der bei der thermochemischen Umwandlung von Biomasse zurückbleibt. Die Asche kann dabei von der Biomasse selbst oder von Verunreinigungen, die dem Brennstoff während seiner Verarbeitung zugefügt wurden, stammen. Naturbelassenes Holz ohne anhaftende Rinde weist einen Aschegehalt von durchschnittlich 0,5 m.-% auf. Für die Betreiber von Pelletfeuerungen ist der Aschegehalt ein wichtiger Faktor, da dadurch der Reinigungsaufwand bzw. die Häufigkeit der Entaschung bestimmt wird [19].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Aschegehalt nach DIN EN 14775 [7] bestimmt. Dazu wurde jeweils 1 g der gemahlten Probe in einem Schmelztiegel eingewogen und einer thermischen Behandlung in einem Muffelofen (L15/S, Nabertherm) unterzogen. Darin fand die Veraschung nach einem genau definierten Programm statt. Dabei wird die Ofentemperatur über eine Dauer von 50 Minuten gleichmäßig auf 250 °C erhöht (Anstieg von 5 K/min). Diese Temperatur ist über 60 Minuten aufrechtzuerhalten, damit die flüchtigen Stoffe vor dem Verbrennen aus der Probe entweichen können. Anschließend ist die Ofentemperatur bei einem Anstieg von 5 K/min weiter gleichmäßig auf 550 °C zu erhöhen, um schließlich diese Temperatur über mindestens 120 Minuten beizubehalten. Aus der Masse der gewonnenen Asche und des eingesetzten Brennstoffs kann der Aschegehalt berechnet werden. Wie in der entsprechenden Norm gefordert, wurden für jede Probe zwei Bestimmungen durchgeführt. Nachfolgend sind die Mittelwerte der Aschegehalte für die Pelletproben mit aufsteigendem Aschegehalt dargestellt (Abbildung 4).

Die Abbildung zeigt den Grenzwert, der sowohl durch die DIN EN ISO 17225-2 A1 als auch durch die Zertifizierungsverfahren *DINplus* und *ENplus* A1 vorgegeben ist [14][16][17]. Somit ist leicht zu erkennen, dass die Probe 42 den Grenzwert nicht einhält. Mit 1 m.-% Aschegehalt auf wasserfreier Bezugsbasis liegt sie deutlich über dem vorgeschriebenen Grenzwert von 0,7 m.-%. Da naturbelassenes, rindenfreies Holz i. d. R. einen Aschegehalt von etwa 0,5 m.-% aufweist [23], liegt die Vermutung nahe, dass für die Probe 42 entweder ein Rohstoff mit einem hohen Rindenanteil verwendet wurde oder Verunreinigungen von anderer Stelle in das Holz gelangt sind. Genauere Aussagen lassen sich aufgrund der Unkenntnis über die Produktionsbedingungen und Produktionsver-

fahren hier jedoch nicht treffen. Alle anderen Proben bleiben dagegen in einem guten Rahmen von 0,22 bis 0,52 m.-%. Über alle 42 untersuchten Pelletproben ergibt sich ein mittlerer Aschegehalt von 0,35 m.-%. Kritisch zu sehen sind lediglich die Herstellerangaben. Auf der Verpackung von Probe 41 ist ein Maximalwert von 0,35 m.-% für den Aschegehalt angegeben, der tatsächlich gemessene Wert liegt jedoch bei 0,52 m.-%. Zudem fiel auf, dass bei den Proben 12 und 15 auf der Verpackung ein exakter Aschegehaltswert angegeben wurde, anstelle eines möglichen Wertebereichs. Beide Holzpelletproben erfüllen dennoch die Anforderungen.

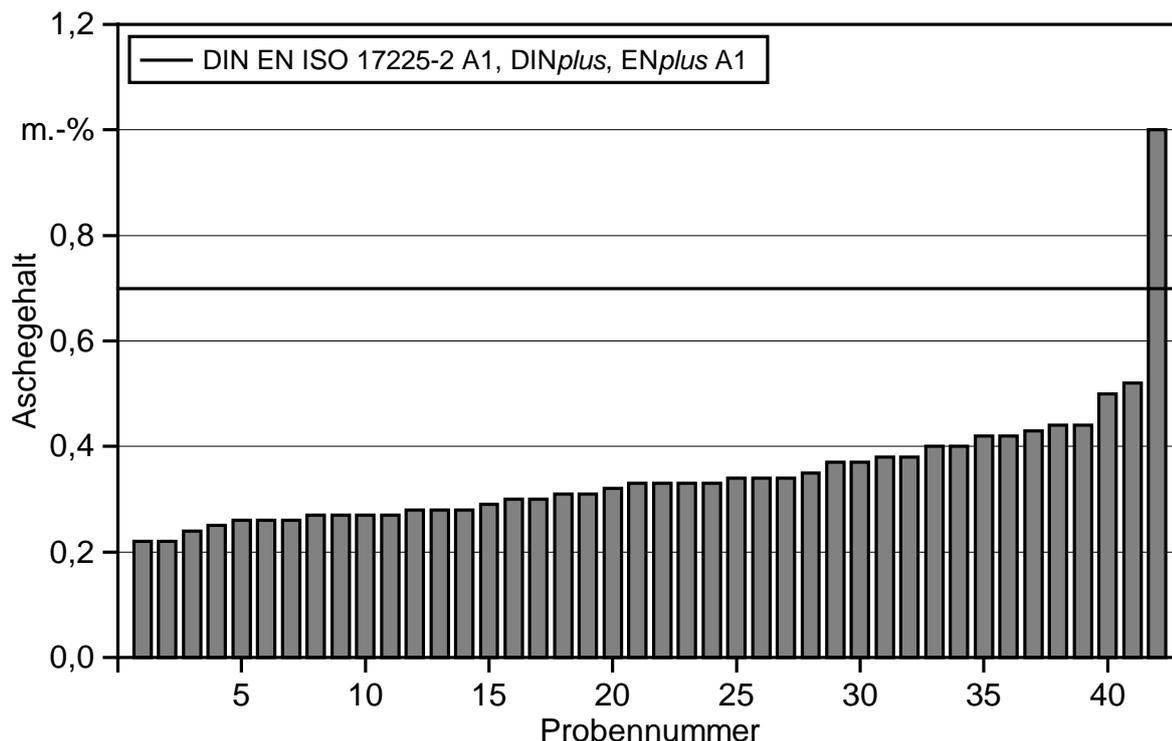


Abbildung 4: Aschegehalt der Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

5.2 Wassergehalt

Ein weiterer wichtiger brennstofftechnischer Parameter bei der Untersuchung der Holzpellets ist der Wassergehalt M („Moisture“). Dieser ist definiert als das Verhältnis der Masse des Wassers, das sich im Brennstoff befindet, zur Gesamtmasse. Die Gesamtmasse ergibt sich aus der Summe der Massen von Wasser und absolut trockener Biomasse. Angegeben wird der Wassergehalt als Massenanteil in Prozent (m.-%) [5].

Für die Nutzer von Holzpellets ist der Wassergehalt insofern interessant, da er den aktuellen Heizwert eines Brennstoffs maßgeblich beeinflusst, da die zur Verdampfung des Wassers aus der Biomasse nötige Wärmeenergie der Umgebung entzogen wird. Diese Wärmeenergie muss zuerst durch die thermochemische Umwandlung des Brennstoffs

bereitgestellt werden. Wird dann, wie in der Praxis derzeit üblich, das Abgas einer Pelletfeuerung nicht rückkondensiert und die Wärmeenergie dadurch nicht zurückgewonnen, steht als Nutzwärme nur die Differenz aus Energieinhalt der Biomasse und Verdampfungswärme des Wassers zur Verfügung. Zudem ist der Wassergehalt ein wichtiger Faktor bei der Lagerung der Holzpellets. Ein Wassergehaltswert von über 20 m.-% kann etwa zu biologischen Um- oder Abbauprozessen führen, die ihrerseits einen Energieverlust bedeuten. Aber auch bei geringem Wassergehalt der Pellets kann eine Selbsterwärmung eintreten, z. B. durch Adsorptionswärmebildung bei Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft oder durch Oxidationsprozesse der im Holz enthaltenen freien Fettsäuren. Das kann bei sehr großen Lagern bis zur Selbstentzündung führen [23][24]. Wiederbefeuchtung von Pellets führt zudem zum Quellen des Rohmaterials. Als Folge kann das Volumen stark zunehmen und zu Problemen in eng dimensionierten Lagerräumen führen. Zugleich können die Pellets ihre Festigkeit verlieren und teilweise zerfallen.

Die hier durchgeführte Bestimmung des Wassergehalts für feste Biobrennstoffe folgte der europäischen Norm DIN EN 14774-2 [5]. Am TFZ wurde hierzu jeweils eine Pelletmenge von 500 g in einer Aluminiumschale eingewogen. Die Schalen wurden in einem Trockenschrank (FED720-02-42004, Binder GmbH) bei 105 °C für 24–48 Stunden gelagert. Auf diese Weise wurden die Proben so lange getrocknet, bis die Massenkonstanz erreicht war. Von den getrockneten Pellets wurde anschließend die Masse bestimmt. Aus den ermittelten Werten kann der Wassergehalt berechnet werden. Zur Verminderung der Gefahr von Verzerrungen durch Messfehler wurde jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt und im Anschluss der Mittelwert aus den beiden Werten errechnet. Abbildung 5 zeigt die Wassergehalte der auf diese Weise analysierten Pelletproben.

In der Grafik für den Wassergehalt sind die Werte für die einzelnen Proben zusammen mit dem von der DIN EN ISO 17225-2 sowie einheitlich auch von Zertifizierungssystemen vorgegebenen Grenzwert von 10 m.-% dargestellt [14][16][17]. Es zeigt sich, dass sich die untersuchten Proben in einem Bereich von 3 bis knapp 11 m.-% bewegen, der Großteil davon jedoch zwischen ca. 5 und 8 m.-%. Probe 39 liegt mit einem Wert von 10,8 m.-% über dem Grenzwert und erfüllt somit die Normanforderung nicht. Das andere Extrem stellt die Probe Nummer 21 dar, die mit 3,3 m.-% einen sehr niedrigen Wassergehalt aufweist. Damit ergibt sich gemittelt ein Wassergehalt von 6,9 m.-%. Auch bei diesem Parameter sind, wie zuvor beim Aschegehalt, unter den Herstellerangaben Fehler zu finden. Für die Probe 1 ist ein zu niedriger Wert auf der Verpackung angegeben, für Nummer 9 und 12 ist jeweils ein exakter Wert angegeben, der allerdings nicht diesen Untersuchungsergebnissen entspricht. Die Proben 16, 32 und 40 unterbieten den angegebenen Bereich des Wassergehalts.

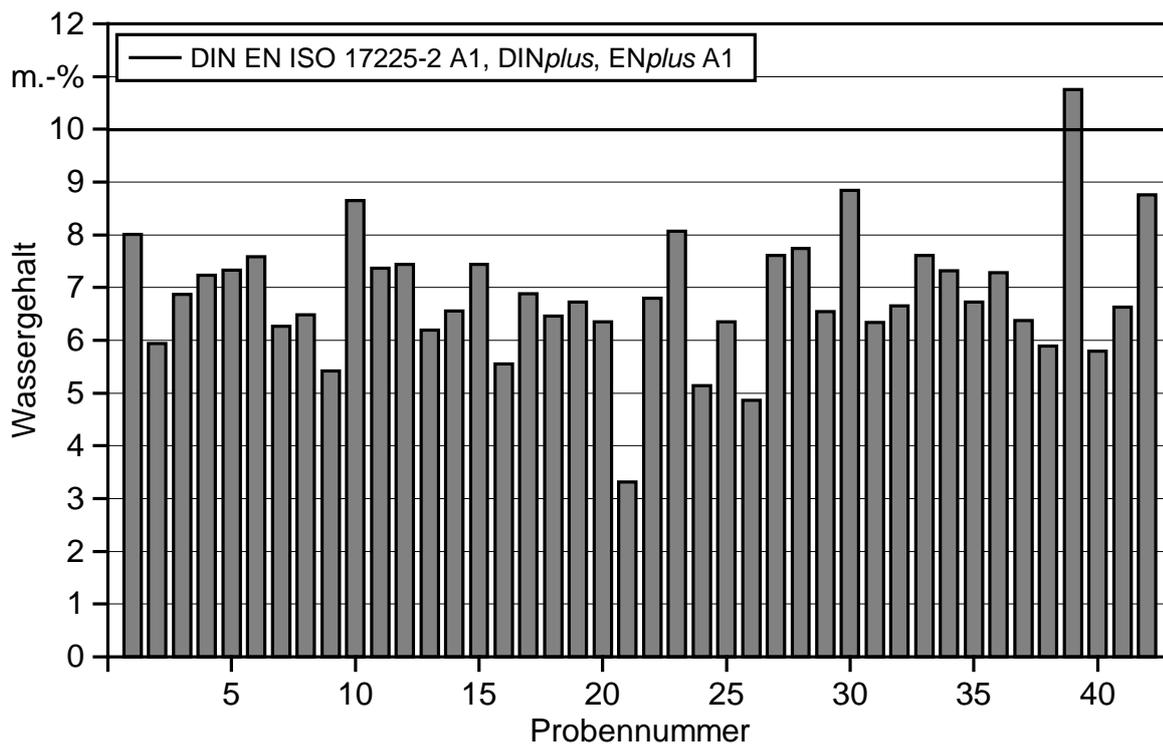


Abbildung 5: Wassergehalt der Pelletproben; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

5.3 Heizwert

Der Heizwert Q beziffert die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation unter konstantem Volumen bzw. konstantem Druck einer bestimmten Menge des betreffenden Brennstoffs freigesetzt wird. Die Kondensationswärme des Wassers bleibt dabei unberücksichtigt. Dies bedeutet, dass die Energie, die bei der Rückkondensation des im Brennstoff befindlichen Wassers entstehen würde, dem Heizwert nicht zugerechnet wird. Biogene Festbrennstoffe weisen in der Regel einen Heizwert im Bereich von 16,5 bis 19 MJ/kg im wasserfreien Zustand auf. Holz liegt dabei am oberen Ende des Bereichs. Nadelholz liegt bei den Werten meist etwas höher als Laubholz, was auf einen höheren Ligningehalt, aber auch auf höhere Gehalte von Holzextraktstoffen wie Harze oder Öle zurückzuführen ist. Beeinflusst wird der Heizwert maßgeblich von den inhaltsstofflichen Elementen im Brennstoff. Oxidierbare Elemente, dabei vor allem Kohlenstoff und Wasserstoff, aber auch Nährstoffelemente, wie Schwefel oder Stickstoff, wirken sich steigend auf den Heizwert aus. Dagegen verringert ein höherer Sauerstoffgehalt den Heizwert.

Wie in Unterkapitel 5.2 erwähnt wirkt sich auch der Wassergehalt eines Brennstoffs entscheidend auf den Heizwert im Anlieferungszustand aus. Zwischen den beiden Werten besteht ein linearer Zusammenhang. Somit muss bei einer Berechnung des Heizwerts der Wassergehalt miteinbezogen werden. Auch der Aschegehalt beeinflusst den Heizwert. Bei einem erhöhten Aschegehalt von über 1 m.-% ist eine Reduzierung des Heiz-

werts festzustellen. Bei naturbelassenen Holzbrennstoffen ist jedoch i. d. R. kein Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Heizwert feststellbar [23].

Der Heizwert der Holzpellets wurde hier nach DIN EN 14918 [8] bestimmt. Aus der gemahlten Probe wurde dazu ein Pressling mit einer Masse von ca. 1 g mittels mechanischer Presse hergestellt. Zur Messung des Heizwerts war der Pressling in ein Bombenkalorimeter (IKA C 2000 basic, IKA-Werke GmbH & Co.KG) einzubringen, in welchem er unter definierten Bedingungen vollständig oxidiert wurde. Über die Temperaturerhöhung des Wassers im Kalorimeter und die exakte Masse des verbrannten Probenkörpers konnte der Heizwert errechnet werden. Um die Prüfanforderungen der Norm zu erfüllen, war auch hier eine Doppelbestimmung durchzuführen. Die beiden Teilergebnisse bildeten die Grundlage für die Berechnung des Mittelwerts. Der Heizwert kann dabei in verschiedenen Formen angegeben werden. Dies ist zum einen der Heizwert Q_{ar} , d. h. „as received“ (im Anlieferungszustand), wie er in Abbildung 6 zu sehen ist, und zum anderen der Heizwert Q_d , d. h. „dry“ (bezogen auf die wasserfreie Masse), dargestellt in Abbildung 7. Für Letzteren wird zusätzlich der analysefeuchte Wassergehalt nach DIN EN 14774-3 bestimmt [6]. Im Gegensatz zu der in Unterkapitel 5.2 beschriebenen Analyse nach DIN EN 14774-2 wird hier der Wassergehalt einer gemahlten 1-g-Probe verwendet. Hierdurch verringert sich die Trocknungsdauer auf ca. 4 h.

In Abbildung 6 symbolisieren die Balken die einzelnen Werte für den Heizwert (Q_{ar}) der Proben 1 bis 42. Die durchgehende schwarze Linie verdeutlicht die Mindestanforderung beim Heizwert Q_{ar} der DIN EN ISO 17225-2 (Klasse A1) und der Zertifizierungen *ENplus* A1 sowie *DINplus*, die bei 16,50 MJ/kg liegt [14][16][17]. Bereits auf den ersten Blick wird deutlich, dass alle 42 Pelletproben die Mindestanforderung erfüllen.

In der Literatur wird der Heizwert in der Regel auf wasserfreier Bezugsbasis angegeben. Die entsprechenden Werte sind zu Vergleichszwecken in Abbildung 7 dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Heizwerte (Q_d) über die gesamte Bandbreite der Proben relativ gleichmäßig verteilt sind. Sie bewegen sich in einem Rahmen von 18,68 MJ/kg bei Probe 27 bis 19,37 MJ/kg bei Probe 16. Im Durchschnitt beträgt der Heizwert (w_f) 18,96 MJ/kg. Diese Ergebnisse stimmen mit den oben genannten Werten aus der Literatur überein, wobei 13 der 42 Proben sogar über dem oberen Literaturwert von 19 MJ/kg liegen. Unter den Herstellerangaben auf den Verpackungen der Pellets sind beim Heizwert einige Falschangaben zu finden. So gibt es einige Pelletproben, bei denen jeweils ein exakter Heizwert angegeben ist, jedoch aber in keinem Fall genau erreicht wird. Während die Proben 4, 8, 12, 15, 20, 29, 38 und 41 noch über dem angegebenen Wert liegen, können ihn die Proben 6, 16, 32 und 40 nicht erreichen. Bei den Pellets der Nummern 3 und 30 sind zwar nur Bereiche und keine exakten Werte auf den Verpackungen angegeben, jedoch werden auch hier diese Angaben nicht eingehalten. Erstere kann einen höheren Heizwert als angegeben aufweisen, Letztere liegt unter der Angabe.

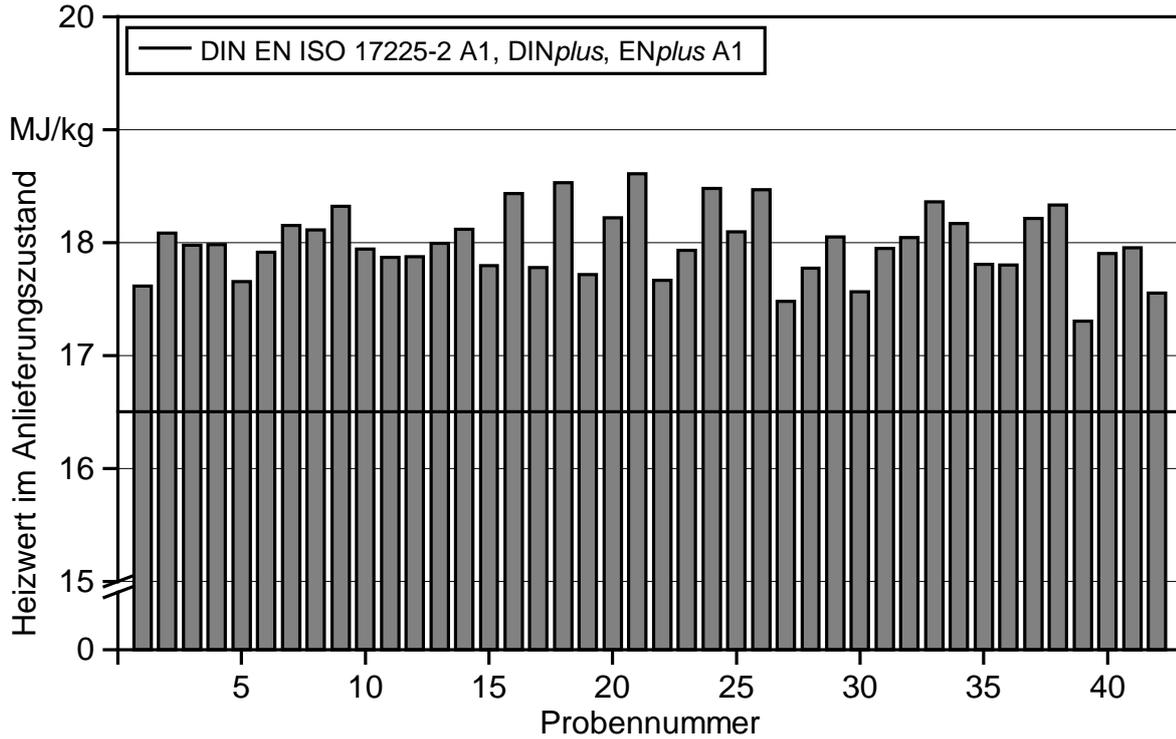


Abbildung 6: Heizwert Q_{ar} der Pelletproben im Anlieferungszustand („as received“); durchgehende Linie: Mindestanforderung der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

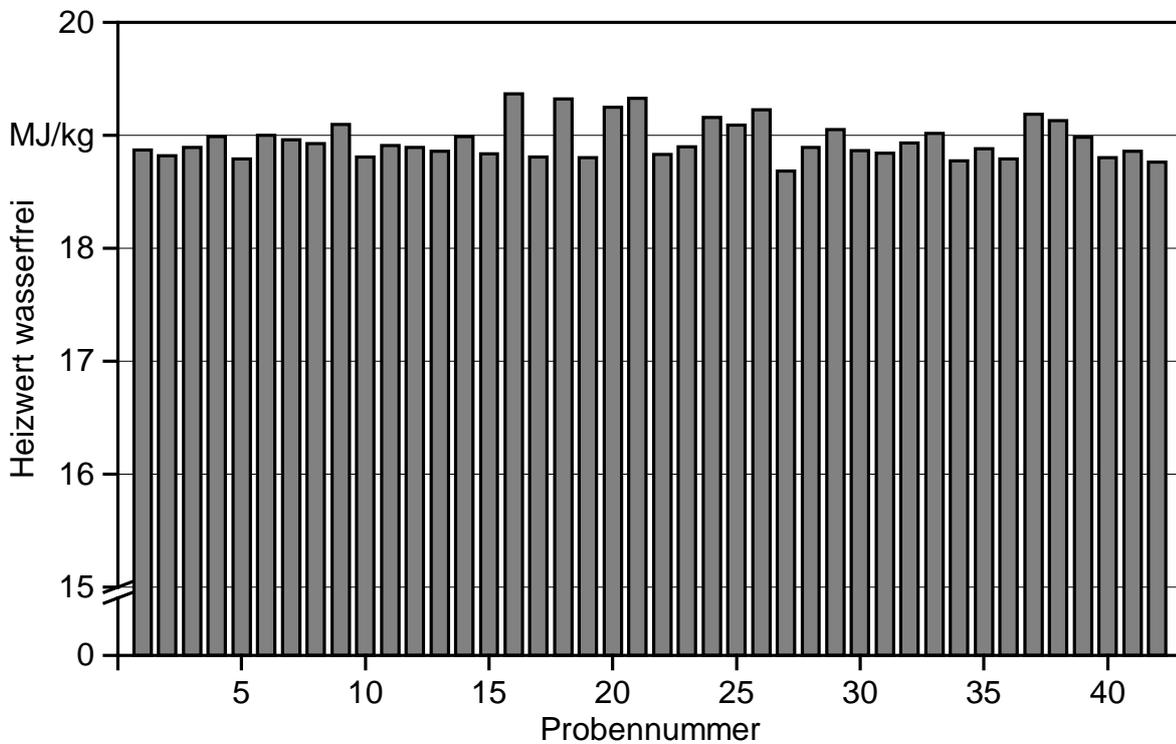


Abbildung 7: Heizwert Q_d der Pelletproben auf wasserfreier Bezugsbasis („dry“) (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

6 Physikalische Eigenschaften und deren Bestimmung

6.1 Schüttdichte

Als Schüttdichte BD („bulk density“) wird der Quotient aus Masse eines Schüttguts, welches in einen definierten Behälter gefüllt wird, und dem Volumen, welches dieser Behälter aufweist, bezeichnet. Der Wert dient als Grundlage bei der Abschätzung des bei Lagerung und Transport benötigten Platzbedarfs. Außerdem kann aus der Schüttdichte und dem Heizwert die Energiedichte berechnet werden.

Die Schüttdichte der Holzpellets wurde nach DIN EN 15103 bestimmt [10]. Zu diesem Zweck wurde ein zylindrischer Behälter mit einem Volumen von 15 Litern verwendet. Gemäß der einzuhaltenden Messvorschrift wäre auch ein Behälter von 5 Litern ausreichend gewesen. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messergebnisse wurde das größere Behältervolumen gewählt. Die Leermasse des Behälters wurde mithilfe einer Laborwaage bestimmt. Anschließend wurden die Holzpellets, wie in der Norm beschrieben, aus einer Höhe von etwa 250 mm in den Behälter gefüllt, bis sie einen Kegel mit der maximal möglichen Höhe bildeten. Anschließend wurde das Gefäß aus einer Höhe von 150 mm drei Mal auf eine Holzplatte aufprallen gelassen. Als Hilfe diente hier eine Vorrichtung, die die exakte Fallhöhe vorgab und eine normgerechte Holzplatte als Aufprallfläche besaß. Nach dieser Stoßaufbringung waren erneut Pellets aus ca. 250 mm Höhe nachzufüllen, bis sich ein möglichst hoher Kegel bildete. Vor der Wägung musste dieser Kegel dann mithilfe eines Kantholzes entfernt werden, sodass die Pellets und der obere Rand des Versuchsgefäßes eine ebene Oberfläche bildeten. Von dem so gefüllten Behälter wurde anschließend die Masse bestimmt. Das gesamte Verfahren wurde für jede Probe einmal wiederholt. Die Schüttdichte im Anlieferungszustand wurde berechnet, indem zuerst die Masse des leeren Behälters von der Gesamtmasse aus Behälter und Pellets subtrahiert und dieses Ergebnis dann durch das Volumen des Versuchsgefäßes dividiert wurde. Aus beiden Ergebnissen der Wiederholungen wurde schließlich der Mittelwert errechnet.

Abbildung 8 illustriert die ermittelten Messergebnisse. Bei den untersuchten Holzpellets gibt es hinsichtlich der Schüttdichte relativ große Unterschiede. Während Probe 21 eine maximale Schüttdichte von 709 kg/m^3 erreicht, unterschreitet die Probe 39 mit einer Schüttdichte von 599 kg/m^3 die Anforderung gemäß DIN EN ISO 17225-2 A1, ENplus A1 und DINplus, die bei 600 kg/m^3 liegt [14][16][17]. Die mittlere Schüttdichte aller Proben beträgt 662 kg/m^3 (im Anlieferungszustand). Eine derart niedrige Schüttdichte, wie sie bei Probe 39 vorlag, wirkt sich negativ auf den Platzbedarf bei Transport und Lagerung der Pellets aus. Trotz der breiten Streuung bei den Werten halten alle weiteren Proben die Mindestanforderung ein. Jedoch sind auch bei der Schüttdichte einige fehlerhafte Herstellerangaben zu bemängeln. So geben die Hersteller der Pelletproben 12 und 38 genaue Werte an, während die Hersteller von 23 und 37 Wertebereiche angeben; alle vier Proben unterschreiten die Angaben.

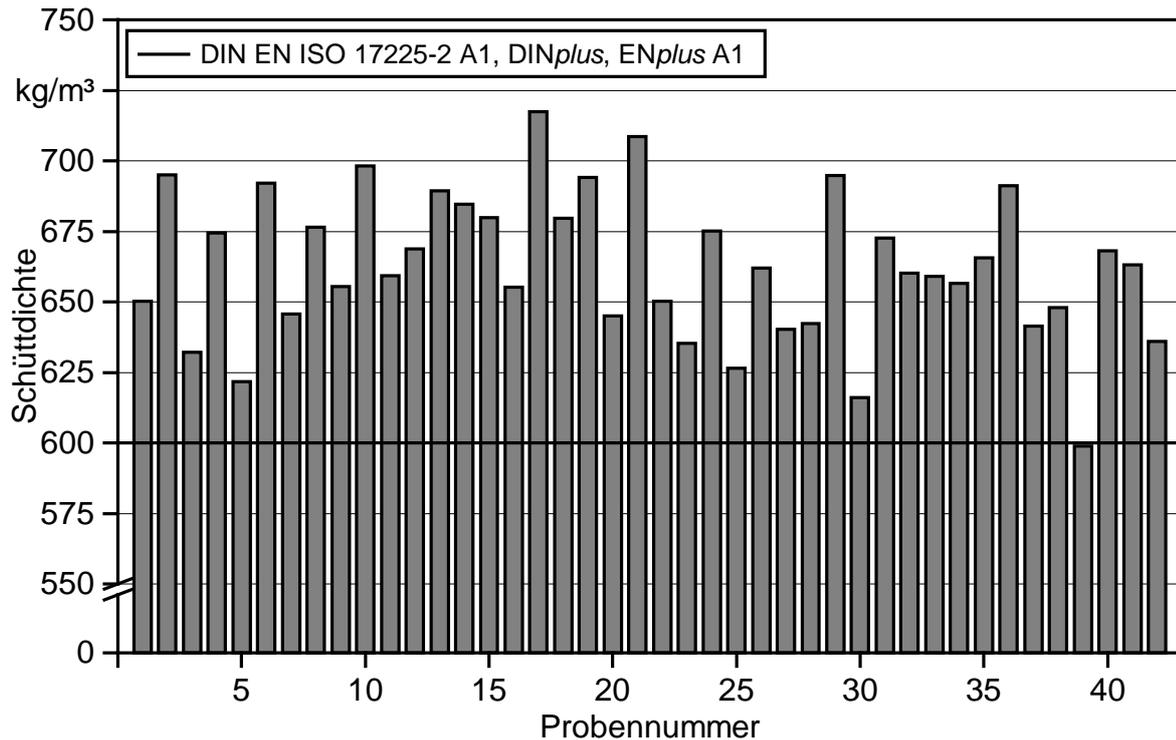


Abbildung 8: Schüttdichte der Pelletproben im Anlieferungszustand; durchgehende schwarze Linie: Mindestanforderung der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

6.2 Rohdichte

Die Rohdichte beschreibt das Verhältnis der Masse eines Materials zu seinem Volumen. Im Gegensatz zur Schüttdichte werden bei der Rohdichte die Luftzwischenräume dem Volumen der Schüttgüter nicht hinzugerechnet. Stattdessen wird die tatsächliche Materialdichte gemessen.

Bei der Messung der Rohdichte wurde nach der Europäischen Norm DIN EN 15150 [11] vorgegangen. Die Rohdichte wird mithilfe des Prinzips der Wasserverdrängung ermittelt. Dabei wird zunächst die Masse der Teilchen im trockenen Zustand bestimmt. Anschließend werden die Pellets in eine Flüssigkeit getaucht (Wasser mit Tensid) und die Masse wird erneut gemessen. Durch die Verdrängung der Flüssigkeit entsteht ein Auftrieb. Die Masse der Pellets in Flüssigkeit ist somit geringer. Die Rohdichte errechnet sich anschließend aus Formel (6.1):

$$\rho_M = \frac{m_a}{m_a - m_l} \times \rho_l \quad (6.1)$$

Hierbei stellt ρ_M die Dichte einer Gruppe von Pellets in g/cm^3 , m_a die Masse der Probe in Luft in g, m_l die Masse der Probe in Flüssigkeit in g und ρ_l die Dichte der verwendeten Flüssigkeit in g/cm^3 dar.

Die Rohdichte wurde mithilfe eines hierzu konstruierten Messaufbaus auf einer Präzisionswaage (Sartorius MasterPro Waage LA 310S, Sartorius), welche in einer als Windschutz dienenden Kammer untergebracht ist, mit einer Genauigkeit von 0,001 g bestimmt. Dazu wird ein Becherglas mit etwa 200 ml Nennvolumen auf eine Brücke gestellt, welche die Wägetpfanne überspannt. Das Becherglas wird somit nicht mitgewogen. Ein Traggestell für die Pellets wird auf die Wägetpfanne gesetzt. An diesem hängt eine zum Eintauchen der Pellets abnehmbare Waagschale, die in das Becherglas zum Messen der Pelletmasse in Flüssigkeit hineingehängt werden kann. Die Schale kann eine Mindestmenge von vier Pellets gleichzeitig aufnehmen. Der Boden der Schale ist perforiert, um der Flüssigkeit ein Eindringen von unten in die Eintauchschale zu ermöglichen. Zusätzlich ist eine zweite Waageschale am oberen Ende der Aufhängung zum Messen der Pelletmasse in Luft angebracht.

Das Becherglas wird jeweils mit 150 ml Wasser mit geringem Gehalt an Ionen (Trinkwasserqualität) mit einer Temperatur von ca. 22 °C gefüllt. Um eine gleichbleibende Dichte der Flüssigkeit sicherzustellen, werden je Liter Wasser 1,5 g eines Tensids („Triton X-100“) hinzugegeben und mit einem Magnetrührwerk vermischt, bis dieses sich vollständig aufgelöst hat und die Homogenität der Flüssigkeit hergestellt ist. Diese Behandlung erlaubt es, einen Festwert für die Flüssigkeitsdichte von 0,9958 g/cm³ anzunehmen.

Für jede der 42 Pelletproben wurden 10 Messungen à 4 Pellets durchgeführt. Die vier Prüfpellets wurden zuerst in Luft gewogen, anschließend in die Flüssigkeit getaucht und nach fünf Sekunden erneut gewogen. Dabei wurde nach jeder 10. Messung die Flüssigkeit erneuert, um eine Verunreinigung und damit verbundene Fehler zu vermeiden [11]. Neben der Rohdichte wird nach DIN EN 15150 [11] der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Rohdichtebestimmung informativ mit angegeben.

Die Ergebnisse zur Rohdichte der 42 Proben sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Werte der verschiedenen Brennstoffproben lagen im Durchschnitt bei 1,27 g/cm³, der durchschnittliche Wassergehalt zum Zeitpunkt der Messungen bei 5,48 m.-%. Dabei wiesen Probe 8 mit 1,34 g/cm³ und einem Wassergehalt von 5,36 m.-% die höchste und Probe 39 mit 1,17 g/cm³ bei 9,33 m.-% die niedrigste Rohdichte auf (Abbildung 9).

Auch bei der Schwankungsbreite der einzelnen Messergebnisse ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben festzustellen. Während die 10 Werte von Probe 8 in einem Bereich von 1,32 bis 1,35 g/cm³ sehr eng beieinanderliegen, streuen die Ergebnisse von Probe 39 deutlich breiter, und zwar in einem Bereich von 1,10 bis 1,25 g/cm³ (Abbildung 9). Gründe für diese Varianz könnten z. B. in unterschiedlichen Rohmaterialien liegen. Als Ausgangsmaterial für Probe 39 wird lediglich „Tropenholz“ angegeben. Unter diesen Sammelbegriff fallen jedoch verschiedenste Baumarten, die wiederum verschiedene spezifische Rohdichten aufweisen könnten. Auch die Pelletierung kann sich auf die Rohdichte auswirken. Somit könnte im Fall von Probe 39 ein veraltetes Pelletierverfahren angewendet worden sein.

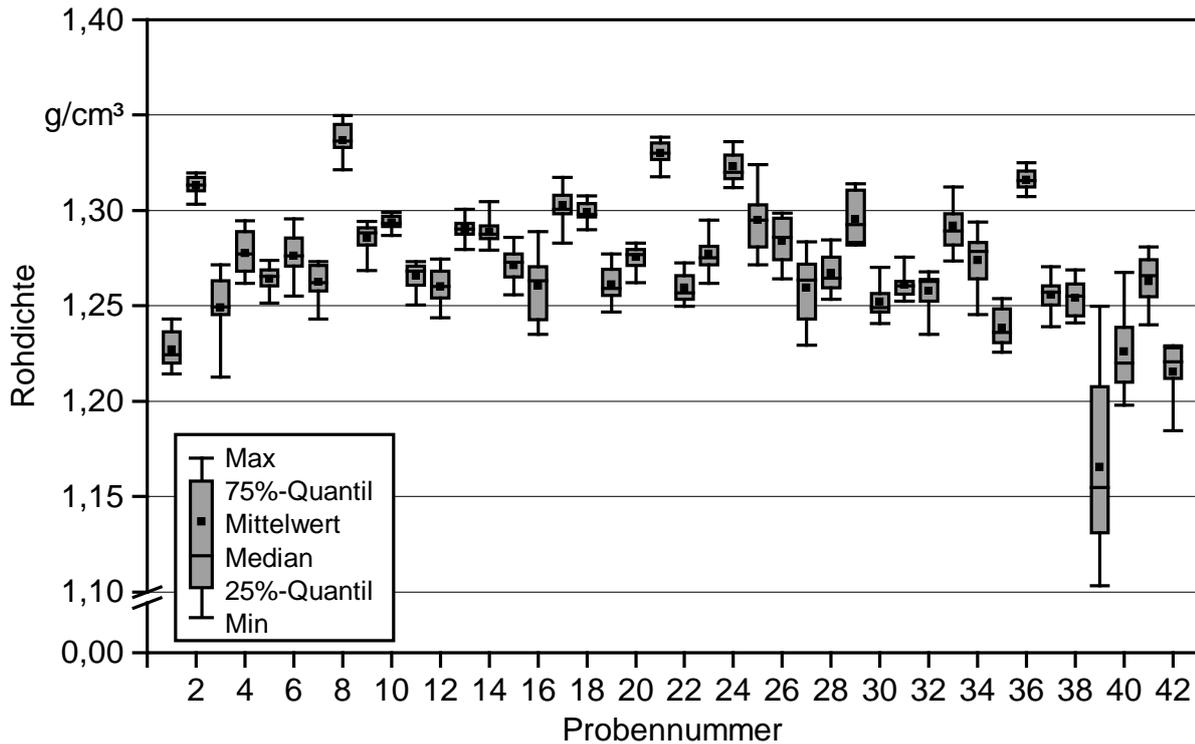


Abbildung 9: Rohdichte (im Anlieferungszustand) der Pelletproben (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Herstellerangaben zur Rohdichte wurden zweimal mit $> 1,2 \text{ g/m}^3$ (Probe 28 und 37) und dreimal mit exakt $1,2 \text{ g/m}^3$ angegeben. Bei den exakten Angaben (Probe 16, 32, 40) lag die Rohdichte mit $> 1,25 \text{ g/cm}^3$ jeweils über dem angegebenen Wert.

6.3 Feinanteil

Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung von Holzpellets ist der Feinanteil F . Der Begriff Feinanteil beschreibt für Holzpellets alle Partikel, die kleiner als 3,15 mm sind [14]. Allgemein nimmt der Feinanteil mit jeder mechanischen Beanspruchung der Pellets zu, wie es beispielsweise beim Einblasen von Pellets in einen Pelletbunker oder auch bereits beim Abfüllen und Transport der Sackware passieren kann. Ein erhöhter Feinanteil kann zur Staubbildung beim Umschlag, zur ungleichmäßigen Verbrennung und zu Verpuffungsreaktionen führen, wodurch sich das Brand- und Explosionsrisiko erhöht [23].

Der Feinanteil wird gemäß DIN EN 15149-1 [12] bestimmt. Zur Versuchsdurchführung wurde hier ein Rundlochsieb mit einer Lochweite von 3,15 mm und einer darunterliegenden Auffangschale verwendet ($\varnothing = 450 \text{ mm}$). Das Sieb wurde mithilfe einer Plansiebmaschine (AS400 control, Retsch GmbH) horizontal bewegt. Vor dem Versuchsbeginn mussten die Leermassen von Auffangschale und Sieb ermittelt werden. Um die Normanforderungen zu erfüllen, waren 4 Liter Probenmaterial auf das Sieb aufzubringen und für

15 Minuten mit der Siebmaschine zu sieben. Um die geforderten 4 Liter an Probenmaterial einzuhalten, wurde unter Zuhilfenahme der jeweiligen Schüttdichte die benötigte Masse berechnet und abgewogen. Als Siebgeschwindigkeit wurden 200 Umdrehungen pro Minute festgelegt. Nach Ablauf der 15 Minuten mussten die Auffangschale mit der Feinfraktion und das Sieb mit den darauf verbliebenen Pellets gewogen werden. Der Feinanteil konnte berechnet werden, indem zuerst die Differenz aus Auffangschale mit Feingut und der leeren Auffangschale gebildet und dieses Zwischenergebnis durch die anfangs auf das Sieb aufgegebene Gesamtmasse dividiert wurde.

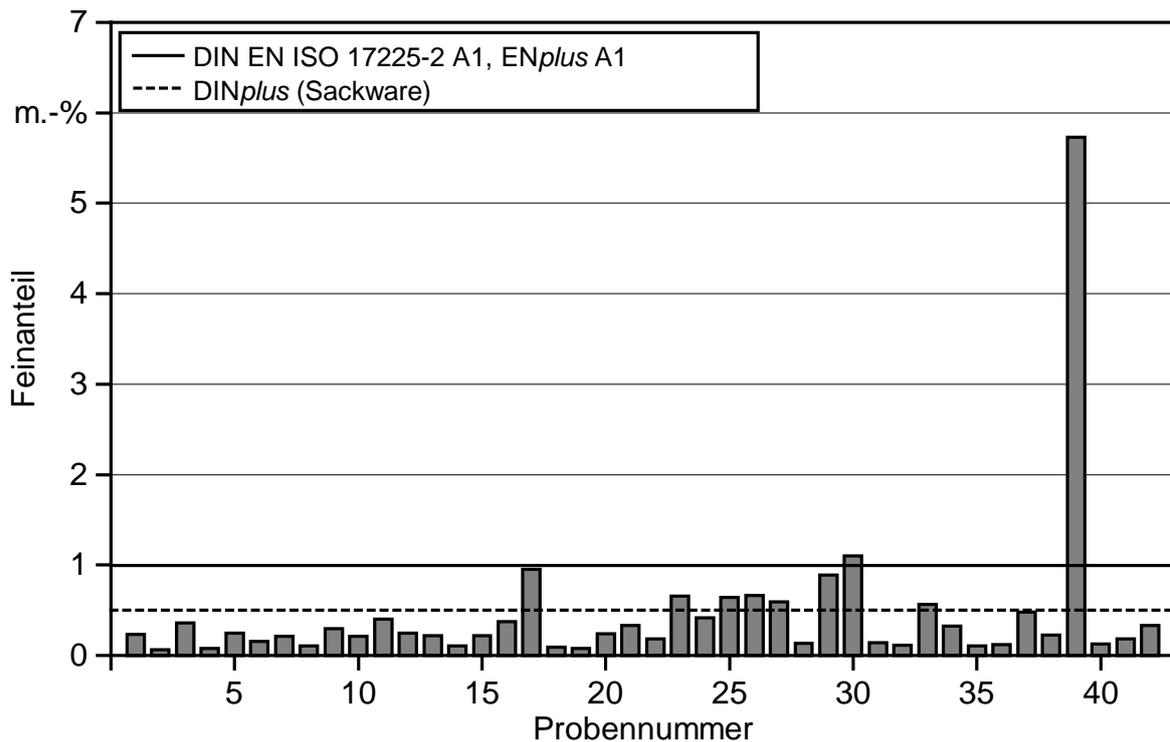


Abbildung 10: Feinanteil der Pelletproben im Anlieferungszustand; durchgehende und gestrichelte schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014 (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die Messergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Darin zeigt sich lediglich ein einzelner Ausreißer bei ansonsten relativ einheitlichen Werten. Bei dem Ausreißer handelt es sich um die Probe 39, die schon bei der Sichtprüfung auffällig war. Mit fast 6 m.-% liegt der Wert deutlich über dem Grenzwert der DIN EN ISO 17225-2 A1 und ENplus A1, der maximal 1 m.-% an Feinanteil erlaubt [14][16]. In der Abbildung ist dieser Grenzwert mit der durchgehenden schwarzen Linie dargestellt. Ebenfalls überschreitet die Probe 30 den Grenzwert. Die restlichen 40 Proben bleiben unter 1 m.-%. Beim Feinanteil existiert jedoch noch ein zweiter Grenzwert, der bei 0,5 m.-% von der DINplus Zertifizierung für Sackware festgelegt wird [17]. Dieser ist in Abbildung 10 als gestrichelte Linie eingezeichnet und kann neben den Proben 30 und 39 auch von den Pellets der Nummern 17, 23, 25, 26, 27, 29 und 33 nicht eingehalten werden. Dies ist jedoch nur bei Nummer 26

als kritisch zu sehen, da diese von den genannten Proben die einzige auch nach *DIN-plus* zertifizierte ist. Der Mittelwert aller untersuchten Holzpelletproben beträgt 0,45 m.-%. Bei Betrachtung der Herstellerangaben auf den Verpackungen kann im Falle des Feinanteils nur eine Falschangabe ausgemacht werden (Probe 12), hier wurde ein Festwert angegeben, der aber vom gemessenen Wert überschritten wird.

Seit dem Jahr 2015 gilt der Grenzwert von 0,5 m.-% ebenso für *ENplus*-Pellets aus Sackware und versiegelten BigBags (siehe Tabelle 9).

6.4 Pelletlänge

Die Partikelgrößenverteilung beeinflusst die Fließ-, Transport- und Lagereigenschaften von Schüttgütern [23]. Überlängen wirken sich dabei stark auf die mechanischen Entnahme-, Förder- und Beschickungssysteme von Konversionsanlagen aus. Dabei kann es durch zu lange Teilchen zu Blockaden an den Förderaggregaten oder zur verminderten Durchsatzleistung kommen [23]. Neben veränderten Fördereigenschaften könnten unterschiedliche Korngrößenverteilungen zu unterschiedlichen Ausformungen des Glutbetts und damit zu unterschiedlichen Emissionsverhalten der Anlagen führen. Die mittlere Pelletlänge bzw. die Hauptfraktion der Partikelgrößenverteilung von Pellets ist im Gegensatz zu Hackschnitzeln (DIN EN ISO 17225-4) aber nicht normativ geregelt. Lediglich der Durchmesser und die maximale Länge werden festgelegt. Langfristig könnte jedoch auch der mittleren Pelletlänge eine höhere Bedeutung zukommen.

Die Länge der Pellets wurde anhand zweier Methoden ermittelt. Zum einen wurde sie händisch mittels Messschieber nach ISO/DIS 17829 bestimmt [15], zum anderen fotooptisch mittels Bildanalyseverfahren gemessen. Die Ergebnisse beider Methoden werden verglichen und die Verfahren auf ihre Genauigkeit hin bewertet.

Zur manuellen Messung der Pelletlänge wurde ein elektronischer Messschieber (Mitutoyo Deutschland GmbH) mit einer Auflösung von 0,01 mm verwendet. Bestimmt wurde sowohl die mittlere als auch die maximale Pelletlänge je Charge. Dabei wurde die Länge der Pellets entlang der Zylinderachse zwischen den Mittelpunkten der konvexen und der konkaven Seite gemessen. Als Probenumfang wird eine Mindestmenge von 40 bis 50 Pellets und damit eine Probenmasse von 40 bis 50 g vorgegeben. Tatsächlich betrug die durchschnittliche Anzahl nach vier Teilungen mit dem Probenteiler 74 Pellets pro Prüfmenge und lag somit über der Mindestanforderung der Prüfnorm.

Neben der mittleren und maximalen Pelletlänge wird nach ISO/DIS 17829 der Massenanteil der Pellets mit Überlänge durch Wiegen auf 0,01 g genau bestimmt [15]. Pellets gelten nach DIN EN ISO 17225-2 als überlang, wenn sie länger als 40 mm sind. Hierbei darf der Anteil an Pellets mit einer Länge von 40 bis 45 mm maximal 1 m.-% der Gesamtmasse betragen [14].

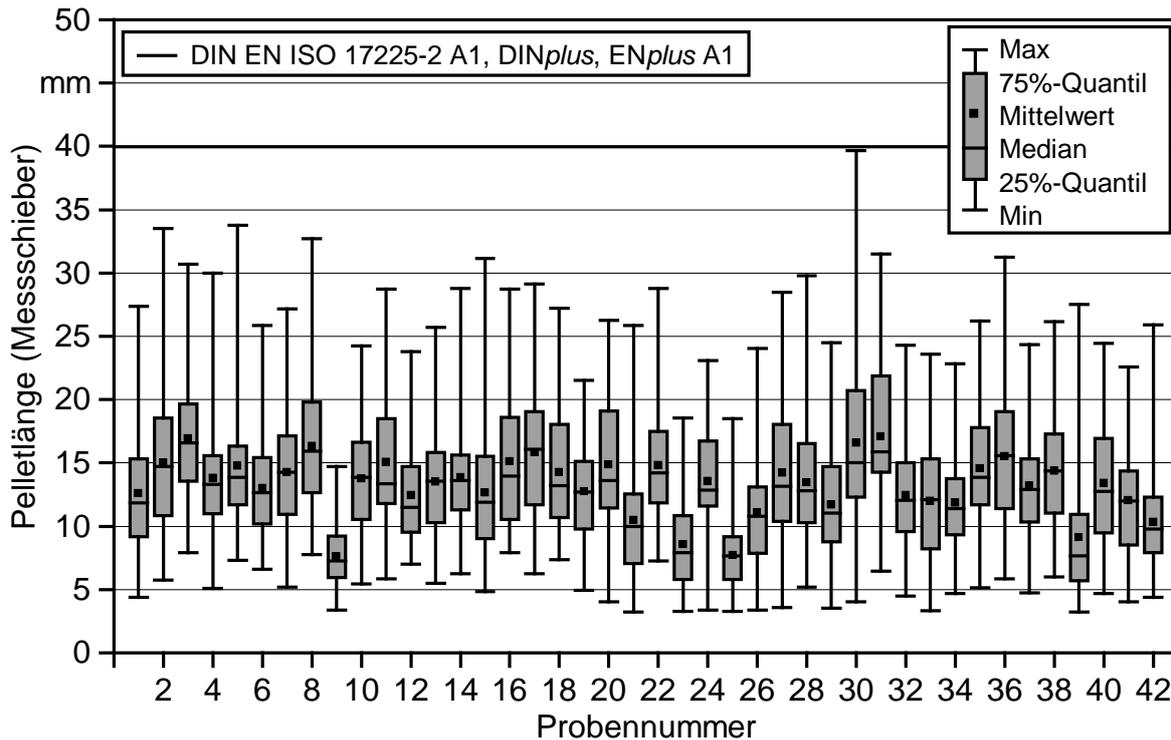


Abbildung 11: Pelletlängenverteilung, gemessen mit Messschieber; durchgehende schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die mittels Messschieber gemessene mittlere Pelletlänge lag durchschnittlich bei 13,3 mm. Die 42 Proben wiesen dabei zum Teil deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Schwankungsbreite auf (Abbildung 11). Mit 7,6 mm hatte Probe 9 die kürzesten Pellets, wohingegen Probe 31 mit 17,1 mm die im Mittel längsten Pellets beinhaltete. Absolut betrachtet lag das kürzeste Pellet bei 3,2 mm (aus Probe 21), das längste bei 39,7 mm (aus Probe 30). Überlängen wurden demnach weder im Bereich von 40 bis 45 mm, in welchem gemäß DIN EN ISO 17225-2 noch 1 m.-% toleriert worden wäre, noch im Bereich größer 45 mm festgestellt [14].

Sieben Proben (Nr. 7, 12, 14, 19, 23, 31, 38) machten Angaben bezüglich der mittleren oder maximalen Länge. Dabei wurde sechsmal eine Obergrenze angegeben, die je nach Hersteller zwischen 30 und 45 mm lag. Daneben fanden sich auch Angaben zum Mittelwert (Probe 7: 24 mm, Probe 38: 20 mm). Angaben zur maximalen Länge waren dabei i. d. R. zutreffend, die Mittelwerte dagegen nicht.

Neben der Längenermittlung mit dem Messschieber wurde die Pelletlänge derselben Proben durch ein Bildanalyseverfahren (Haver CPA 4 Conveyor, Haver & Boecker) bestimmt (Abbildung 12, [21]). Beim Bildanalyseverfahren wurde für jede Pelletprobe dieselbe Teilprobe wie bei der manuellen Längenmessung verwendet. Die Einzelpartikel werden dabei mittels einer Vibrorinne (langsamer Transport) und eines Förderbands (schneller Transport) räumlich voneinander aufgetrennt (siehe Abbildung 12). Danach

passiert jedes individuelle Partikel eine Lichtquelle, die gegenüber einer digitalen CCD-Kamera angebracht ist. Über die gleichmäßige Fallgeschwindigkeit des Einzelteilchens, das das Sichtfeld der Zeilenkamera passiert, wird dessen zweidimensionale Silhouette online errechnet (Abbildung 12). Die Kamera misst dabei kontinuierlich 4096 Pixel über eine Breite von 382 mm. Die Auflösung pro Pixel beträgt $98 \times 98 \mu\text{m}$. Aus der Silhouette berechnet die Analysesoftware online für jedes Partikel eine Reihe von Größen- und Formparametern. Neben allgemeinen Messgrößen wie der Partikelanzahl werden die in Abbildung 13 abgebildeten Längen-, Breiten-, und Verhältnisparameter bestimmt.

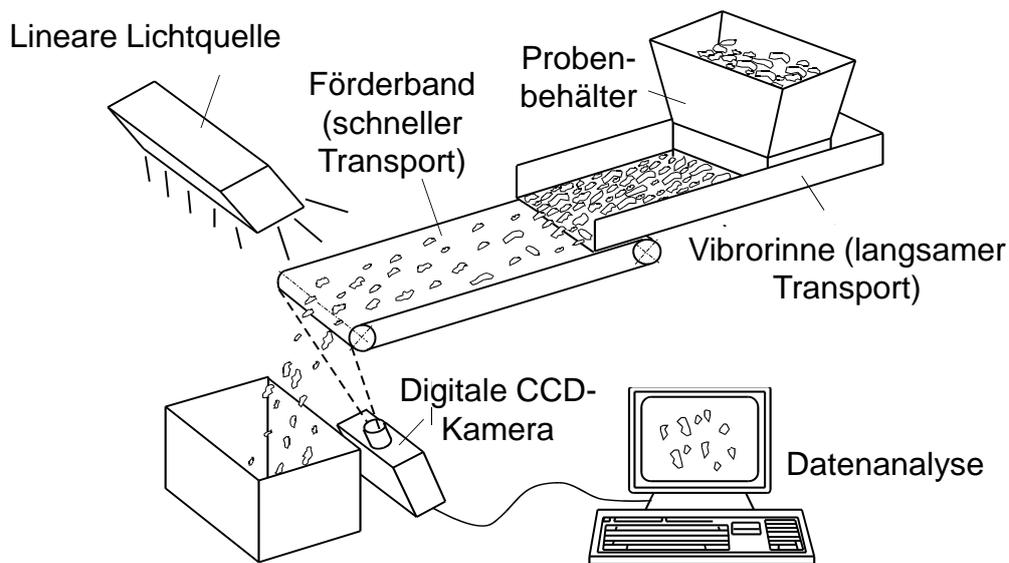


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des verwendeten Bildanalysegeräts

Für den Vergleich zu der mittels Messschieber ermittelten Länge werden die Bildanalyseparameter „Länge“ und „maximale Länge“ (Nr. 7 und Nr. 4 in Abbildung 13) verwendet. Die „Länge“ ist als diejenige Partikelabmessung definiert, welche orthogonal zum sogenannten „minimalen Feret“-Durchmesser anliegt [21][26]. Dieser wiederum beschreibt den minimalen Abstand zweier den Umfang des Partikels berührenden parallelen Tangenten und kommt somit dem tatsächlichen Pelletdurchmesser am nächsten. Der Parameter „Länge“ steht somit im 90° -Winkel zum „minimalen Feret“. Der Bildanalyseparameter „maximale Länge“ wird durch Betrachtung aller möglichen Verbindungen zwischen Randpixeln der Projektionsfläche ermittelt. Sowohl „Länge“, als auch „Maximale Länge“ sind messrichtungsunabhängig.

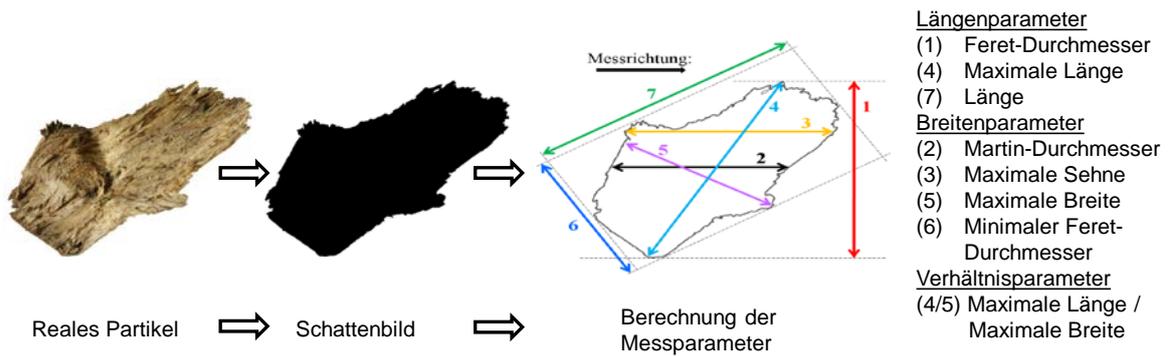


Abbildung 13: Messgrößen der Bildanalyse am Beispiel eines Hackschnitzels

Bei der Bildanalyse ergaben sich geringfügige Unterschiede im Vergleich zu den mittels Messschieber gemessenen Daten. Prinzipiell lagen die Ergebnisse der Bildanalyse dabei stets höher als die Ergebnisse des Messschiebers (Abbildung 14). Der Mittelwert des Parameters „Länge“ aller Proben liegt z. B. bei 13,92 mm und somit um 0,67 mm höher als der mit dem Messschieber ermittelte Wert, der Parameter „Maximale Länge“ sogar noch darüber.

Beim Bildanalyseparameter „Maximale Länge“ wird die Pelletlänge im Gegensatz zur Handmessung richtungsunabhängig gemessen, weshalb sie auch diagonal zur Zylinderachse der Pellets liegen und somit länger sein kann. Der Parameter „Maximale Länge“ ist daher für Partikel mit unterschiedlicher Ausformung, wie Hackschnitzel, besser geeignet als für Pellets. Auch der Parameter „Länge“ zeigt durchweg größere Werte als die manuelle Messung. Ob die Bildanalyse die tatsächliche Pelletlänge überschätzt oder ob die Pellets bei der Messung mit dem Messschieber leicht gequetscht und damit unterschätzt werden, lässt sich aus den Ergebnissen nicht direkt ableiten. Probemessungen am TFZ mit rechteckigen Metallplättchen unterschiedlicher Größe ergaben jedoch ebenfalls minimal größere Messwerte des Bildanalyseverfahrens zum Messschieber. Da eine Quetschung dieser Partikel nur schwierig möglich ist, muss die Messschiebermessung als etwas genauer angesehen werden. Eventuell kommt es beim Passieren der Lichtquelle bei der Bildanalyse durch die Fallbewegung der Partikel zu einer minimal erhöhten Verweildauer vor der Kamera, was diesen Effekt erklären könnte. Mit durchschnittlichen Abweichungen von 0,6 mm sind die Unterschiede allerdings als sehr gering einzustufen.

Zudem bietet die Bildanalyse den Vorteil, deutlich größere Probenmengen bei geringem Zeitaufwand messen zu können und somit Fehler bei der repräsentativen Probenahme zu minimieren. Zur Qualitätssicherung in Pelletwerken könnte die Bildanalyse daher ein geeignetes Verfahren sein, um den Produktionsprozess online überprüfen zu können, v. a. falls der mittleren Pelletlänge zukünftig mehr Bedeutung zukommen sollte.

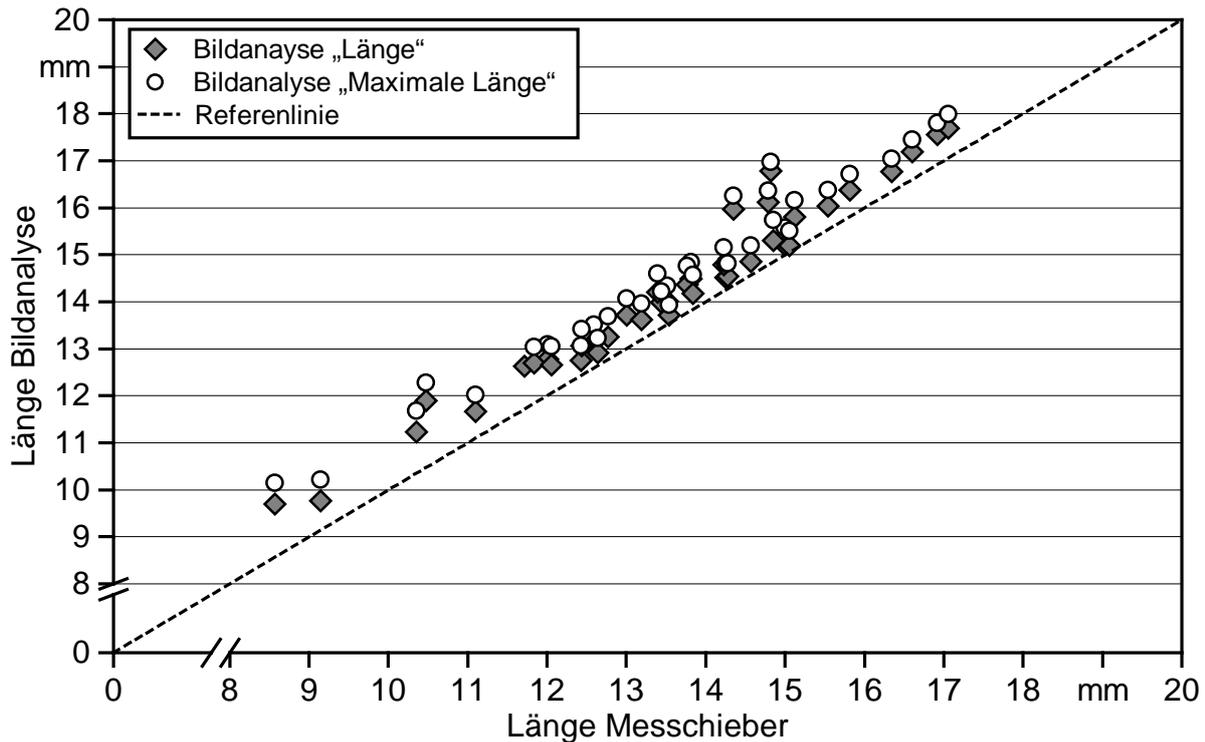


Abbildung 14: Vergleich der Längenmessung mittels Messschieber mit den Werten des Bildanalyseverfahrens

Neben unterschiedlichen Längenparametern lässt sich mit dem Bildanalyseverfahren auch die Partikelform charakterisieren. Diese Messungen kamen in der hier vorliegenden Arbeit jedoch nicht zum Einsatz.

Mit der technisch inzwischen ausgereiften Bildanalysetechnik liegen am TFZ umfangreiche Erfahrungen und Vergleichsmessungen vor. Es ist denkbar, dass das Bildanalyseverfahren die konventionelle Längenmessung langfristig aufgrund seiner detaillierteren Messung ablösen oder ergänzen wird. Aufgrund der Vielzahl an Bildanalysegeräten (ISO 13322-2 [22]) wurde am TFZ ein Vorschlag für eine Norm-Kalibriervorschrift für die Überprüfung beliebiger Geräte für den Einsatz mit Biomasse-Festbrennstoffen erarbeitet. Der entsprechende Normentwurf wurde dem ISO TC 238 („Solid Biofuels“) bereits übermittelt.

6.5 Pelletdurchmesser

Zusätzlich zur Pelletlänge wurde untersucht, inwieweit die Holzpellets die vorgeschriebenen Daten hinsichtlich des Durchmessers einhalten [14][16][17]. Hierzu wurde, wie in der ISO/DIS 17829 [15] für die Pelletlängenmessung beschrieben, eine Teilprobe von etwa 50 g genommen. Aus dieser Probe war eine Anzahl von mindestens zehn Pellets zufällig per Hand zu entnehmen. Von den ausgewählten Holzpellets wurde mithilfe einer elektronischen Schieblehre (Mitutoyo Deutschland GmbH) der Durchmesser bestimmt

und aus diesen Einzelwerten der Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert wurde in der Folge mit dem vorgeschriebenen Durchmesser, der bei 6 ± 1 bzw. 8 ± 1 mm liegt, verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass alle 42 untersuchten Pelletproben die Grenzwerte einhalten.

6.6 Mechanische Festigkeit

Die mechanische Festigkeit *DU* („durability“) ist ein Wert, der die Stabilität der Holzpellets beschreibt. Sie ist von Bedeutung, da die Pellets bei Transportprozessen einer mechanischen Belastung ausgesetzt sind. Durch diese Beanspruchung können sich Partikel von den Pellets ablösen, die dann den Feingutanteil erhöhen. Dieser wiederum führt, etwa bei der pneumatischen Einbringung des Brennstoffs in das Lager des Endverbrauchers, zu einer Staubentwicklung, die die allgemeine Staubbelastung erhöht und unter Umständen auch zu einer Explosionsreaktion führen kann. Aus diesen Gründen wird bei den Holzpellets eine möglichst hohe mechanische Festigkeit angestrebt [23].

In der europäischen Norm DIN EN 15210-1 [13] ist geregelt, wie die Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts zu erfolgen hat. Essenzieller Bestandteil der Bestimmung ist das für die Messung der Abriebfestigkeit von Pellets konstruierte Prüfgerät, der Abriebtester. Das Gerät besteht aus einem Kasten aus Metallblech mit definierten Seitenlängen und einem Prallblech im Inneren gemäß DIN EN 15210-2. Dieser Kasten wird für einen Testdurchgang von einem Motor mit zugehöriger Steuerungseinheit mit 50 Umdrehungen pro Minute insgesamt 500 Mal (d. h. über 10 Minuten) um seine eigene Achse gedreht. In den Kasten wurden 500 g Pellets als Versuchsprobe eingebracht. Diese Pellets waren vor Versuchsstart per Hand mit einem Rundlochsieb mit Lochweite 3,15 mm zu sieben, um den bereits enthaltenen Feinanteil zu entfernen. Nach Ende der Versuchslaufzeit wurde der Inhalt des Prüfkastens abermals gesiebt, um das durch die mechanische Beanspruchung entstandene Feingut abzutrennen. Die auf dem Sieb verbliebene Grobfraction wurde gewogen. Die mechanische Festigkeit im Anlieferungszustand in Prozent konnte im Anschluss berechnet werden, indem die Masse aller Pellets, die nach Behandlung im Prüfgerät und anschließender Siebung übrig geblieben waren, durch die anfangs in das Prüfgerät eingebrachte Gesamtmasse dividiert wurde. Für jede Pelletprobe wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Aus den beiden erhaltenen Ergebniswerten wurde der Mittelwert gebildet.

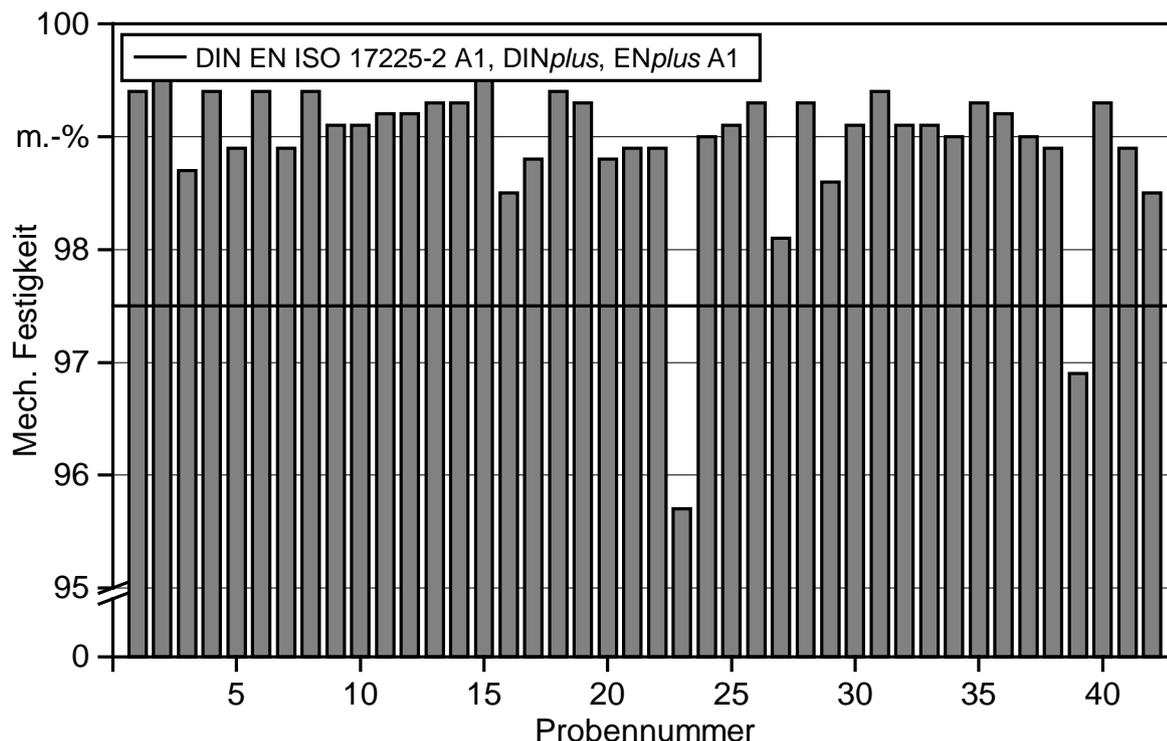


Abbildung 15: Mechanische Festigkeit (DU) der Pelletproben im Anlieferungszustand; schwarze Linie: Mindestanforderung der einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014 (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die Ergebnisse zur Abriebfestigkeit sind in Abbildung 15 dargestellt. Bei der mechanischen Festigkeit ist nach DIN EN ISO 17225-2 und gemäß den Zertifizierungen *ENplus* und *DINplus* ein Mindestwert von 97,5 m.-% zu überschreiten [14][16][17]. In Abbildung 15 ist dieser Grenzwert durch die schwarze Linie gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass die Proben 23 und 39 die Mindestanforderung unterschreiten. Alle anderen Pelletproben weisen bei einem Mittelwert von 99,0 m.-% fast durchweg gute Werte bei der mechanischen Festigkeit auf, ein Großteil sogar über 99 m.-%. Unter den aufgedruckten Herstellerangaben wurden auch hier fehlerhafte festgestellt. Bei Nummer 12 und Nummer 38 wird ein Festwert angegeben, der tatsächliche Wert liegt darüber. Bei der Probe 23 mit nur 95,7 m.-% Abriebfestigkeit ist auf der Verpackung ein Wert von mindestens 97,5 m.-% zu lesen.

Seit dem Jahr 2015 gilt für die mechanische Festigkeit von *ENplus*-Pellets der Grenzwert von 98 m.-% (Tabelle 9). Auch dieser Wert wäre mit Ausnahme der Proben 23 und 39 von allen Proben eingehalten worden.

6.7 Pellethärte

Neben der mechanischen Festigkeit beschreibt die Härte die Stabilität der Pellets. Sie wird definiert als die benötigte Kraft (in Newton), um ein Pellet zum Zerschlagen zu bringen.

gen. Da es sich bei der Pellethärte um kein genormtes Prüfverfahren handelt, gibt es hierzu bisher noch keine publizierten Ergebnisse. Es ist jedoch anzunehmen, dass die mechanische Festigkeit von härteren Pellets aufgrund einer stabileren Pelletstruktur größer ist und damit gleichzeitig der Abrieb und der Feinanteil geringer sind.

Die Härte der Pellets wurde mit einem manuellen Pressling-Härteprüfer (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) ermittelt. Das Gerät besteht aus zwei Schrauben, einem Hammer, einem Amboss und einem Zylinder, in dem sich eine Feder befindet und auf dem eine Skala zum Ablesen der Messergebnisse vorhanden ist (Abbildung 16).

Zur Messung der Härte wird ein Pellet in das Prüfgerät zwischen Amboss und Kolbenspitze eingespannt. Über eine Druckschraube und eine 3,5 mm starke Feder wird manuell der Druck auf das Pellet beständig erhöht, bis das Pellet zerspringt. Die auf das Pellet wirkende Masse wird auf einer Skala von 0 bis 100 kg abgelesen. Ein maximal möglicher Druck ist jedoch bereits bei 70 kg erreicht, da hier die Feder vollständig komprimiert ist. Die Masseangaben wurden anschließend in die tatsächlich auf das Pellet ausgeübte Kraft (in Newton) umgerechnet, hierfür wurde Formel (6.2) verwendet:

$$K = D \times s \quad (6.2)$$

Dabei ist K die ausgeübte Kraft in N, D die Federkonstante (22,727 N/mm) und s die Verkürzung der Feder in mm. Im gegebenen Fall entspricht 1 kg Masse einer Federverkürzung von 0,44 mm. Bei einer Federkonstante von 22,727 N/mm ergibt sich so ein Umrechnungsfaktor von 10,0 N/kg.

Ähnlich der Längenermittlung mittels Bildanalyseverfahrens handelt es sich bei der Härtebestimmung um kein genormtes Prüfverfahren. Somit existieren auch keine Informationen zum benötigten Stichprobenumfang. Beim Bildanalyseverfahren konnte auf dieselbe Pelletprobe wie bei der mechanischen Längenmessung zurückgegriffen werden. Für die Härtebestimmung musste dagegen der notwendige Stichprobenumfang zunächst ermittelt werden. Hierzu wurde im Anschluss an erste Vorversuche folgende Formel (6.3) [20] verwendet:

$$n \geq \frac{\lambda_{0,95}^2}{\delta^2} \times \frac{\sigma^2}{\bar{x}^2} \quad (6.3)$$

Dabei ist n der Stichprobenumfang, λ die beidseitige Grenze der Standardnormalverteilung ($\alpha = 5\%$: 1,96), δ die geforderte Genauigkeit, σ die Standardabweichung und \bar{x} der Mittelwert der vorangegangenen Messungen. Auf diese Weise wurde ein notwendiger Stichprobenumfang von 5 Pellets je Probe ermittelt.

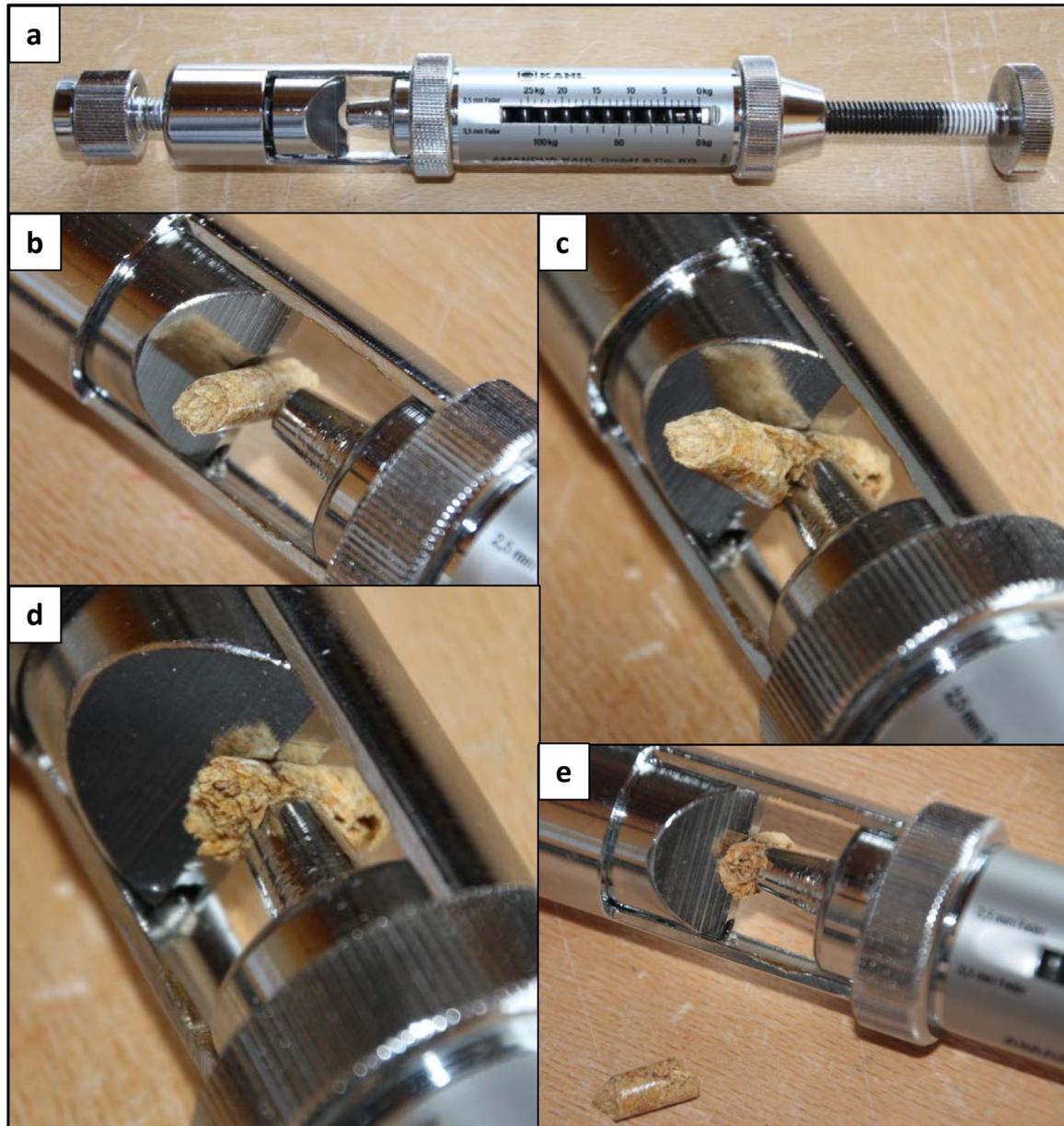


Abbildung 16: Härteermittlung mittels Pressling-Härteprüfer (a = Pressling-Härteprüfer; b = eingespanntes Pellet; c = erste Risse am Pellet; d = zersprungenes Pellet; e = abgebrochenes Teilstück)

Für jede der 42 Pelletproben wurden fünf Pellets zufällig per Hand ausgewählt und deren Härte ermittelt. Für Mittelwertberechnungen wurde bei Pellets, welche bei 70 kg (Messgrenze) nicht zersprangen, der Wert 71 kg bzw. 710 N als schlechtester möglicher Fall definiert, da eine weitere Kraftaufwendung nicht mehr möglich war, das Pellet aber theoretisch bei 710 N zerspringen könnte.

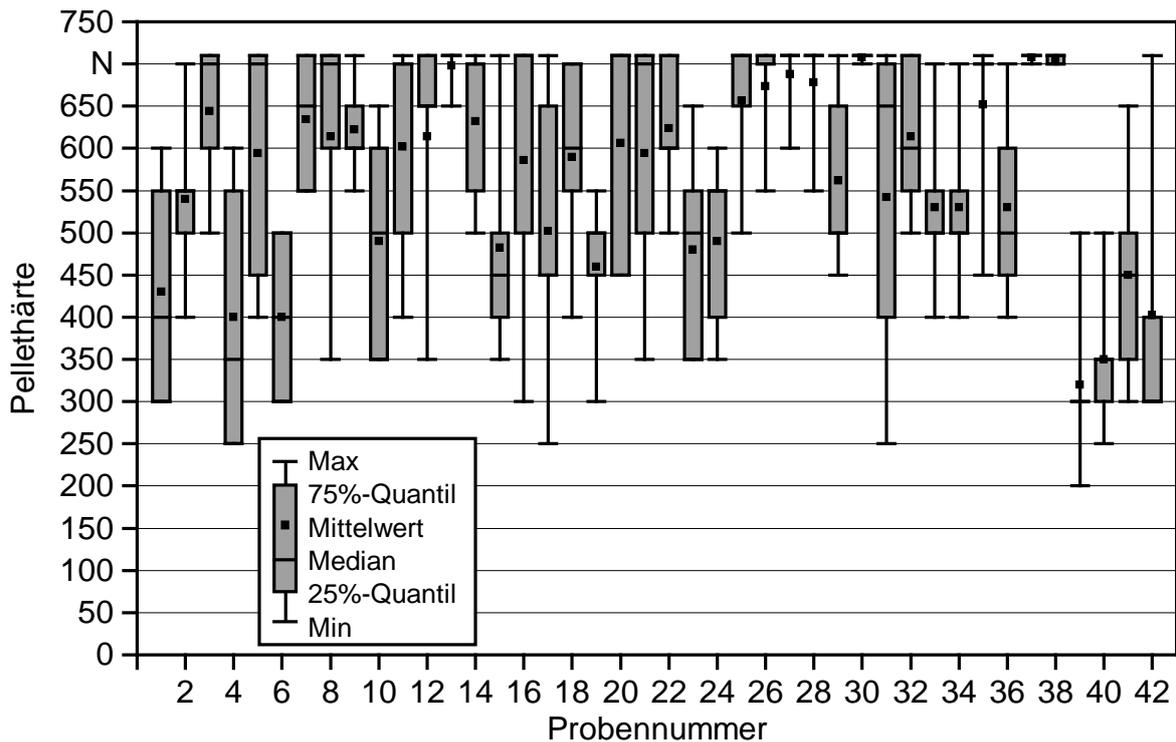


Abbildung 17: Mittlere Pellethärte (in N); Obergrenze des Messgeräts bei 700 N (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Der Mittelwert aller Messungen lag bei 560 N (Abbildung 17). Ein tatsächliches Maximum konnte aufgrund der oberen Messgrenze von 700 N nicht ermittelt werden. Die minimale Pellethärte war mit 200 N in Probe 39 zu finden. Besonders ins Auge fielen bei der Ermittlung der Härte die Proben 30, 37 und 38, die durch Definition der Obergrenze von 710 N durchschnittliche Härten über 700 N aufwiesen. Die Proben 39 und 40 wiesen mit 320 und 350 N die geringsten Härten auf.

Insgesamt muss die Bestimmung der Härte als sehr ungenau bewertet werden. Die Messergebnisse konnten maximal in 5-kg-Intervallen abgelesen werden. Ein exakteres Ablesen war dagegen objektiv nicht möglich. Weiterhin wird für die Methode nicht genau definiert, ob bereits das einfache Aufreißen des Pellets, das Reißen und Abbröseln einzelner Teilstücke oder erst das explosionsartige Bersten des Pellets als „Zerspringen“ gilt. Bei der oberen Messgrenze von 70 kg zeigten 28 % der 210 gemessenen Probenpellets zwar Quetschungen und Risse, waren aber noch nicht zerfallen. Ob für die Pellethärte langfristig ein internationaler Standard entwickelt wird, bleibt demnach offen.

7 Inhaltsstoffliche Zusammensetzung

Zur weiteren Charakterisierung der Holzpellets wurden die gemahlene Proben zur inhaltsstofflichen Analyse an die Firma EUROFINS Umwelt Ost GmbH in Freiberg verschickt. Im Folgenden werden die Laborergebnisse dargestellt und diskutiert. In einigen Fällen wurde die Nachweisgrenze für einige Komponenten unterschritten, weshalb kein genauer Wert angegeben werden kann. In diesen Fällen wird bei der Berechnung des Mittelwerts über alle Proben der Wert der Nachweisgrenze verwendet, d. h., es wurde vom ungünstigsten Fall ausgegangen.

7.1 Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff

Biogene Festbrennstoffe bestehen zum Großteil aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Die bei der Verbrennung frei werdende Energiemenge wird hauptsächlich durch die Oxidation des Kohlenstoffs bereitgestellt. Auch die Oxidation des Wasserstoffs liefert Energie. Der im Brennstoff gebundene Sauerstoff unterstützt den Oxidationsprozess [19]. Der Anteil von Kohlenstoff beträgt bei den untersuchten Proben durchschnittlich 50,8 m.-%, der Sauerstoffgehalt beträgt im Durchschnitt 43,0 m.-% und der Wasserstoffgehalt liegt bei durchschnittlich 6,1 m.-%. Die Einzelwerte aller drei Elemente sind in Abbildung 18 dargestellt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse (Abbildung 18) fällt auf, dass die Werte der untersuchten Holzpellets nahezu exakt mit denen aus der Literatur übereinstimmen. Die Werte für Wasserstoff liegen alle in dem in der Literatur angegebenen Intervall. Auch bei Sauerstoff gibt es keine Abweichungen von den Literaturwerten. Lediglich die Kohlenstoffanteile liegen teilweise leicht oberhalb von den für Holz üblichen Werten von 47 bis 50 m.-%. Der Minimalwert liegt bei 49,7 und der Maximalwert bei 51,5 m.-%.

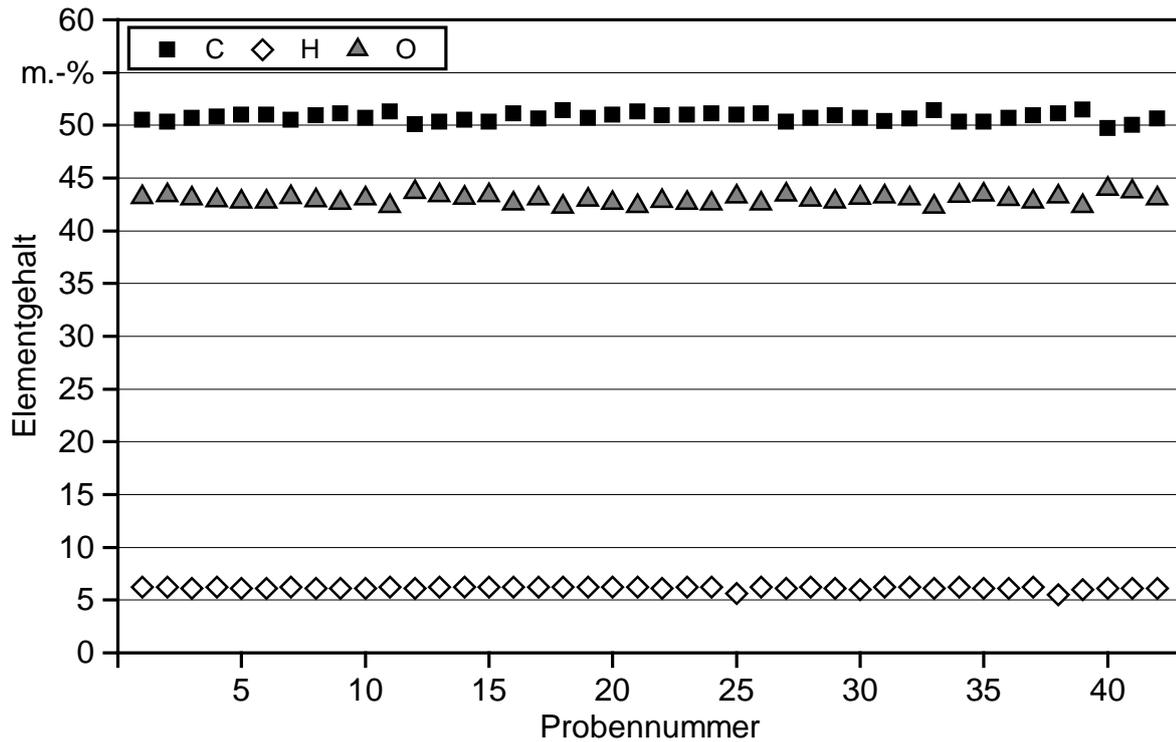


Abbildung 18: Gehalte an Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) der Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

7.2 Stickstoff

Der Stickstoffgehalt in naturbelassenem Holz ist mit etwa 0,1 bis 0,6 m.-% im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen, wie etwa Getreideganzpflanzen, relativ gering. Lediglich in der Rinde findet sich ein höherer Anteil an Stickstoff. Aus diesem Grund kann der N-Gehalt bei Holz aus Kurzumtriebsplantagen höher liegen, da diese Hölzer wegen ihres geringeren Stammdurchmessers einen höheren Rindenanteil besitzen. Zudem stammen diese Brennstoffe häufig von ehemals gedüngten Flächen. Der im Brennstoff enthaltene Stickstoff wird während der Verbrennung oxidiert und geht nahezu komplett in die Gasphase über. Dabei entstehen überwiegend elementarer Stickstoff (N_2) und zu einem geringen Anteil auch Stickstoffoxid (NO_x), das in die Atmosphäre freigesetzt wird. Damit übt der Stickstoffgehalt im Brennstoff einen direkten Einfluss auf die Stickoxidbildung während der Verbrennung aus [23].

Die ermittelten Stickstoffgehalte sind in Abbildung 19 veranschaulicht, wobei auch der Grenzwert von 0,3 m.-%, den DIN EN ISO 17225-2, ENplus A1 und DINplus vorschreiben, eingezeichnet ist [14][16][17].

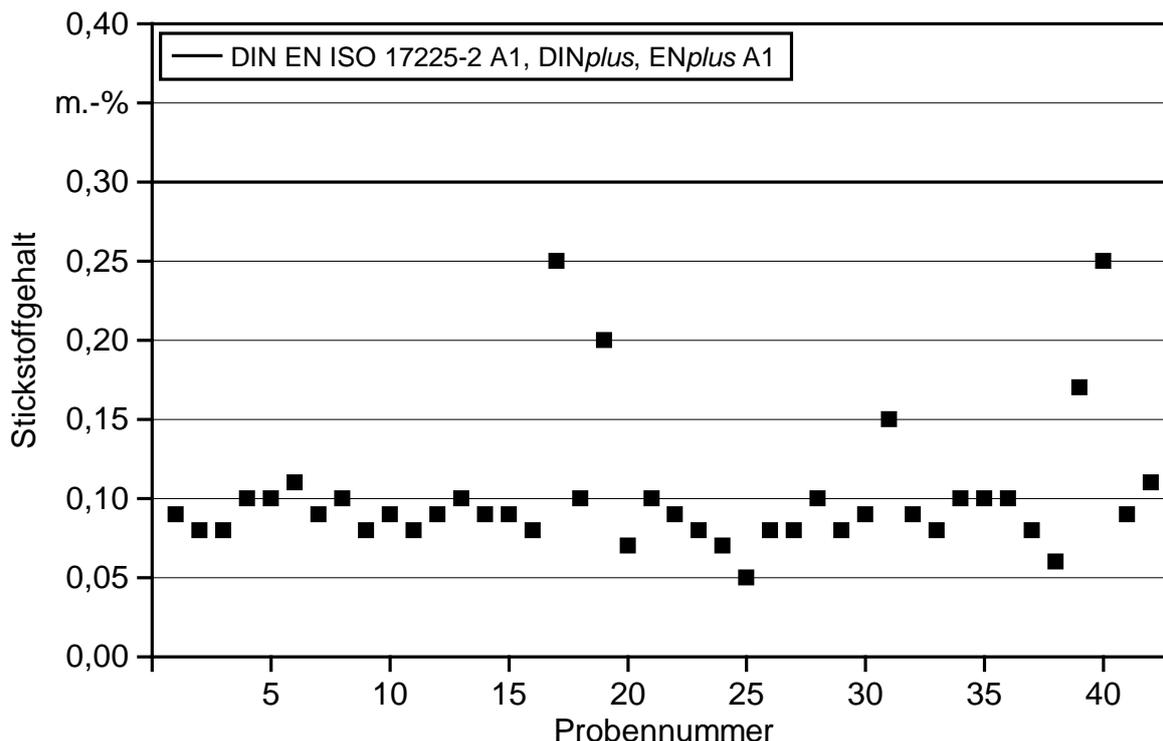


Abbildung 19: Gehalt an Stickstoff (N) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen, Nachweisgrenze bei 0,05 m.-% (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Alle untersuchten Holzpellets erfüllen die Anforderung der Norm und der Zertifikate. Probe 25 unterschreitet die Nachweisgrenze von 0,05 m.-%. Eventuell sind die etwas hervorgehobenen Werte der Proben 17, 19, 31, 39 und 40 auf einen höheren Rindenanteil in den Holzpellets zurückzuführen.

7.3 Schwefel

Der Schwefelgehalt in Biomasse ist gering. Bei der Verbrennung wird der im Brennstoff enthaltene Schwefel unter Bildung von SO₂, SO₃ und Alkalisulfaten überwiegend gasförmig freigesetzt. Der Schwefelgehalt eines Holzbrennstoffs wirkt sich somit direkt auf die Emission von Schwefeldioxid aus. Zudem zählt Schwefel zu den aerosolbildenden Elementen. Durch die Bildung von Schwefeldioxid während der Verbrennung kann es außerdem zu Korrosion kommen [23].

Bei den gemessenen Schwefelkonzentrationen (Abbildung 20) unterschreiten 23 Proben die Nachweisgrenze von 0,005 m.-%.

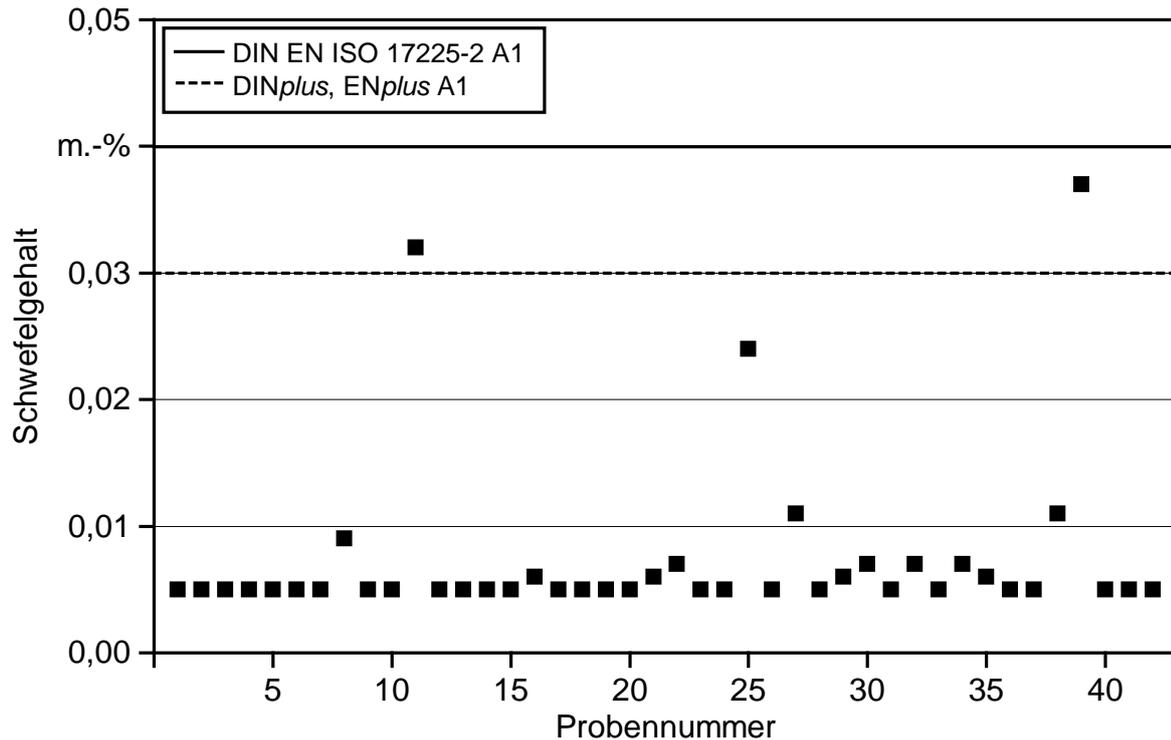


Abbildung 20: Gehalt an Schwefel (S) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgezogene und gestrichelte schwarze Linie: Grenzwerte der einschlägigen Normen und Zertifizierungen im Jahr 2014, Nachweisgrenze bei 0,005 m.-% (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die Proben 10 und 39 überschreiten den nach den beiden Zertifizierungen vorgeschriebenen Grenzwert von 0,03 m.-% [16][17]. Den in der DIN EN ISO 17225-2 vorgeschriebenen Höchstwert von 0,04 m.-% können jedoch alle Proben erfüllen [14]. Im Mittel ergibt sich ein Schwefelgehalt von 0,0075 m.-%.

Die Pellets der Nummer 39, die den höchsten Wert aufweisen, sind aus Tropenholz hergestellt. Da der Anteil von Schwefel im Holz stark von der makromolekularen Zusammensetzung des Holzes abhängt [23], könnte diese spezielle Herkunft den hohen Schwefelgehalt erklären. Aufgrund der bereits erwähnten korrosionsfördernden Wirkung von Schwefel sollten die Grenzwerte in Feuerungsanlagen eingesetzter Holzpellets eingehalten werden.

Seit dem Jahr 2015 gilt auch für DINplus und ENplus ein Grenzwert von 0,04 m.-% (Tabelle 9). Somit hätten alle Pellets den Grenzwert für Schwefel eingehalten.

7.4 Kalium und Chlor

Kalium (K) kommt in holzartiger Biomasse meist mit einem Anteil von unter 0,35 m.-% der Trockenmasse vor. Dieser Wert ist im Vergleich zu Feldkulturen relativ niedrig, da im

Wald keine Düngung vorgenommen wird. Kalium verringert den Ascheschmelzpunkt, was zu Verschlackungen im Brennraum einer Holzpelletfeuerung führen kann [33]. Außerdem zählt es zu den Aerosolbildnern und führt daher zu erhöhten Feinstaubgehalten im Abgas.

Chlor (Cl) ist in naturbelassenen Holzbrennstoffen ebenfalls lediglich in geringeren Konzentrationen enthalten. Es ist an der Bildung von Chlorwasserstoff und Dioxinen und Furanen beteiligt und kann an Elementen der Feuerung, mit denen es in Berührung kommt, Korrosion verursachen [23].

Die Analyseergebnisse für die Gehalte von Kalium und Chlor sind in Abbildung 21 dargestellt. Dabei liegt die Nachweisgrenze beim Chlorgehalt bei 50 mg/kg. Die zusätzlich eingezeichnete Linie steht für den laut DIN EN ISO 17225-2, DINplus und ENplus A1 maximal zulässigen Massenanteil von Chlor in Höhe von 200 mg/kg [14][17][16]. Für Kalium wurde kein Grenzwert in den vorliegenden Normen festgelegt.

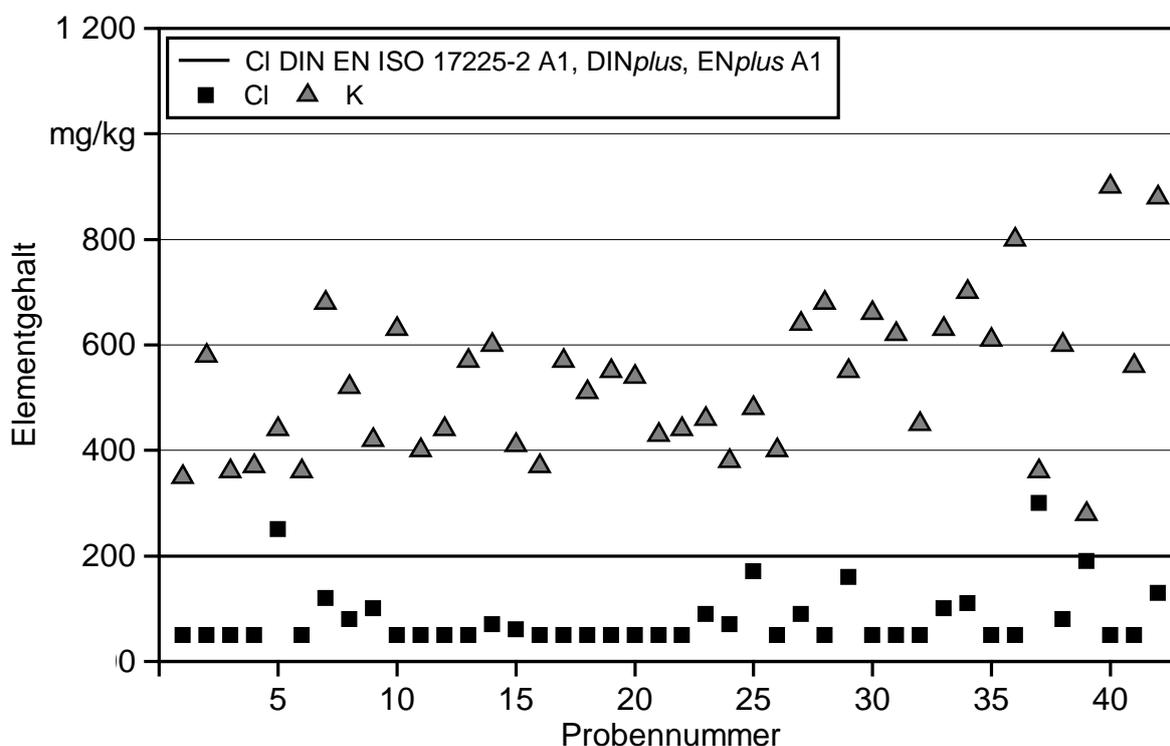


Abbildung 21: Gehalte an Chlor (Cl) und Kalium (K) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende schwarze Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen für den Chlorgehalt, Nachweisgrenze des Chlorgehalts liegt bei 50 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die Proben 5 und 37 überschreiten den Grenzwert für Chlor. Bei beiden Produkten handelt es sich laut Herstellerangaben um reine Holzpellets. Insgesamt ergibt sich ein durchschnittlicher Chlorgehalt von 81 mg/kg. Für Kalium existieren in den Normen keine Unter- oder Obergrenzen. Die Kaliumgehalte liegen zwischen 280 mg/kg (Probe 39) und

900 mg/kg (Probe 40). Im Durchschnitt liegt der Kaliumgehalt bei 528 mg/kg. Da Kalium während der Verbrennung zur Feinstaubbildung beiträgt, ist ein geringer Kaliumgehalt vorteilhaft. Somit hat der Kaliumgehalt im Brennstoff einen direkten Einfluss auf die Staubemissionen während der Typenprüfungen oder bei wiederkehrenden Schornsteinfegermessungen.

7.5 Kalzium und Magnesium

Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) sind neben Kalium die häufigsten Elemente in den Verbrennungsrückständen von Holz [28]. Beide Elemente wirken sich auf das Ascheschmelzverhalten aus [1][33]. Abbildung 22 zeigt die Gehalte an Kalzium und Magnesium. Beide Stoffe sind in Bezug auf ihren Gehalt nicht reglementiert.

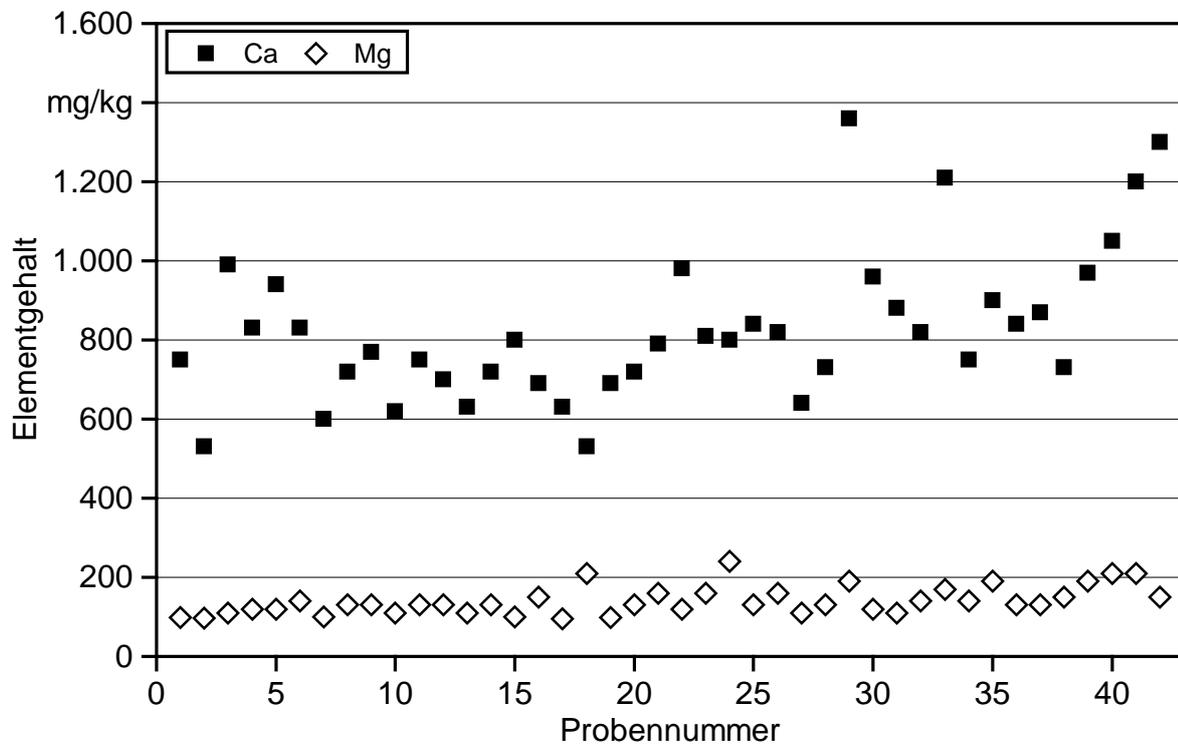


Abbildung 22: Gehalte an Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die Kalziumgehalte bewegen sich zwischen 530 und 1.360 mg/kg, der Mittelwert liegt bei 826 mg/kg. Dabei steigt der Kalziumgehalt tendenziell mit zunehmendem Aschegehalt. Die Magnesiumgehalte mit einem Mittelwert von 140 mg/kg fallen geringer aus als die Kalziumgehalte.

7.6 Silizium

Silizium (Si) beeinflusst das Ascheschmelzverhalten negativ (wurde hier nicht untersucht). Somit kann ein erhöhter Siliziumgehalt im Brennstoff zu einer Verschlackung im Feuerraum und damit zum Ausfall der Feuerung führen [1][33]. Derzeit existieren in der DIN EN ISO 17225-2 [14] für die Temperatur der Erweichung oder des Schmelzens der Asche keine konkreten Vorschriften. Dort heißt es lediglich, dass hierzu Angaben gemacht werden sollten (nicht normativ). Auch die DINplus-Zertifizierung gibt keinen Wert vor [17]. Im Gegensatz dazu müssen Holzpellets, die nach ENplus zertifiziert sind, aber eine Ascheerweichungstemperatur von mindestens 1.200 °C aufweisen [3].

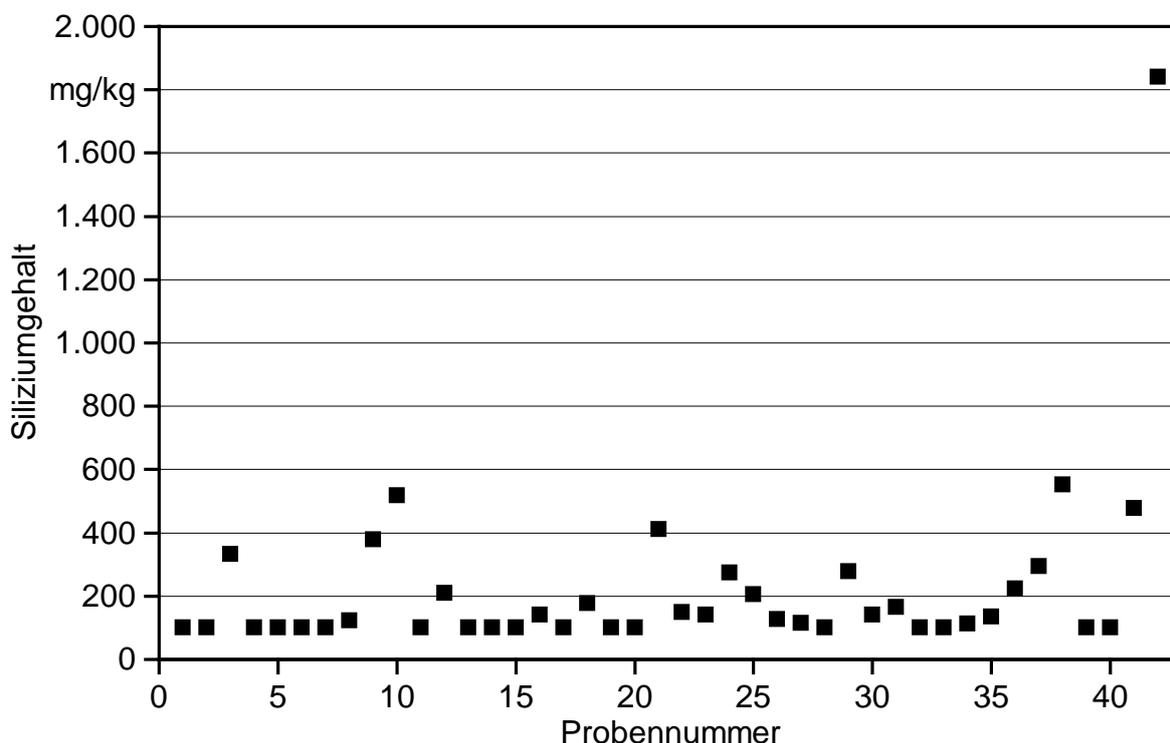


Abbildung 23: Gehalt an Silizium (Si) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse, Nachweisgrenze bei 100 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

18 der 42 Proben weisen einen Siliziumgehalt von unter 100 mg/kg (Nachweisgrenze) auf (Abbildung 23). Die anderen Werte bewegen sich – mit einer Ausnahme – im Bereich von 112 bis 553 mg/kg. Gemittelt ergibt sich ein Wert von 222 mg/kg.

Der Gehalt an Silizium in Holzpellets ist nicht durch die Norm oder durch Vorgaben der Zertifikate begrenzt. Probe Nummer 42 weist den höchsten Si-Gehalt von 1.840 mg/kg im Rahmen dieser Untersuchung auf. Dieser erhöhte Wert lässt eine Verunreinigung während des Produktionsprozesses, z. B. mit Bodenmaterial, vermuten. Da Siliziumoxid einen nicht unerheblichen Teil der bei der Verbrennung entstehenden Asche ausmacht

[28], kann der hohe Siliziumanteil bei Probe 42 deren hohen Aschegehalt von 1 m.-% erklären.

7.7 Natrium und Zink

Die Gehalte an Schwermetallen beeinflussen die Qualität der Asche negativ. Durch eine Analyse der Schwermetallgehalte in einem Holzbrennstoff können Rückschlüsse auf die eingesetzten Rohstoffe gezogen werden. So dienen einige Schwermetalle als Indikatoren dafür, dass behandeltes statt naturbelassenen Holzes eingesetzt wurde [23]. Sowohl Natrium als auch Zink zählen zu den Aerosolbildnern während der Verbrennung und tragen somit zur Feinstaubemission bei [4].

Abbildung 24 stellt die Messwerte für die Gehalte von Natrium und Zink grafisch dar. Außerdem sind darin die Vorgaben der DIN EN ISO 17225-2 sowie der Zertifizierungen DINplus und ENplus A1 [14][16][17] für Zink dargestellt.

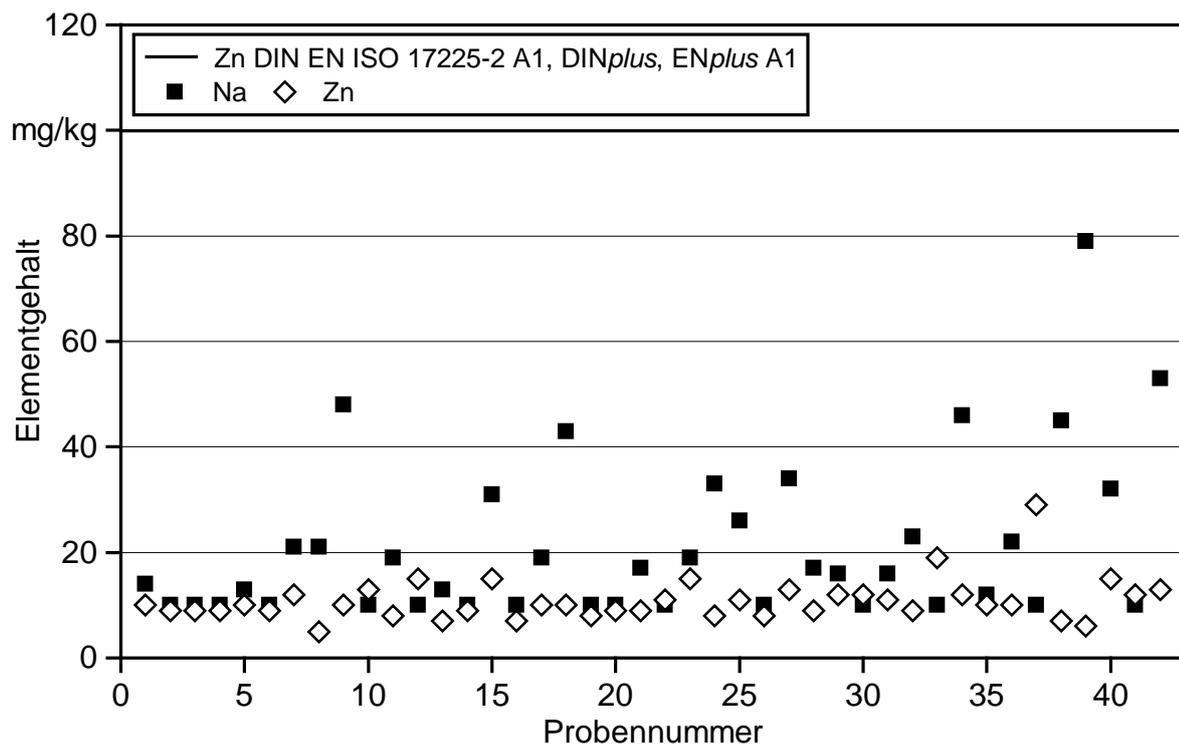


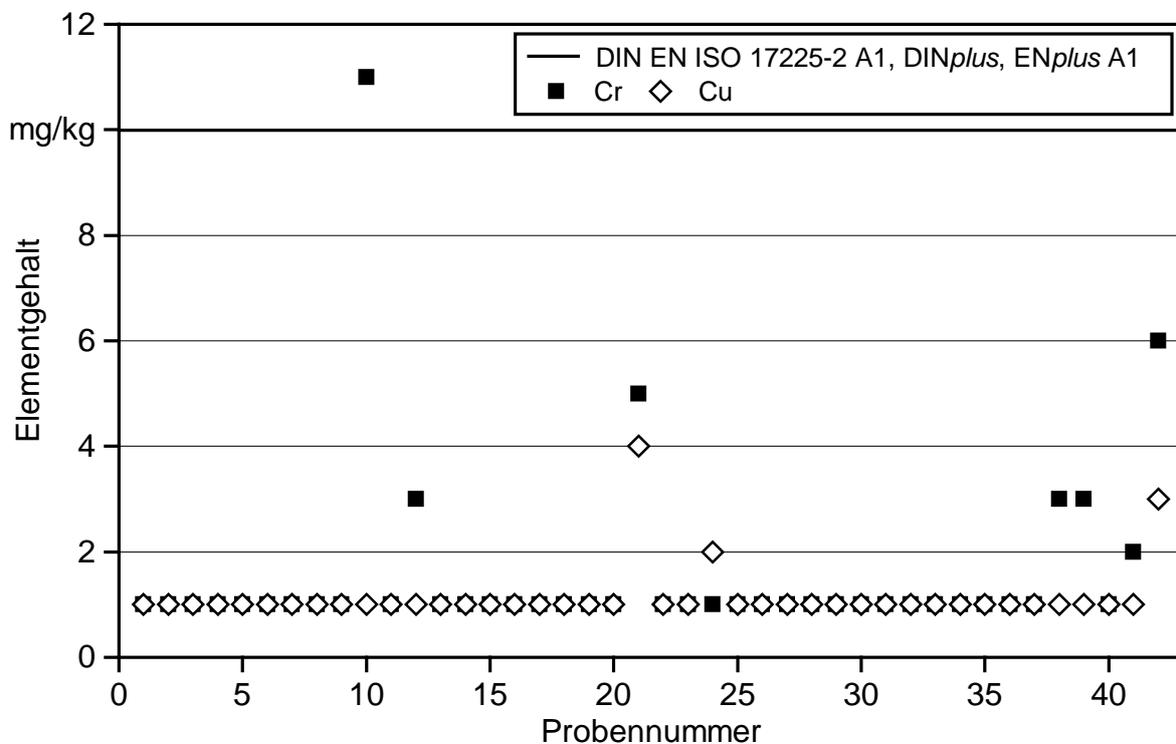
Abbildung 24: Gehalte an Natrium (Na) und Zink (Zn) in den Pelletproben bezogen auf die Trockenmasse; durchgehende Linie: Grenzwert der einschlägigen Normen und Zertifizierungen für den Zinkgehalt, Nachweisgrenze des Na bei 10 mg/kg (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Alle 42 Proben unterschreiten den Grenzwert von 100 mg/kg für Zink. Der Mittelwert des Zinkgehalts liegt bei 10,8 mg/kg. Der Natriumgehalt im Brennstoff ist ebenfalls nicht limi-

tiert und beträgt zwischen 12 und 79 mg/kg. Durchschnittlich beträgt der Natriumgehalt 21,2 mg/kg. Der maximale Gehalt in Probe 39 könnte evtl. auf das Ausgangsmaterial zurückgeführt werden, da es sich um Pellets aus Tropenholz handelt. In 16 Pelletproben wird die Nachweisgrenze für Natrium unterschritten.

7.8 Chrom und Kupfer

Die Schwermetalle Chrom (Cr) und Kupfer (Cu) werden zum Teil zwar in die Grobasche eingebunden, können aber auch in der Flug- und Feinstflugasche nachgewiesen werden [28]. Die Gehalte an Chrom und Kupfer sind in Abbildung 25 zusammengestellt. Für beide Stoffe liegt der Grenzwert bei 10 mg/kg [14][16][17].



7.9 Weitere Elemente

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Elementen wurden noch weitere Elementgehalte bestimmt, aufgrund der zahlreichen Unterschreitungen der jeweiligen Nachweisgrenze auf deren grafische Darstellung aber verzichtet. Die vollständigen Daten finden sich im Anhang (vgl. Tabelle 8). Nachfolgend werden die Elemente und die jeweiligen Anteile kurz beschrieben und ggf. vorhandene Grenzwerte der DIN EN 17225-2 [14] sowie die Nachweisgrenzen genannt.

Eines dieser Elemente ist Arsen. Für dieses ist ein Grenzwert von 1 mg/kg vorgegeben. Der Grenzwert wird in keiner der 42 Pelletproben überschritten, alle Proben bleiben unter der Nachweisgrenze von 0,8 mg/kg.

Für Blei verhält es sich ebenso wie für Arsen. Auch hier werden weder der Grenzwert von 10 mg/kg noch die Nachweisgrenze von 2 mg/kg erreicht.

Bei Cadmium liegt der Grenzwert der Norm bei 0,5 mg/kg. Dieser wird von keiner Probe überschritten. Die meisten Proben liegen hier unter der Nachweisgrenze von 0,2 mg/kg, lediglich bei 6 Proben ist das nicht der Fall (vgl. Tabelle 8 im Anhang). Der höchste nachgewiesene Wert für den Cadmiumgehalt liegt bei 0,4 mg/kg (Proben 12 und 21).

Der Nickelgehalt ist mit 10 mg/kg begrenzt und wurde in allen Proben unterschritten. Nachgewiesen werden konnten vom Prüflabor Werte ab 1 mg/kg. Nur bei 2 Proben wurde diese Nachweisgrenze überhaupt überschritten (Proben 10 und 42) und es wurden jeweils 3 mg/kg an Nickel gemessen.

Quecksilber ist in der Norm mit 0,1 mg/kg limitiert. Mit Ausnahme von Probe 34 (0,09 mg/kg) liegen alle Werte unter dem Wert der Nachweisgrenze von 0,07 mg/kg.

8 Diskussion und Bewertung der Analyseergebnisse

8.1 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern

Zwischen den einzelnen Brennstoffparametern bestehen Zusammenhänge und Wechselwirkungen. Tabelle 2 gibt die Bestimmtheitsmaße linearer Regressionen zwischen den brennstofftechnischen und physikalischen Parametern wieder. Daneben zeigten sich auch Abhängigkeiten der brennstofftechnischen von inhaltsstofflichen Eigenschaften (siehe Abschnitt 8.1.3).

Tabelle 2: Bestimmtheitsmaße (R^2) linearer Regressionen zwischen den brennstofftechnischen und physikalischen Qualitätsparametern; Fettdruck kennzeichnet $R^2 > 0,2$

	Härte	Länge	Rohdichte	Heizwert (wasserfrei)	Aschegehalt	Wassergehalt	Schüttdichte	Mechanische Festigkeit
Härte	1,00							
Länge	0,06	1,00						
Rohdichte	0,07	0,02	1,00					
Heizwert (wf)	0,06	0,04	0,06	1,00				
Aschegehalt	0,06	0,06	0,16	0,02	1,00			
Wassergehalt	0,13	0,00	0,08	0,28	0,05	1,00		
Schüttdichte	0,02	0,04	0,41	0,00	0,06	0,19	1,00	
Mech. Festigkeit	0,04	0,16	0,10	0,00	0,03	0,14	0,20	1,00
Feinanteil	0,09	0,10	0,24	0,00	0,02	0,26	0,18	0,31

8.1.1 Einfluss von Pellethärte und Pelletlänge

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die mittlere Pelletlänge und die Pellethärte voneinander abhängig sind, da harte Pellets weniger zum Brechen neigen und somit deren mittlere Pelletlänge erhöht werden könnte. Die Vermutung, dass die Pelletchargen mit den kürzesten Pellets somit gleichzeitig eine niedrige Härte aufweisen, konnte aber aus den Daten nicht bestätigt werden (Tabelle 2). Zwar fanden sich unter den 10 Proben mit den kürzesten Pellets 3 Proben mit niedriger Härte (Proben 23, 39 und 42), ein statistischer Zusammenhang oder Trend ließ sich jedoch nicht nachweisen. Folglich ist die Härte nicht alleine ausschlaggebend für die Pelletlänge. Vielmehr sind offenbar andere Prozesse bei der Herstellung, z. B. die Einstellung der Abschermesser, für die uneinheitliche Pelletlänge innerhalb der untersuchten Proben verantwortlich.

Mit abnehmender Pelletlänge könnte sich der Abrieb erhöhen und die mechanische Festigkeit verringern. Da kürzere Pellets eine größere Oberfläche im Verhältnis zum Volumen aufweisen, bieten sie auch mehr Angriffsmöglichkeiten bei einer mechanischen Belastung, zumal dann auch mehr Pellets in den Proben enthalten sind, von denen an den empfindlichen konkaven Abbruchkanten feine Teilchen abbrechen könnten. Diese Vermutung konnte durch die Daten bestätigt werden, der beobachtete Trend ist jedoch mit einem sehr niedrigen Bestimmtheitsmaß von 0,16 auf nur zwei Extremwerte zurückzuführen. Dabei handelt es sich um Probe 23 und Probe 39 (Abbildung 26). Lässt man beide Proben außer Acht ist kein Zusammenhang zwischen mittlerer Länge und mechanischer Festigkeit mehr nachweisbar.

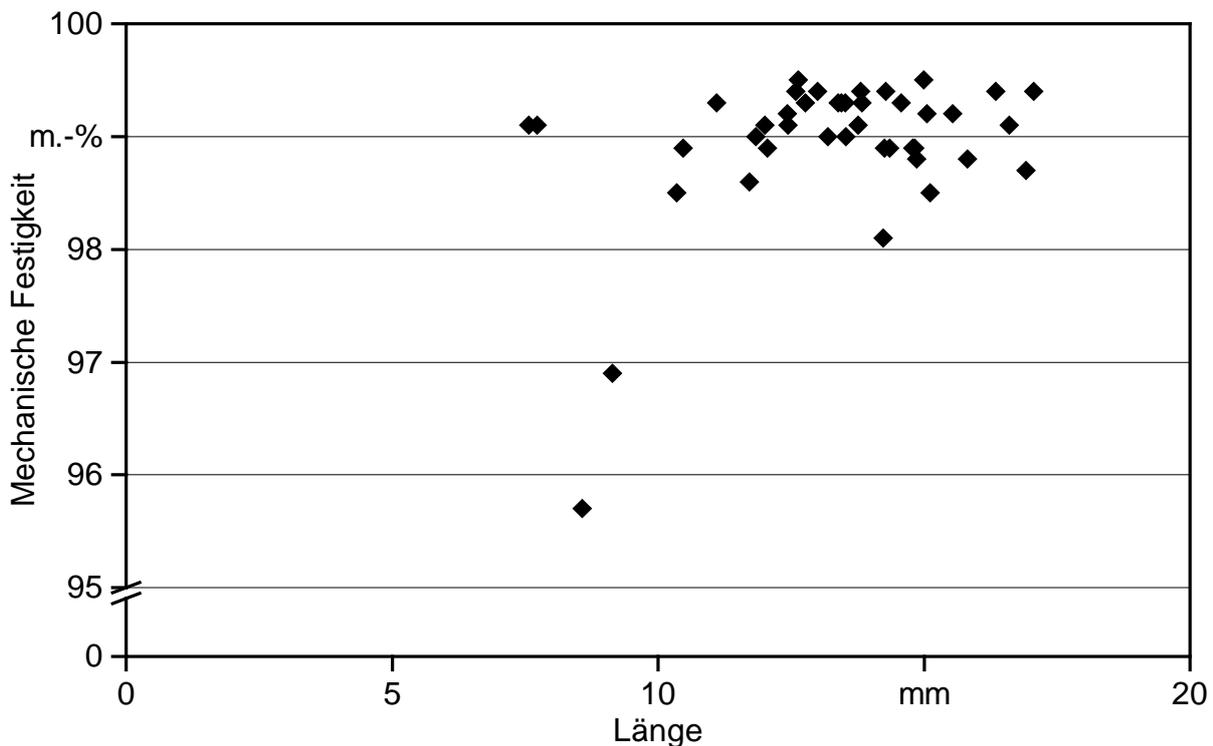


Abbildung 26: Einfluss der mittleren Pelletlänge auf die mechanische Festigkeit

Auch die Härte der Pellets sollte die mechanische Festigkeit und den Feinanteil beeinflussen. Dabei ist anzunehmen, dass besonders harte Pellets eine stabilere Struktur und somit eine höhere mechanische Festigkeit sowie einen geringeren Feinanteil als weniger harte Pellets aufweisen. Diese Annahme konnte durch die Auswertung der Messergebnisse zwar nicht bestätigt werden, trifft allerdings auf Probe 39 mit der geringsten Härte von 320 N, dem höchsten Feinanteil von 5,7 m.-% sowie der zweitniedrigsten mechanischen Festigkeit von 96,9 m.-% eindeutig zu (Abbildung 27).

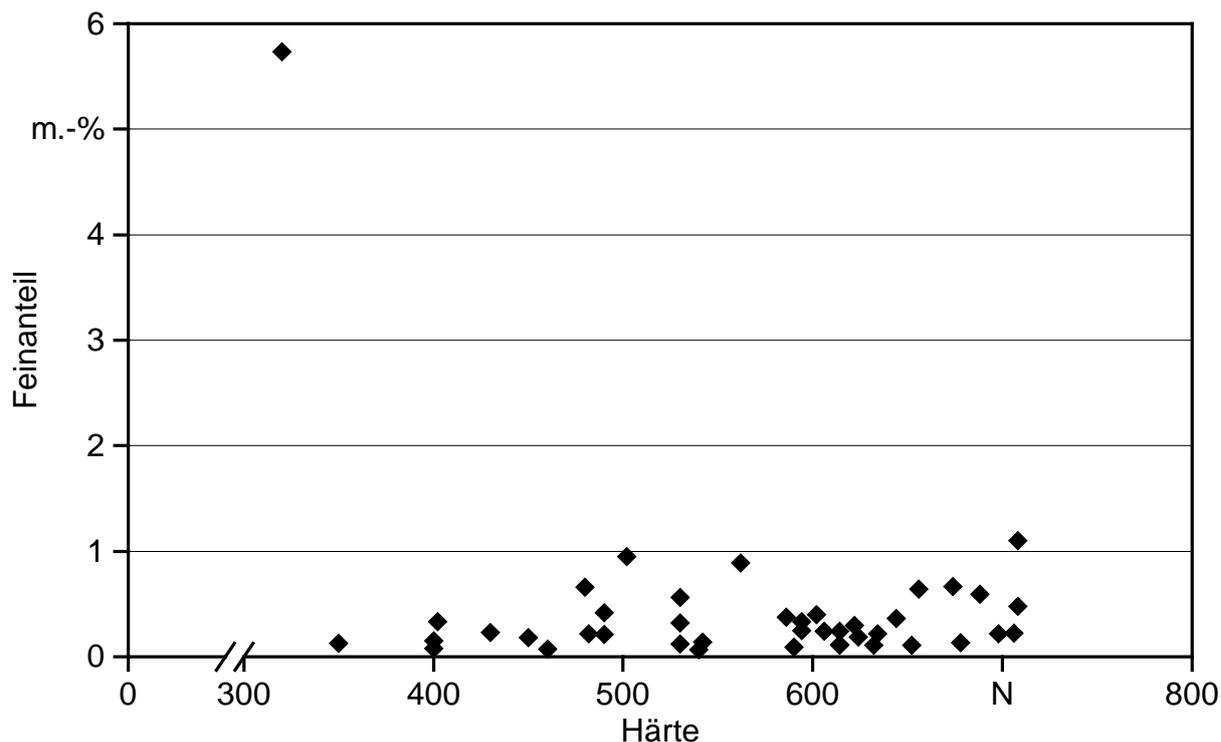


Abbildung 27: Einfluss der Härte auf den Feinanteil

Weiterhin könnte die Pelletlänge die Schüttdichte beeinflussen. Die Vermutung liegt nahe, dass bei längeren Pellets durch ungünstige Überlagerung mehr Hohlräume entstehen, wodurch sich die Schüttdichte verringern könnte. Auch diese Vermutung konnte nicht bestätigt werden (Abbildung 28). Vielmehr zeigte gerade die Probe mit den kleinsten Partikeln (Probe 39) die geringste Schüttdichte (599 kg/m^3). Folglich ist anzunehmen, dass sich die Partikel relativ einheitlich im dreidimensionalen Raum ausrichten, wodurch die Pelletlänge ihren möglichen Einfluss auf die Schüttdichte verliert. Dies könnte u. a. ein Effekt der zylindrischen Form der Presslinge sein, da sich durch die runde Form die gegenseitige Reibung verringern und das Fließverhalten verbessern sollte. Analog konnte auch bei Hackschnitzeln in früheren Studien kein eindeutiger Einfluss der Partikelgröße oder Partikelform auf die Schüttdichte festgestellt werden [26].

Zusammenfassend haben die Härte und die mittlere Länge sich aktuell im deutschen Handel befindlicher Pellets kaum Einfluss auf normative Parameter wie mechanische Festigkeit, Schüttdichte und Feinanteil. Bei einer sehr geringen Pellethärte bzw. Pelletlänge (Probe 39) kann jedoch die Festigkeit der Pellets deutlich abnehmen und so zu Problemen bei der Einhaltung der Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-2 bzw. der Zertifikate führen. Gründe hierfür könnten vor allem sehr heterogene Ausgangsmaterialien der Probe 39 („Tropenholz“) sein.

Inwieweit Pelletlänge und Pellethärte einen Einfluss auf eine gleichmäßige Beschickung der Anlagen, auf die Ausformung des Glutbetts und damit auf das Verbrennungsverhalten der Kessel haben, muss im Feuerungsversuchen noch getestet werden.

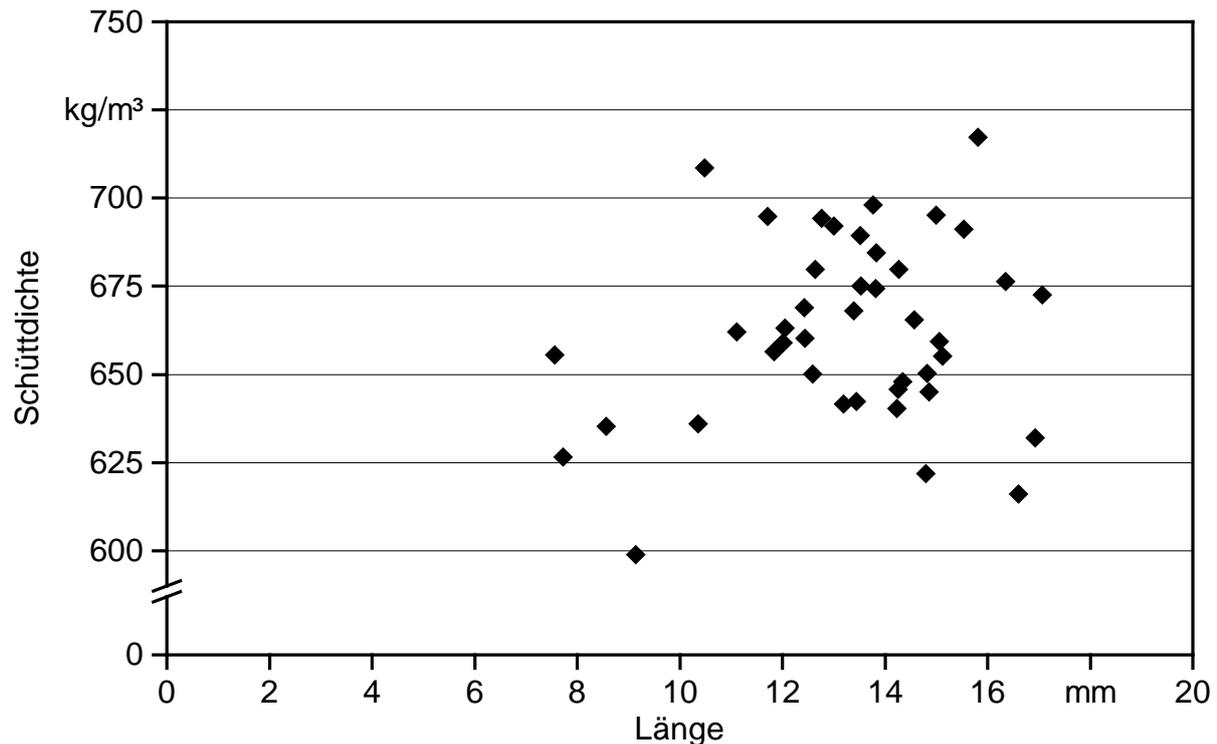


Abbildung 28: Einfluss der Pelletlänge auf die Schüttdichte

8.1.2 Einfluss von Rohdichte und Wassergehalt

Wie für die Pelletlänge wurde auch für andere Parameter, z. B. Wassergehalt (Abbildung 29) und Rohdichte (Abbildung 30), ein Einfluss auf die Schüttdichte vermutet. Die Ergebnisse zeigen, dass – anders als bei Hackschnitzeln [26] – bei Pellets eine Zunahme des Wassergehalts zu einer Abnahme der Schüttdichte führen kann. Je trockener ein Holzartiger Rohstoff schon bei der Pelletierung ist, desto weniger Volumen nimmt er bei gleicher Masse ein. Folglich steht zu vermuten, dass sich trockenere Pellets aufgrund von Schrumpfungsprozessen des Ausgangsmaterials bei niedrigerem Wassergehalt höher verdichten lassen, was sich an der Schüttdichte ablesen lässt. Bei zu trockenen Brennstoffen sind bei der Pelletierung jedoch bald Grenzen gesetzt.

Die Rohdichte der Pellets könnte direkt von der Holzart abhängig sein. Für Hackschnitzel konnte gezeigt werden, dass die Schüttdichte der Brennstoffe bei Verwendung von Holzarten mit hoher Rohdichte steigt (siehe TFZ-Bericht 40 „Optimale Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel“ [26]). Dies könnte auch für Pellets den guten Zusammenhang zwischen Rohdichte und Schüttdichte erklären (Abbildung 30), wenngleich aus den Angaben der Hersteller keine Rückschlüsse auf die verwendete Baumart gezogen werden konnten. Folglich könnte sich die Verfügbarkeit laubholzstarker Sortimenten, die langfristig im Zuge des Waldumbaus von nadelholzreichen zu laubholzreichen Beständen häufiger anfallen werden, direkt auf die Pelletproduktion und auf technische Brennstoffparameter auswirken.

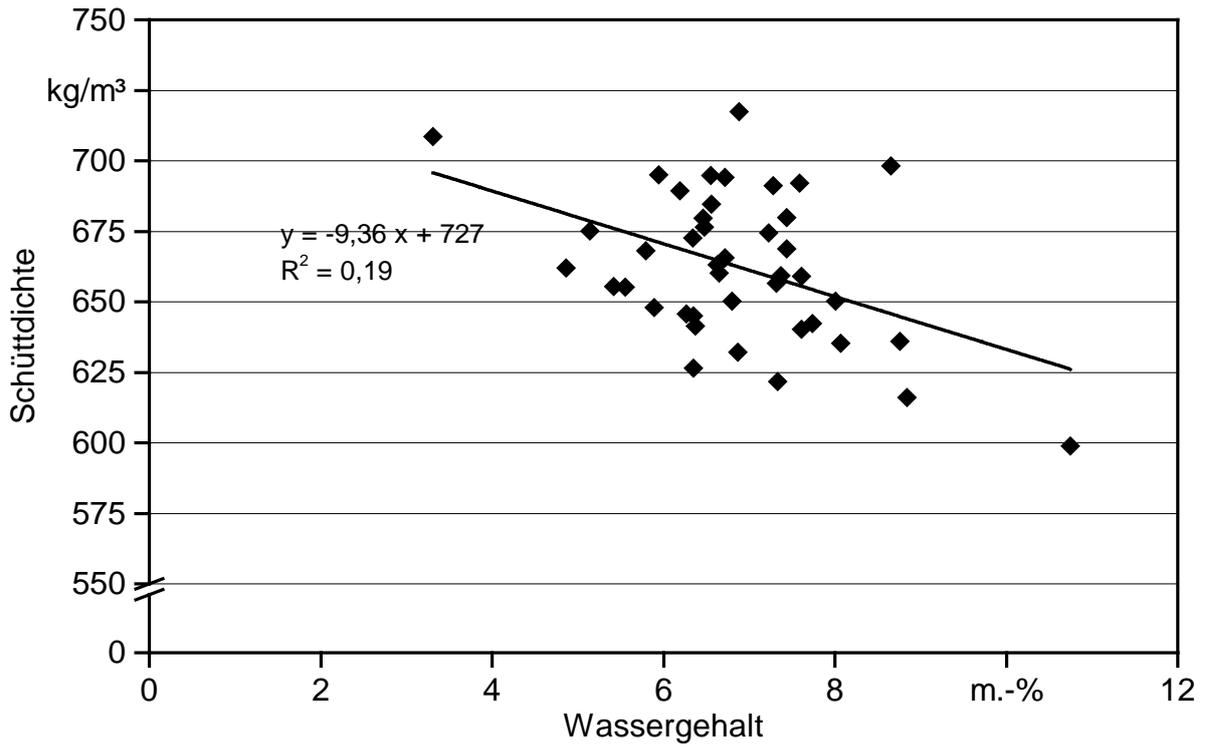


Abbildung 29: Einfluss des Wassergehalts der Pellets auf die Schüttdichte

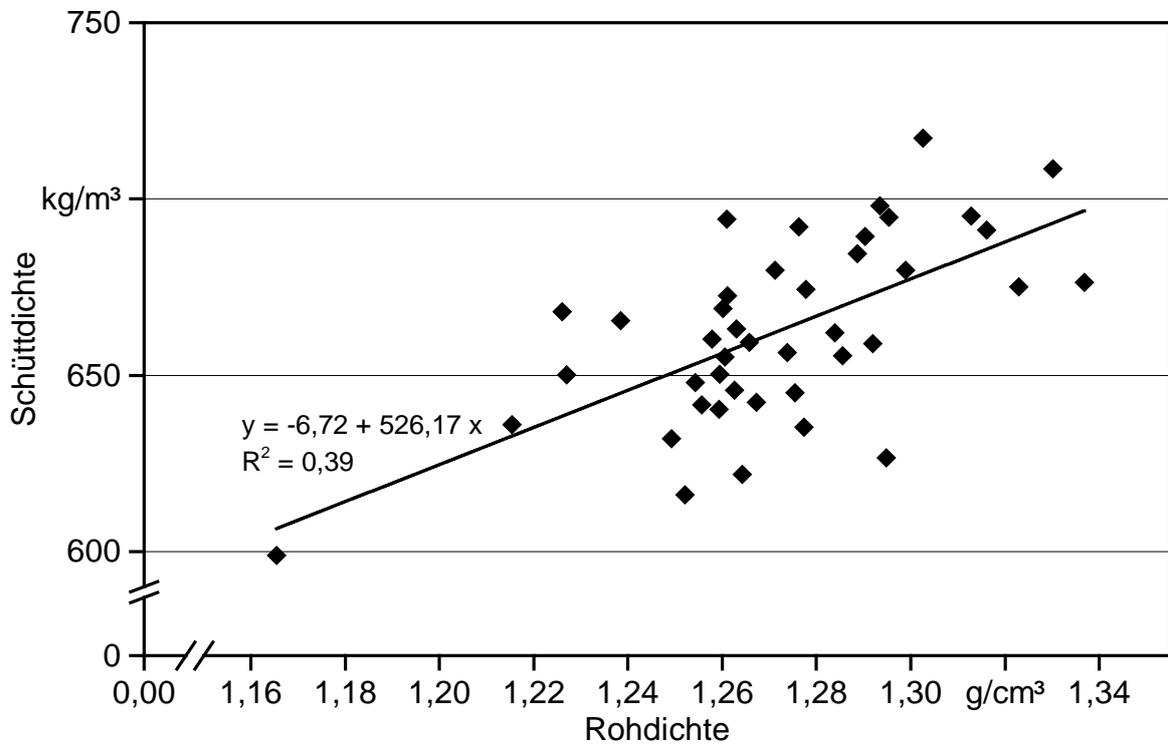


Abbildung 30: Einfluss der Rohdichte der Pellets auf die Schüttdichte

Auch zwischen dem Aschegehalt und der Rohdichte wurde bei den Regressionsanalysen ein möglicher Zusammenhang angezeigt (d. h., die Rohdichte sinkt mit zunehmendem Aschegehalt). Allerdings bleibt hierfür eine mögliche Erklärung offen. Möglicherweise korreliert der Aschegehalt mit anderen stofflichen Eigenschaften, die direkt auf die Verdichtbarkeit Einfluss nehmen. Außerdem wird dieser Zusammenhang nur durch einen Einzelwert hervorgerufen, denn Probe 42 weist mit ca. 1,0 m.-% einen überdurchschnittlich hohen Aschegehalt auf. Für diese Probe wird vom Hersteller lediglich angegeben, dass es sich um „ökologische Pellets“ handelt, das Ausgangsmaterial ist aber nicht bekannt.

Erwartungsgemäß steigt der Heizwert (im Anlieferungszustand) bei sinkendem Wassergehalt (Abbildung 31). Je mehr Wasser sich in einem Brennstoff befindet, desto höher ist die Wärmemenge, die aufgewendet werden muss, um dieses Wasser bei der Verbrennung zu verdampfen [23]. Ohne Kondensationswärmetauscher (Brennwerttechnik) kann diese Wärme nicht zurückgewonnen werden und muss als Verlust gelten.

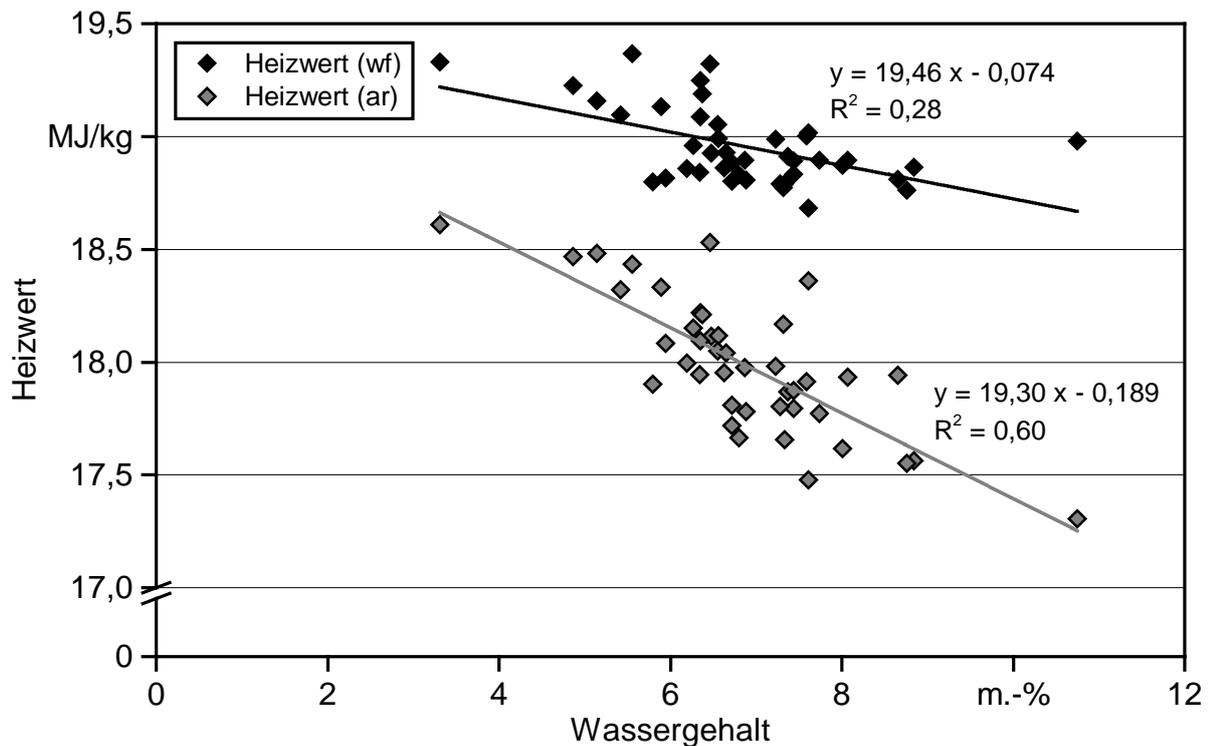


Abbildung 31: Einfluss des Wassergehalts auf den Heizwert (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand („as received“))

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,60 hat der Wassergehalt damit den höchsten Einfluss auf den Heizwert (im Anlieferungszustand). Überraschend – wenngleich deutlich schwächer – zeigt sich ein solcher Zusammenhang aber auch für den Heizwert auf wasserfreier Bezugsbasis ($R^2 = 0,28$, Tabelle 2, Abbildung 31).

Ein hoher Wassergehalt und eine niedrige Rohdichte zeigten weiterhin einen Einfluss auf den Feinanteil (Tabelle 2). In beiden Fällen beruht diese Beobachtung jedoch auf einen Einzelwert (Probe 39). Insgesamt kann bei Probe 39 mit der Bezeichnung „Tropenholz“ ein sehr heterogenes Ausgangsmaterial angenommen werden (siehe auch Abschnitt 8.1.1).

8.1.3 Einfluss von inhaltsstofflichen Parametern und Aschegehalt

Der Aschegehalt biogener Festbrennstoffe wirkt sich direkt auf den Heizwert aus [23]. Jedoch ist dies vor allem bei Halmgutbrennstoffen mit Aschegehalten über 1 m.-% der Fall. Im Gegensatz dazu weisen naturbelassene Hölzer ohne Verunreinigungen in der Regel einen Aschegehalt von unter 1 m.-% auf, sodass dieser kaum einen Einfluss auf den Heizwert besitzt [23]. Abbildung 32 zeigt den Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Heizwert für die untersuchten Pelletproben.

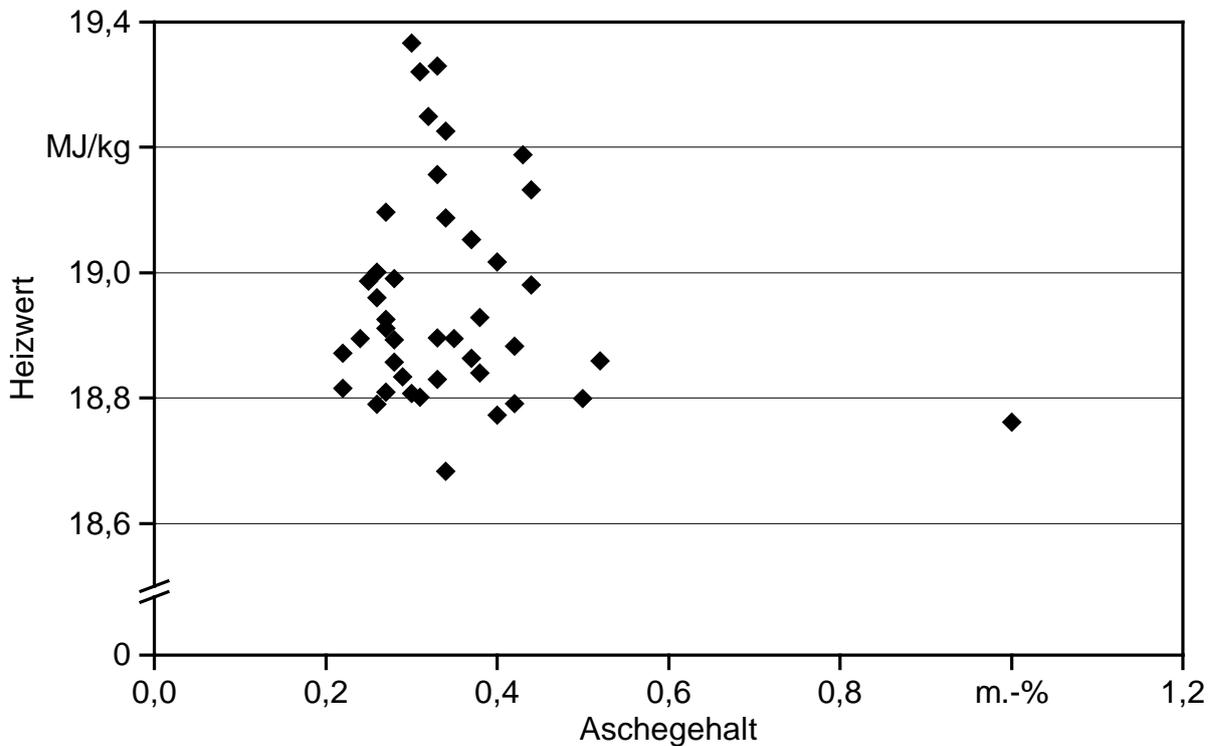


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Heizwert (wasserfrei) und Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse

Mit einer Ausnahme wiesen alle Pelletproben einen Aschegehalt im Bereich von 0,22 bis 0,52 m.-% auf. In diesem Bereich kann dem Aschegehalt keine mindernde Wirkung auf den Heizwert nachgewiesen werden. So liegen beide Pelletproben, die mit 0,22 m.-% den geringsten Aschegehalt vorweisen können, beim Heizwert deutlich unter dem Mittelwert. Dagegen gibt es vier Proben, die sowohl beim Heizwert als auch beim Aschegehalt im jeweils oberen Drittel liegen. Der niedrige Heizwert von Probe 42, die einen

Aschegehalt von 1 m.-% aufweist, deutet lediglich darauf hin, dass ab einem derart hohen Aschegehalt dessen Einfluss auf den Heizwert zunehmen kann.

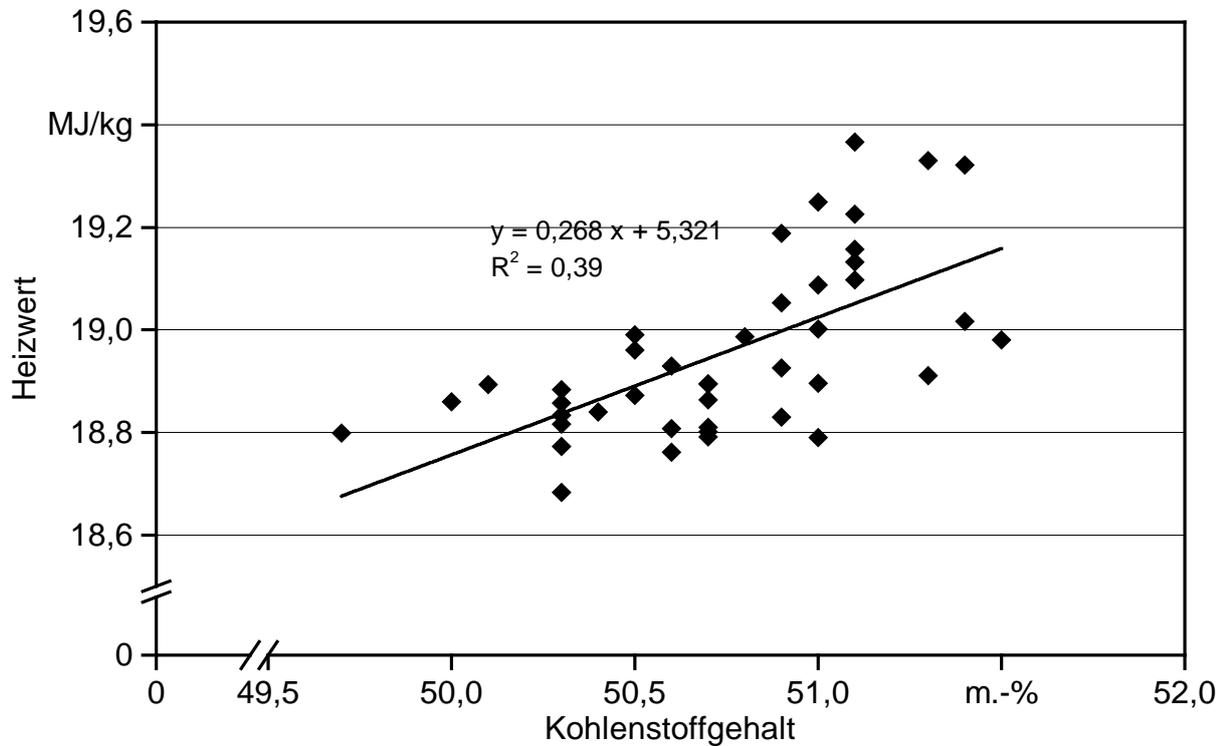


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Heizwert (wasserfrei) und Kohlenstoffgehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse, Darstellung einer linearen Trendlinie mit Gleichung und zugehörigem Bestimmtheitsmaß

Wie in Unterkapitel 7.1 dargestellt liegen die Werte für die Kohlenstoffgehalte teilweise über den Literaturwerten. Möglicherweise stellen sie eine Erklärung für die teilweise relativ hohen Heizwerte dar. In Abbildung 33 ist der Heizwert (wasserfrei) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt in der Trockenmasse dargestellt. Es zeigt sich die erwartete Abhängigkeit vom C-Gehalt, wobei das Bestimmtheitsmaß von 0,39 auf das Vorhandensein vieler weiterer Einflussgrößen schließen lässt.

Holzasche setzt sich vornehmlich aus den Elementen Kalzium, Kalium und Magnesium zusammen. Daneben ist auch Silizium in nicht unerheblicher Menge enthalten [28]. Um diesen Zusammenhang zu veranschaulichen, wurde in Abbildung 34 die Summe aus den Gehalten der vier genannten Elemente mit dem Aschegehalt korreliert.

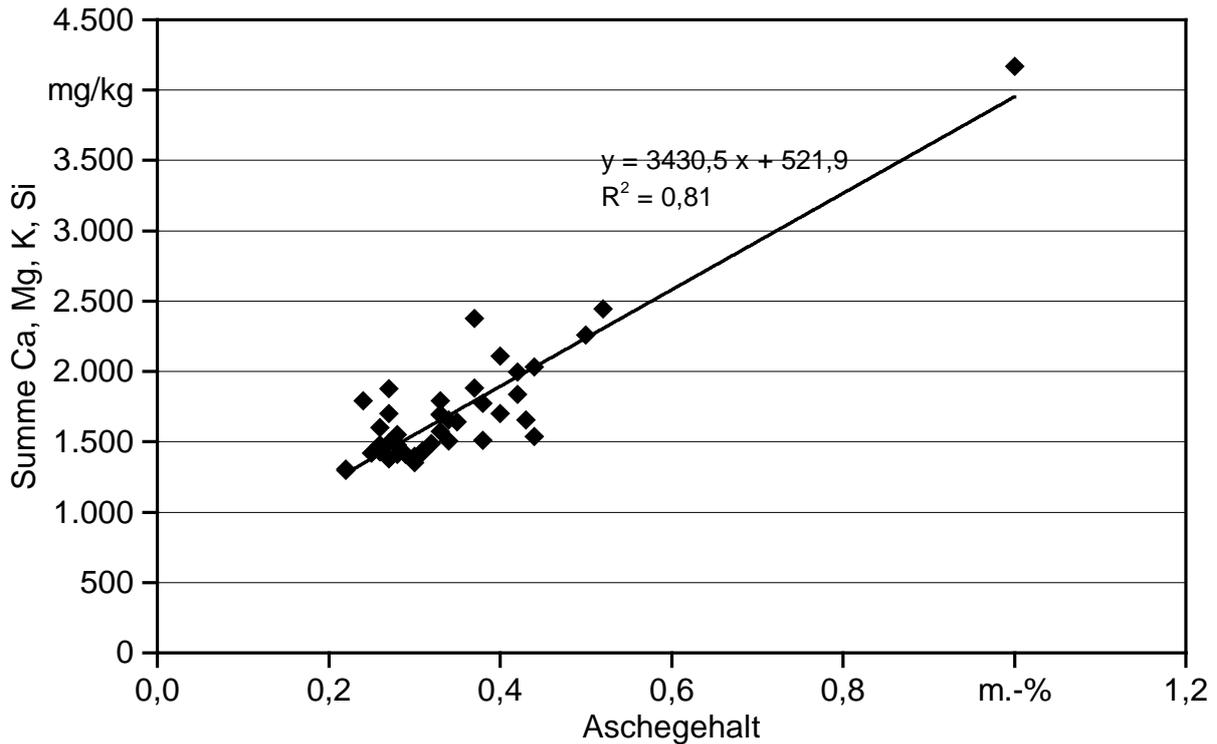


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Summe der Gehalte an Kalzium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Silizium (Si) und dem Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse, Darstellung einer linearen Trendlinie mit Gleichung und zugehörigem Bestimmtheitsmaß

Die Darstellung zeigt, dass zwischen der Summe aus den Elementen Kalzium, Kalium, Magnesium und Silizium sowie dem Aschegehalt eine ausgeprägte Abhängigkeit besteht. Dies wird durch ein Bestimmtheitsmaß von 0,82 statistisch untermauert. Für diesen hohen Wert ist jedoch vornehmlich ein Einzelwert verantwortlich (Probe 42). Aus diesen vier Elementen kann somit auf den ungefähren Aschegehalt eines Holzbrennstoffs geschlossen werden.

Im Einzelnen wurden die aerosolbildenden Elemente bereits in den entsprechenden Kapiteln vorgestellt. Hier werden sie in ihrer Gesamtheit ausgewertet. Eine Zusammenstellung zeigt Abbildung 35.

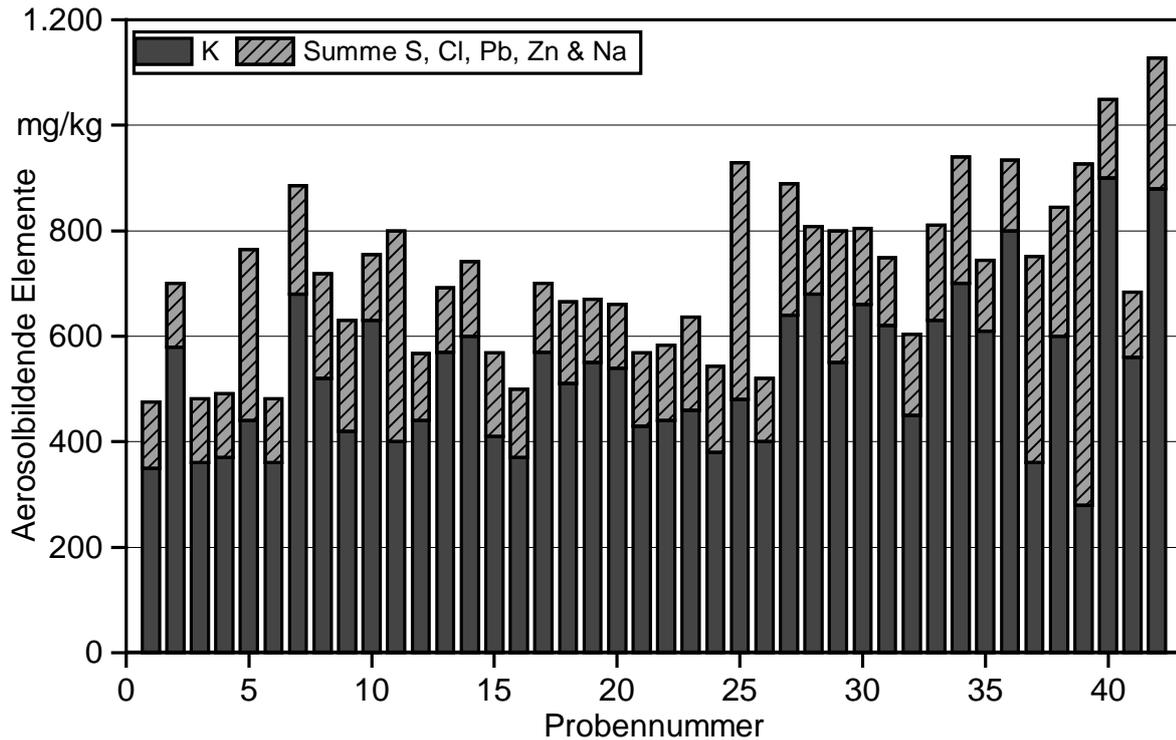


Abbildung 35: Kumulierte Gehalte aerosolbildender Elemente; dunkelgraue Balken: Kaliumgehalt (K); schraffierte Balken: Summe Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Blei (Pb) und Zink (Zn), jeweils bezogen auf die Trockenmasse (Probennummerierung in aufsteigender Reihenfolge nach Aschegehalt)

Die obige Darstellung wurde gewählt, um die wichtige Rolle des Kaliums innerhalb der Elementgruppe der Aerosolbildner hervorzuheben. Zudem ist Kalium neben Natrium das einzige der aufgeführten Elemente, für das in den Normanforderungen für Holzpellets kein Maximalwert festgelegt wurde.

Das Kalium übertrifft in nahezu allen Fällen massenmäßig die Summe aus den anderen fünf Elementen. Im Mittel liegt sein Anteil an der Gesamtsumme der Aerosolbildner bei 74 %. Nur bei Probe 39 bleibt Kalium unter einem Drittel. Bei Probe 40 erreicht es einen Massenanteil von 86 % aller aerosolbildenden Elemente.

8.2 Vergleich der Ergebnisse mit den Vorgaben und den Herstellerangaben

Die Analyseergebnisse sollten im Rahmen dieser Arbeit mit den Anforderungen aus Normen und Zertifizierungen sowie den Angaben, die die Hersteller auf ihren Verpackungen machen, verglichen werden. Dazu sind in nachstehender Tabelle 3 die Abweichungen nach der Norm und den Zertifikaten zahlenmäßig zusammengefasst.

Tabelle 3: *Abweichungen der Messwerte von den jeweils geforderten Werten; erste Zeile: jeweilige Gesamtanzahl an Abweichungen von Norm und Zertifizierung; zweite Zeile: Anzahl der Proben mit jeweils einer oder mehreren Abweichungen*

	Abweichungen von DIN EN ISO 17225-2 A1		Abweichungen von jeweiliger Zertifizierung	
	absolut	relativ	absolut	relativ
Gesamtanzahl aller Abweichungen	10	1,3 % ¹	12	1,9 % ¹
Anzahl Proben mit einer oder mehreren Abweichungen	7	17,0 % ²	8	20,5 % ³

¹bezogen auf die Gesamtanzahl aller gemessenen, brennstofftechnischen, physikalischen und inhaltsstofflichen Qualitätsparameter, für die es Vorgaben nach DIN EN ISO 17225-2 (42 Proben x 19 Parameter) oder den Zertifizierungssystemen gibt (34 Proben x 19 Parameter), ²bezogen auf 42 Pelletproben, ³bezogen auf 34 zertifizierte Pelletproben

In der Tabelle sind die Abweichungen gegenüber den Vorgaben aus der Norm und den Zertifizierungen dargestellt. Die obere Zeile enthält die Gesamtmengen der Abweichungen, wobei von einer Probe mehrere Abweichungen hervorgerufen werden können. Die untere Zeile enthält die Anzahl an Proben, die eine oder mehrere Abweichungen aufweisen. Hinsichtlich der Zertifizierungskriterien wurden sinngemäß nur die Proben überprüft, die mit dem entsprechenden Zertifikat versehen sind. Zehn gemessene Parameter bzw. sieben Proben erfüllen die Anforderungen der DIN EN ISO 17225-2 nicht. Bei fünf der sieben Proben handelt es sich um Pellets aus dem europäischen Ausland und nicht um in Deutschland hergestellte Ware. Von den insgesamt 42 Holzpelletproben erfüllen somit 35 Proben alle Anforderungen der Norm (ca. 83 %).

Abweichungen von den Zertifizierungsvorgaben traten für zwölf der gemessenen Werte bzw. acht Proben auf. Die von den Überschreitungen der Norm abweichenden Zahlen beruhen darauf, dass nicht alle Proben zertifiziert waren, für die Zertifikate aber teilweise strengere Grenzwerte, z. B. für Schwefel oder, im Fall von DINplus, für den Feinanteil von Sackware, gelten. Mit insgesamt acht Herstellern halten insgesamt ca. 21 % der 34 zertifizierten Proben die von der Zertifizierung geforderten Werte nicht ein.

Insgesamt stellen diese Zahlen einen deutlichen Gegensatz zu den früher bekannt gewordenen Untersuchungsergebnissen aus Slowenien dar (vgl. Unterkapitel 3.3). Hier waren schon beim Aschegehalt 90 % der Proben zu beanstanden und auch bei anderen Parametern die Vorgabewerte teilweise nicht eingehalten worden. Im Vergleich dazu können die Testergebnisse der vorliegenden Versuchsreihe als positiv beurteilt werden. Außerdem wird das Ergebnis, das die Stiftung Warentest für die Eigenschaften von Pellets auf dem deutschen Markt vorgestellt hat (vgl. Unterkapitel 3.3), bestätigt.

Bei vier der 42 Proben lagen vom Hersteller keine Angaben zu den Pelleteigenschaften vor, entweder weil auf der Originalverpackung keine Angaben zu finden waren oder weil es sich nicht um originalverpackte Ware handelte. Bei den übrigen Pelletproben unterschieden sich die Herstellerangaben untereinander sowohl qualitativ als auch quantitativ.

So werden in einigen Fällen nur zwei Parameter angegeben, andere Hersteller dagegen geben für bis zu acht Eigenschaften einen Wert an. Die Qualität der Angaben unterscheidet sich von Probe zu Probe. Ein Beispiel hierfür ist die Größe des angegebenen Intervalls für einen Parameter. Während einige Produzenten präzise Angaben machen, nennen andere eine mögliche Bandbreite. Zudem unterscheiden sich auch die Maßeinheiten voneinander. Für Laien macht dies einen Vergleich verschiedener Produkte schwierig. Weiterhin wichen die auf der Verpackung angegebenen Werte häufig von den tatsächlichen Messwerten ab, sowohl in positiver als auch in negativer Hinsicht.

Die Abweichungen zu den Vorgaben der Zertifikate beziehen sich auf die Anforderungen zum Zeitpunkt der Probenahme. Durch Anpassungen beider Zertifikate im Jahr 2015 würden mehr Proben bezüglich des Feinanteils (nur EN*plus*), dafür weniger Proben aufgrund des Schwefelgehaltes durchfallen (siehe Tabelle 1, Tabelle 9). Die Anforderungen für das Jahr 2015 können jedoch für die im Jahr 2014 produzierten Proben nicht herangezogen werden.

8.3 Herstellerinterne Vergleiche

Um im Rahmen dieser Arbeit auch zu betrachten, inwieweit sich die Holzpellets eines Herstellers untereinander unterscheiden, wurden von zwei Herstellern mehrere Proben aus unterschiedlichen Produktionswerken beschafft. Die untenstehende Tabelle 4 zeigt Werte ausgewählter Parameter der betreffenden Proben.

Die Proben des Herstellers A wurden in verschiedenen Werken produziert, die alle in Deutschland liegen. Trotzdem sind große Unterschiede bei den aufgeführten Parametern auszumachen. Die Daten für den Heizwert streuen bei Hersteller A nahezu über die gesamte Bandbreite, die für alle 42 Proben ermittelt wurde. Während die Probe 16 den höchsten Heizwert aller analysierten Holzpellets aufweist, zeigt Probe 40 eines der niedrigsten Ergebnisse. Auch der Aschegehalt schwankt mit Werten zwischen 0,26 und 0,50 m.-% erheblich. Beim Parameter Feinanteil liegen die Werte der Proben 6, 32 und 40 zwar eng beieinander, jedoch weichen in diesem Fall die Nummer 16 und insbesondere die Nummer 26 klar von den anderen Ergebnissen ab. Auch bei den Elementen, die in Bezug auf die Aerosolbildung interessant sind, können große Unterschiede festgestellt werden. So schwankt Kalium von 360 bis 900 mg/kg, die Summe der Aerosolbildner (Kalium, Schwefel, Natrium, Chlor, Blei und Zink) schwankt von 481 bis 1.049 mg/kg. Insgesamt ist festzustellen, dass trotz der Herkunft der Holzpellets von einem Hersteller erhebliche Unterschiede bei den Eigenschaften der Pellets auftreten können. Dieser Sachverhalt lässt die Vermutung zu, dass das Holz für die einzelnen Produktionsstätten aus unterschiedlichen Quellen stammt. Die Unterschiede beim Feinanteil könnten auf verschiedene Produktionsprozesse oder auf variierende Transportbedingungen hinweisen.

Auch die Nummern 14, 17 und 19 sind einem Hersteller zuzuordnen. Hier jedoch stammen die einzelnen Proben nicht nur aus verschiedenen Werken, sondern auch aus verschiedenen Ländern. Probe 14 kommt aus Österreich, Probe 17 aus der Tschechischen Republik und Probe 19 aus Deutschland. Trotz dieser geografisch sehr unterschiedli-

chen Herkunft bleiben die Unterschiede der Holzpellets hinsichtlich ihrer Eigenschaften relativ gering. Die einzig nennenswert hohe Schwankung (beim Feinanteil) muss kritisch hinterfragt werden, da die entsprechende Probe 17 nicht originalverpackt war. Bei allen anderen Parametern existieren für die drei Proben des Herstellers nur minimale Unterschiede.

Tabelle 4: Darstellung ausgewählter Parameter für jeweils mehrere Proben eines Herstellers aus verschiedenen Produktionswerken; Nummer: jeweilige Probennummer; Hersteller: Benennung A und B zur Unterscheidung; Heizwert (wf) Aschegehalt bezogen auf die Trockenmasse Feinanteil in Masseprozent des Anlieferungszustands, Anteil Kalium (K) bezogen auf die Trockenmasse, Anteil der Summe aus Kalium (K), Schwefel (S), Natrium (Na), Chlor (Cl), Blei (Pb) und Zink (Zn) bezogen auf die Trockenmasse

Nummer	Hersteller	Heizwert [MJ/kg (wf)]	Aschegehalt [m.-%]	Feinanteil [m.-%]	Anteil K [mg/kg]	Summe K, S, Na, Cl, Pb, Zn [mg/kg]
6	A	19,0	0,26	0,15	360	481
16	A	19,4	0,30	0,38	370	499
26	A	19,2	0,34	0,66	400	520
32	A	18,9	0,38	0,11	450	604
40	A	18,8	0,50	0,12	900	1.049
14	B	19,0	0,28	0,11	600	741
17	B	18,8	0,30	1,00	570	701
19	B	18,8	0,31	0,08	550	670

Aus den eben beschriebenen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass alleine die Kenntnis der Herstellerfirma keine belastbaren Rückschlüsse auf die Qualität der Holzpellets zulässt. Während bei einem Produzenten große Unterschiede zwischen den Pellets aus verschiedenen Werken festgestellt werden konnten, verhielt es sich bei dem anderen Hersteller genau umgekehrt. Dies könnte z. B. auf eine unterschiedliche Organisation der Rohstoffbeschaffung zurückgeführt werden. Auch der Produktionsprozess wirkt sich auf die Produktqualität aus, weshalb sich Pellets aus Werken mit unterschiedlicher Produktionstechnik unterscheiden.

8.4 Prüfung auf Labelbetrug

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung kam es sowohl beim DINplus-Label als auch beim ENplus-Label vermehrt zu Betrugsfällen [25]. Informationen zur missbräuchlichen Nut-

zung der Labels werden regelmäßig auf den Internetseiten www.enplus-pellets.eu und www.dincertco.de aktualisiert.

Im Fall von DINplus konnte keine der hier untersuchten Proben einem der Betrugsfälle auf der Schwarzen Liste von DIN CERTCO zugeordnet werden. Auch für das ENplus-Siegel konnte unter den 42 Proben kein Betrugsfall identifiziert werden.

8.5 Ergebnisbewertung

Bei den unter Kapitel 5 beschriebenen brennstofftechnischen Eigenschaften gibt es im Allgemeinen wenig Auffälligkeiten. Probe 42 kann beim Aschegehalt die erforderlichen 0,7 m.-% nicht einhalten. Kombiniert mit den Ergebnissen der Elementaranalyse, bei der für Probe 42 der Maximalwert für den Siliziumgehalt nachgewiesen werden konnte, lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass das Ausgangsmaterial dieser Holzpellets durch siliziumhaltiges Material verunreinigt wurde und diese Verunreinigung auch zum Großteil für den zu hohen Aschegehalt verantwortlich ist [26].

Auch bei dem Parameter Wassergehalt kann mit Nummer 39 eine Probe die Anforderung nicht erfüllen. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei nicht um originalverpackte Ware handelte. Somit ist nicht auszuschließen, dass die Holzpellets aufgrund ihrer Hygroskopizität Wasser aus der Umgebungsluft aufgenommen haben. Auf diese Weise könnte der Messwert verfälscht worden sein. Hierdurch könnte sich gleichzeitig auch die Struktur der Pellets verändert haben, was zu der geringen Härte, dem hohen Feinanteil und der geringen mechanischen Festigkeit geführt haben könnte. Als weitere Erklärung könnte aber auch ein heterogenes Ausgangsmaterial dienen (siehe weiter unten). Um dies klären zu können, müsste eine weitere Messung auf Grundlage einer originalverpackten Pelletprobe durchgeführt werden.

Der ausgesprochen niedrige Wassergehalt von Probe 21 lässt die Vermutung zu, dass in diesem Fall beim Produktionsprozess ein Unterschied zu anderen Herstellern existiert. Möglich wäre hier etwa ein verfahrenstechnischer Unterschied bei der Vortrocknung, Feuchtejustierung oder Kühlung der Holzpellets nach dem Pressvorgang.

Beim dritten untersuchten brennstofftechnischen Parameter, dem Heizwert, halten alle 42 Proben die Anforderungen ein. Viele der Holzpellets wiesen sogar einen sehr hohen Heizwert auf, was als positiv zu bewerten ist. Da es auf den Heizwert viele Einflussfaktoren gibt, können diese hohen Werte nicht abschließend begründet werden. Jedoch ist anzunehmen, dass der allgemein niedrige Aschegehalt und der verhältnismäßig hohe Anteil an Kohlenstoff in den Holzpellets dazu beigetragen haben.

Bei den unter Kapitel 6 behandelten physikalischen Eigenschaften sind etwas größere Schwankungen festzustellen als bei den brennstofftechnischen Eigenschaften, so zum Beispiel bei der Schüttdichte, bei welcher der minimale und der maximale Wert fast 20 % auseinanderlagen. Den Minimumwert wies die Probe Nummer 39 auf, die somit auch bei diesem Parameter die gestellten Mindestanforderungen nicht einhalten konnte. Dieses Ergebnis könnte aus der Herkunft des Holzes resultieren. Die Pellets der Nummer 39

sind aus Tropenholz hergestellt. Hierdurch könnte sich auch die bei Probe 39 vergleichsweise niedrige und heterogene Rohdichte erklären.

Zwischen der Schüttdichte und dem Feinanteil war kein Zusammenhang festzustellen. Allgemein ist der Feinanteil bei den analysierten Holzpellets gering. Lediglich zwei Proben (30 und 39) liegen über 1 m.-%. Bei beiden Proben könnte beispielsweise das Produktionsverfahren für den erhöhten Feinanteil verantwortlich sein. Auch durch Umschlagprozesse könnte der Feinanteil erhöht worden sein.

Bei der mechanischen Festigkeit können ebenfalls zwei Proben den Mindestwert nicht erreichen. Dies sind die Nummern 23 und 39. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese niedrigen Werte auf einen andersartigen Produktionsprozess zurückzuführen sind. Im Fall von Probe 39 sind auch der hohe Wassergehalt und die Heterogenität des Ausgangsmaterials denkbare Ursachen (siehe oben).

Auch bei der inhaltsstofflichen Zusammensetzung der untersuchten Holzpellets, die in Kapitel 7 genauer betrachtet wird, gibt es einige Auffälligkeiten. Hier wäre als Erstes der Kohlenstoffanteil zu nennen, der in einigen Fällen über den Werten liegt, die in der Literatur für naturbelassenes Holz zu finden sind. Dieser erhöhte Anteil könnte darauf zurückgeführt werden, dass die Gehalte an Störstoffen (z. B. Asche) in den Pellets im Allgemeinen vergleichsweise niedrig sind und sich somit rechnerisch der prozentuale Anteil des Kohlenstoffs an der Gesamtmasse erhöht.

Im Falle des Chlorgehalts wiesen zwei Proben einen zu hohen Wert auf. Da in beiden Fällen der Kaliumgehalt niedrig ist, kann ein Eintrag des Chlors über Kaliumdüngemittel, wie es bei Feldfrüchten vorkommt, als unwahrscheinlich angesehen werden. Der Chlorgehalt könnte deshalb auf eine sekundäre Verunreinigung des Holzes hindeuten. Auch der Wuchsort der Bäume könnte für den höheren Chlorgehalt verantwortlich sein.

Der Kaliumgehalt ist generell auf einem relativ niedrigen Niveau, verglichen mit Literaturwerten für naturbelassenes Holz. Die starken Schwankungen beim Kaliumgehalt innerhalb der 42 Pelletproben müssen somit den Standortbedingungen, denen die Bäume ausgesetzt waren, zugeschrieben werden. Auffallend ist in diesem Zusammenhang, dass die Probe, die aus Tropenholz hergestellt ist, den niedrigsten Kaliumgehalt aller Pelletproben aufweist. Dies würde erneut für einen Zusammenhang zwischen Kaliumgehalt und Standort sprechen. Jedoch könnte es sich auch um eine Baumart mit geringerem Kaliumbedarf gehandelt haben. Außerdem ist erkennbar, dass ein hoher Aschegehalt vermutlich auch einen erhöhten Gehalt an Kalium nach sich zieht. So wurde bei den 42 untersuchten Pelletproben zumindest beim Aschegehalt ab etwa 0,35 m.-% tendenziell auch ein Anstieg des Kaliumgehalts beobachtet. Der Aschegehalt kann aber nur einen ersten groben Anhaltspunkt für den erwarteten Kaliumgehalt bieten.

Den vorgegebenen Grenzwert für den Stickstoffgehalt können alle 42 Proben einhalten. Fünf Proben wiesen jedoch einen relativ hohen Wert auf. Die erhöhten Werte könnten darauf zurückzuführen sein, dass zur Herstellung dieser Pellets ein Rohstoff mit vergleichsweise höherem Rindenanteil verwendet wird.

Hinsichtlich des Schwefelgehalts ist anzumerken, dass mit der Einführung der weltweit geltenden Norm DIN EN ISO 17225-2 der vorgeschriebene Grenzwert um 0,01 m.-% auf 0,04 m.-% angehoben wurde. Diesen Wert können alle 42 Proben einhalten. Da alle untersuchten Holzpellets jedoch in dem Zeitraum produziert wurden, in dem noch die europäische DIN EN 14961-2 gültig war, sind die beiden Pelletproben, die den strengeren Grenzwert von 0,01 m.-% nicht einhalten können, trotzdem als nicht normkonform zu bezeichnen. Wie im entsprechenden Kapitel beschrieben könnten die erhöhten Schwefelgehalte auf den stofflichen Aufbau des Holzes zurückgeführt werden, was vor allem den Wert bei Probe 39, den Holzpellets aus Tropenholz, erklären würde.

Der hohe Gehalt an Silizium bei Probe Nummer 42 wird mit großer Wahrscheinlichkeit von einer sekundären Verunreinigung verursacht. So könnte etwa am Holz anhaftendes Erdreich mit in die Pelletpresse gelangt sein. Würde dieser Siliziumanteil auf Durchschnittsniveau abgesenkt, könnten die Holzpellets auch annähernd die Anforderungen hinsichtlich des Aschegehalts einhalten.

Der Wert der Probe 10 beim Chromgehalt ist infrage zu stellen, da bei derselben Probe auch ein erhöhter Nickelanteil vorhanden ist. Diese beiden Elemente sind auch in den Werkzeugen der verwendeten Schneidmühle enthalten (siehe auch TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“, Veröffentlichung: Herbst 2015). Es wird deshalb vermutet, dass die Holzpellets erst durch den Mahlvorgang nachträglich verunreinigt wurden (Messerabrieb). Für diese sekundäre Verunreinigung sprechen auch die Werte von Probe Nummer 42, die den zweithöchsten Wert beim Chromgehalt aufweist und neben der Nummer 10 die einzige Probe ist, bei der die Nickelkonzentration über der Nachweisgrenze liegt. Somit sind auch die Ergebnisse für den Chromgehalt der übrigen Proben kritisch zu hinterfragen, da es in diesen Fällen ebenfalls zu Abrieb in der Schneidmühle und damit zu sekundären Verunreinigungen kommen konnte.

Bei allen anderen Elementen können keine außergewöhnlichen Werte festgestellt werden.

Zusammenfassung

Nachdem die Ergebnisse der Untersuchung der Holzpellets auf dem slowenischen Markt Bedenken bezüglich einer in der Praxis immer ausreichenden Pelletqualität ausgelöst hatten, sollte im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch für den deutschen Markt hierzu eine ausführliche Untersuchung stattfinden. Dazu wurden insgesamt 42 Holzpelletproben beschafft. Die meisten davon stammten von deutschen Herstellern. Zu Vergleichszwecken waren aber auch einige Proben aus dem Ausland unter den getesteten Pellets. Bei allen Proben wurden brennstofftechnische und physikalische Eigenschaften sowie die jeweilige inhaltsstoffliche Zusammensetzung untersucht.

Bei den brennstofftechnischen Parametern gab es insgesamt nur wenige Auffälligkeiten. Nahezu alle untersuchten Proben schnitten bei allen drei Werten dieser Kategorie gut ab. Etwas schlechter fielen die Messwerte im Bereich der physikalischen Eigenschaften aus. Trotzdem konnte auch hier der Großteil der Proben alle gestellten Anforderungen einhalten.

Bei der Analyse der inhaltsstofflichen Zusammensetzung konnten einige Werte ausgemacht werden, die auf einen externen Einfluss, wie etwa eine Verunreinigung des Holzes, schließen lassen. Trotzdem lag die Testgruppe insgesamt hinsichtlich der Störstoffbelastung auf einem guten Niveau. Vor allem die Schwermetallkonzentrationen sind generell niedrig, in den meisten Fällen lagen sie sogar unter der Nachweisgrenze.

Ein Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Heizwert konnte in dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Dazu waren die Aschegehalte der untersuchten Holzpellets im Mittel zu gering. Der Einfluss des Kohlenstoffgehalts auf den Heizwert wurde dagegen bestätigt. Ebenso verhält es sich bei den Konzentrationen der Hauptelemente in Holzasche und dem Aschegehalt. Zudem konnte dargelegt werden, welche große Rolle der Anteil des Kaliums innerhalb der Gruppe der wichtigsten aerosolbildenden Elemente (K, Na, S, Cl, Pb, Zn) spielt.

Verglichen mit den Vorgaben aus der DIN EN ISO 17225-2 bzw. den Zertifizierungen schnitten die untersuchten Holzpellets relativ gut ab. So konnten nur sieben Proben (das sind ca. 17 %) nicht alle geforderten Werte erreichen. Hiervon stammten fünf Proben aus einer ausländischen Herstellung. Verglichen mit den Testergebnissen aus Slowenien sind diese Beanstandungszahlen erheblich niedriger. Von ihren jeweiligen Zertifizierungsvorgaben wichen acht Pelletproben ab.

Zudem konnte festgestellt werden, dass sich aus einer Kenntnis der Herstellerfirma nicht auf gleichbleibende Qualität deren Holzpellets schließen lässt. So kann in verschiedenen Produktionswerken auch stark unterschiedliche Ware hergestellt werden.

Alles in allem kann das Fazit der Stiftung Warentest, das diese aus einer Untersuchung mit geringerem Umfang ziehen konnte, bestätigt werden. Darin war ein Hauptkritikpunkt, dass die Herstellerangaben teils fehlerbehaftet sind und die Verbraucher somit in die Irre geführt werden könnten. Dennoch lässt sich hier feststellen, dass die Holzpellets in Deutschland im Großen und Ganzen von guter Qualität sind. Diese Qualität ist für den

Verbraucher vor allem von Bedeutung, weil sie für einen störungsfreien Betrieb der Feuerungsanlage unerlässlich ist. Außerdem wird durch eine hohe Brennstoffqualität der Schadstoffausstoß gering gehalten.

Quellenverzeichnis

- [1] AECKERSBERG, R. (2011): Analyse des Ascheschmelzverhaltens von Holzpellets in Abhängigkeit ausgewählter Aschekomponenten. Dissertation. RWTH Aachen. Shaker-Verlag, 142 Seiten
- [2] AGRA-EUROPE GMBH (2014): Holzpellets immer günstiger. Agra-Europe, Jg. 55, Nr. 22, S. 12
- [3] BOSCH, J.; SCHMERSAHL, R. (2013): Einmal um die Welt. Pellets – Markt und Trends, Nr. 04-13, S. 32–35
- [4] BRUNNER, T.; JOELLER, M.; OBERNBERGER, I.; FRANDSEN, F. (2002): Aerosol and fly ash formation in fixed bed biomass combustion systems using woody biofuels. In: 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection; Amsterdam; 17.–21. Juni 2002; 5 Seiten
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 14774-2: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung. Berlin: Beuth-Verlag, 9 Seiten
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 14774-3: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in gewöhnlichen Analysenproben. Berlin: Beuth-Verlag, 8 Seiten
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 14775: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 14918: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Berlin: Beuth-Verlag, 63 Seiten
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 14961-2: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Einteilung von Holzpellets. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 15103: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2011): DIN EN 15150: Solid biofuels – Determination of particle density. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 15149-1: Feste Brennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber. Berlin: Beuth-Verlag, 15 Seiten
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2010): DIN EN 15210-1: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts. Berlin: Beuth-Verlag, 12 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2014): DIN EN ISO 17225-2: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets. Berlin: Beuth-Verlag, 34 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. (2014): ISO/DIS 17829 Entwurf: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Länge und des Durchmessers von Pellets. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten

- [16] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (2014): Zertifizierungskriterien. Deutsches Pelletinstitut GmbH. URL: http://www.enplus-pellets.de/de/ueber_enplus/produkthanforderungen (Stand: 29.08.2014)
- [17] DIN CERTCO GESELLSCHAFT FÜR KONFORMITÄTBEWERTUNG MBH (2014): Zertifizierungsprogramm. Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerungsstätten. DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH. URL: http://www.dincert.co.de/media/dincertco/dokumente_1/zertifizierungsprogramme/Holzpellets_Zertifizierungsprogramm.pdf (Stand: 29.08.2014)
- [18] DÖRING, S. (2011): Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag, 257 Seiten, ISBN 978-3-642-01623-3
- [19] ELTROP, L.; FRÖHLICH, N.; HARTMANN, H.; LEWANDOWSKI, I.; KALTSCHMITT, M.; MOERSCHNER, J.; MARHEINEKE, T.; ROGGE, S.; SCHNEIDER, S.; SCHRÖDER, G.; WEISKE, A. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3. 2. Auflage. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH, 692 Seiten, ISBN 3-7843-3197-1
- [20] HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2004): Physikalisch-mechanische Brennstoffeigenschaften. In: HÄRDITLEIN, M.; ELTROP, L.; THRÄN, D. (Hrsg.): Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Rohstoffe – Teil 2: Mess- und Analyseverfahren, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Nr. 23. Münster: Landwirtschaftsverlag, 678 Seiten
- [21] HINTERREITER S. (2010): Bestimmung der Brückenbildung bei Lagerentnahmen von biogenen Festbrennstoffen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, 166 Seiten
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2006): ISO 13322: Particle size analysis. Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 32 Seiten
- [23] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 1030 Seiten, ISBN 978-3-540-85094-6
- [24] KOPPEJAN, J.; LONNERMARK, A.; PERSSON, H.; LARSSON, I.; BLOMQVIST, P.; ARSHADI, M.; VALENCIA-REYES, E.; MELIN, S.; HOWES, P.; WHEELER, P.; BAXTER, D.; NIKOLAISEN, L. (2013): Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding. IEA Bioenergy, Niederland, Joint publication of Tasks 32, 36, 37, 40. 86 Seiten.
- [25] KOOP, D. (2015): Betrügern auf der Spur. Energie aus Pflanzen, Nr. 2, S. 9–11
- [26] KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K.; DIETZ, E.; TUROWSKI, P.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2015): Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Berichte aus dem TFZ, Nr. 40. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), 316 Seiten, ISSN 1614-1008

- [27] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2015): The effect of raw material and machine setting on chipping performance and fuel quality – a German case study. *International Journal of Forest Engineering*, Jg. 26, Nr. 1, S. 60–70
- [28] LAUNHARDT, T.; PONTIUS, P.; STREHLER, A.; HURM, R.; MEIERING, A. G. (1995): Prüfung des Emissionsverhaltens von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und Entwicklung feuerungs- und regelungstechnischer Bauteile zur Verbesserung der Feuerungsqualität. Endbericht der Landtechnik Weihenstephan. Reihe Materialien, Nr. 109. München: Landtechnik Weihenstephan (LTW), 298 Seiten
- [29] NIEMZ, P., BÄCHLE, F., SONDEREGGER, W. (2000) Holztechnologie I: Holzbe- und Verarbeitung. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Holzwissenschaften (2000). URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:26435> (Stand 29.04.2015)
- [30] 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*, Nr. 26, S. 380–390
- [31] TRIPLAT, M.; KRAJNC, N. (2014): Schlechte Ware im Sack. Pellets – Markt und Trends, Nr. 02-14, S. 30–31
- [32] OBERNBERGER, I.; THEK, G. (2010): *The Pellet Handbook. The Production and Thermal Utilisation of Pellets*. London: Earthscan Publications, 549 Seiten, ISBN 978-1-84407-631-4
- [33] 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*, Nr. 26, S. 380–390
- [34] STIFTUNG WARENTEST (2009): Gut Holz. test Spezial, S. 90–93

Anhang

Tabelle 5: Einzelwerte des Pelletscreenings – Aschegehalt, Heizwert, Wassergehalt, Schüttdichte, Feinanteil, mechanische Festigkeit

Nr.	Aschegehalt	Heizwert	Wassergehalt	Schüttdichte	Feinanteil	Mechanische Festigkeit
	[m.-%]	[MJ/kg (wf)]	[m.-%]	[kg/m ³]	[m.-%]	[m.-%]
1	0,22	18,87	8,01	650	0,231	99,4
2	0,22	18,82	5,94	695	0,064	99,5
3	0,24	18,90	6,87	632	0,361	98,7
4	0,25	18,99	7,23	674	0,078	99,4
5	0,26	18,79	7,33	622	0,249	98,9
6	0,26	19,00	7,59	692	0,154	99,4
7	0,26	18,96	6,27	646	0,215	98,9
8	0,27	18,93	6,48	676	0,109	99,4
9	0,27	19,10	5,42	655	0,297	99,1
10	0,27	18,81	8,65	698	0,212	99,1
11	0,27	18,91	7,37	659	0,402	99,2
12	0,28	18,89	7,44	669	0,244	99,2
13	0,28	18,86	6,19	689	0,218	99,3
14	0,28	18,99	6,56	685	0,107	99,3
15	0,29	18,83	7,44	680	0,219	99,5
16	0,30	19,37	5,55	655	0,376	98,5
17	0,30	18,81	6,88	717	0,950	98,8
18	0,31	19,32	6,46	680	0,090	99,4
19	0,31	18,80	6,72	694	0,075	99,3
20	0,32	19,25	6,35	645	0,241	98,8
21	0,33	19,33	3,31	709	0,332	98,9

Nr.	Aschegehalt	Heizwert	Wasser- gehalt	Schütt- dichte	Feinanteil	Mechani- sche Festig- keit
	[m.-%]	[MJ/kg (wf)]	[m.-%]	[kg/m ³]	[m.-%]	[m.-%]
22	0,33	18,83	6,80	650	0,186	98,9
23	0,33	18,90	8,07	635	0,659	95,7
24	0,33	19,16	5,14	675	0,416	99,0
25	0,34	19,09	6,35	627	0,643	99,1
26	0,34	19,23	4,86	662	0,664	99,3
27	0,34	18,68	7,61	640	0,593	98,1
28	0,35	18,90	7,74	642	0,132	99,3
29	0,37	19,05	6,55	695	0,888	98,6
30	0,37	18,86	8,84	616	1,101	99,1
31	0,38	18,84	6,34	673	0,138	99,4
32	0,38	18,93	6,65	660	0,114	99,1
33	0,40	19,02	7,61	659	0,565	99,1
34	0,40	18,77	7,32	656	0,323	99,0
35	0,42	18,88	6,72	666	0,106	99,3
36	0,42	18,79	7,28	691	0,121	99,2
37	0,43	19,19	6,37	642	0,477	99,0
38	0,44	19,13	5,89	648	0,226	98,9
39	0,44	18,98	10,75	599	5,732	96,9
40	0,50	18,80	5,79	668	0,124	99,3
41	0,52	18,86	6,63	663	0,184	98,9
42	1,00	18,76	8,76	636	0,333	98,5

Tabelle 6: Einzelwerte des Pelletscreenings – Rohdichte, mittlere Länge, maximale Länge, Durchmesser und Härte

Nr.	Rohdichte	Mittlere Länge	Max. Länge	Durchmesser	Härte
	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]
1	1,23	12,59	23,58	6,03	43
2	1,31	15,00	18,50	6,10	54
3	1,25	16,92	24,49	6,14	64
4	1,28	13,81	25,85	6,07	40
5	1,26	14,79	26,14	6,11	59
6	1,28	13,00	33,77	6,06	40
7	1,26	14,26	28,76	6,11	63
8	1,34	16,35	30,72	6,05	61
9	1,29	7,57	32,71	6,05	62
10	1,29	13,76	39,66	6,07	49
11	1,27	15,06	14,73	6,09	60
12	1,26	12,43	18,57	6,06	61
13	1,29	13,51	31,51	6,07	70
14	1,29	13,84	28,71	6,06	63
15	1,27	12,64	25,89	6,12	48
16	1,26	15,12	31,16	6,20	59
17	1,30	15,81	29,99	6,04	50
18	1,30	14,28	25,88	6,61	59
19	1,26	12,77	23,81	6,22	46
20	1,28	14,86	22,59	6,14	61
21	1,33	10,48	23,08	6,07	59
22	1,26	14,82	24,44	6,09	62
23	1,28	8,57	24,27	6,27	48
24	1,32	13,54	28,74	6,62	49

Nr.	Rohdichte	Mittlere Länge	Max. Länge	Durchmesser	Härte
	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]
25	1,29	7,72	27,38	6,15	66
26	1,28	11,10	24,03	6,57	67
27	1,26	14,23	26,21	6,00	69
28	1,27	13,44	22,81	6,12	68
29	1,30	11,72	33,51	8,16	56
30	1,25	16,61	25,70	6,07	71
31	1,26	17,06	28,50	6,05	54
32	1,26	12,44	24,32	6,12	61
33	1,29	12,01	26,28	6,09	53
34	1,27	11,84	27,15	6,12	53
35	1,24	14,57	27,50	6,37	65
36	1,32	15,54	27,24	6,08	53
37	1,26	13,19	24,24	6,19	71
38	1,25	14,35	31,27	6,33	71
39	1,17	9,15	21,53	6,59	32
40	1,23	13,39	28,78	6,22	35
41	1,26	12,05	29,13	6,14	45
42	1,22	10,35	29,81	6,40	40

Tabelle 7: Einzelwerte des Pelletscreenings – Gehalt an C, H, O, N, S, Cl, Ca, K, Mg, Si; jeweils bezogen auf die Trockenmasse

Nr.	C	H	O	N	S	Cl	Ca	K	Mg	Si
	[Masse-%]						[mg/kg]			
1	50,5	6,2	43,3	0,09	< 0,005	< 0,005	750	350	98	< 100
2	50,3	6,2	43,5	0,08	< 0,005	< 0,005	530	580	96	< 100
3	50,7	6,1	43,2	0,08	< 0,005	< 0,005	990	360	110	332
4	50,8	6,2	43,0	0,10	< 0,005	< 0,005	830	370	120	< 100
5	51,0	6,1	42,9	0,10	< 0,005	0,025	940	440	120	< 100
6	51,0	6,1	42,9	0,11	< 0,005	< 0,005	830	360	140	< 100
7	50,5	6,2	43,3	0,09	< 0,005	0,012	600	680	100	< 100
8	50,9	6,1	43,0	0,10	0,009	0,008	720	520	130	123
9	51,1	6,1	42,8	0,08	< 0,005	0,010	770	420	130	380
10	50,7	6,1	43,2	0,09	< 0,005	< 0,005	620	630	110	519
11	51,3	6,2	42,5	0,08	0,032	< 0,005	750	400	130	< 100
12	50,1	6,1	43,8	0,09	< 0,005	< 0,005	700	440	130	209
13	50,3	6,2	43,5	0,10	0,005	< 0,005	630	570	110	< 100
14	50,5	6,2	43,3	0,09	< 0,005	0,007	720	600	130	< 100
15	50,3	6,2	43,5	0,09	< 0,005	0,006	800	410	100	< 100
16	51,1	6,2	42,7	0,08	0,006	< 0,005	690	370	150	141
17	50,6	6,2	43,2	0,25	0,005	< 0,005	630	570	95	< 100
18	51,4	6,2	42,4	0,10	< 0,005	< 0,005	530	510	210	177
19	50,7	6,2	43,1	0,20	< 0,005	< 0,005	690	550	99	< 100
20	51,0	6,2	42,8	0,07	< 0,005	< 0,005	720	540	130	< 100
21	51,3	6,2	42,5	0,10	0,006	< 0,005	790	430	160	412
22	50,9	6,1	43,0	0,09	0,007	< 0,005	980	440	120	150
23	51,0	6,2	42,8	0,08	0,005	0,009	810	460	160	142
24	51,1	6,2	42,7	0,07	0,005	0,007	800	380	240	275

Nr.	C	H	O	N	S	Cl	Ca	K	Mg	Si
	[Masse-%]						[mg/kg]			
25	51,0	5,6	43,4	< 0,05	0,024	0,017	840	480	130	205
26	51,1	6,2	42,7	0,08	< 0,005	< 0,005	820	400	160	127
27	50,3	6,1	43,6	0,08	0,011	0,009	640	640	110	114
28	50,7	6,2	43,1	0,10	< 0,005	< 0,005	730	680	130	< 100
29	50,9	6,1	43,0	0,08	0,006	0,016	1.360	550	190	278
30	50,7	6,0	43,3	0,09	0,007	< 0,005	960	660	120	142
31	50,4	6,2	43,4	0,15	< 0,005	< 0,005	880	620	110	165
32	50,6	6,2	43,2	0,09	0,007	< 0,005	820	450	140	< 100
33	51,4	6,1	42,5	0,08	< 0,005	0,010	1.210	630	170	< 100
34	50,3	6,2	43,5	0,10	0,007	0,011	750	700	140	112
35	50,3	6,1	43,6	0,10	0,006	< 0,005	900	610	190	136
36	50,7	6,1	43,2	0,10	< 0,005	< 0,005	840	800	130	224
37	50,9	6,2	42,9	0,08	0,005	0,030	870	360	130	295
38	51,1	5,5	43,4	0,06	0,011	0,008	730	600	150	553
39	51,5	6,0	42,5	0,17	0,037	0,019	970	280	190	< 100
40	49,7	6,1	44,2	0,25	< 0,005	0,005	1.050	900	210	< 100
41	50,0	6,1	43,9	0,09	< 0,005	< 0,005	1.200	560	210	477
42	50,6	6,1	43,3	0,11	< 0,005	0,013	1.300	880	150	1840

Tabelle 8: Einzelwerte des Pelletscreenings – Gehalt an As, Pb, Cd, Cr, Cu, Na, Ni, Hg, Zn; jeweils bezogen auf die Trockenmasse

Nr.	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Na	Ni	Hg	Zn
	[mg/kg]								
1	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	14	< 1	< 0,07	10
2	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
3	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
4	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
5	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	13	< 1	< 0,07	10
6	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
7	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	21	< 1	< 0,07	12
8	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1	21	< 1	< 0,07	5
9	< 0,8	< 2	< 0,2	1	< 1	48	< 1	< 0,07	10
10	< 0,8	< 2	0,3	11	1	< 10	3	< 0,07	13
11	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	19	< 1	< 0,07	8
12	< 0,8	< 2	0,4	3	< 1	< 10	< 1	< 0,07	15
13	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	13	< 1	< 0,07	7
14	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
15	< 0,8	< 2	0,3	< 1	< 1	31	< 1	< 0,07	15
16	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	7
17	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	19	< 1	< 0,07	10
18	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1	43	< 1	< 0,07	10
19	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	8
20	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	9
21	< 0,8	< 2	0,4	5	4	17	< 1	< 0,07	9
22	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	11
23	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	19	< 1	< 0,07	15
24	< 0,8	< 2	< 0,2	1	2	33	< 1	< 0,07	8

Nr.	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Na	Ni	Hg	Zn
	[mg/kg]								
25	< 0,8	< 2	< 0,2	1	< 1	26	< 1	< 0,07	11
26	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	8
27	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	34	< 1	< 0,07	13
28	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1	17	< 1	< 0,07	9
29	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	16	< 1	< 0,07	12
30	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1	< 10	< 1	< 0,07	12
31	< 0,8	< 2	< 0,2	1	< 1	16	< 1	< 0,07	11
32	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	23	< 1	< 0,07	9
33	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	19
34	< 0,8	< 2	< 0,2	1	1	46	< 1	0,09	12
35	< 0,8	< 2	0,2	< 1	< 1	12	< 1	< 0,07	10
36	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	1	22	< 1	< 0,07	10
37	< 0,8	< 2	0,3	1	< 1	< 10	< 1	< 0,07	29
38	< 0,8	< 2	< 0,2	3	1	45	< 1	< 0,07	7
39	< 0,8	< 2	< 0,2	3	1	79	< 1	< 0,07	6
40	< 0,8	< 2	< 0,2	< 1	< 1	32	< 1	< 0,07	15
41	< 0,8	< 2	< 0,2	2	1	< 10	< 1	< 0,07	12
42	< 0,8	< 2	< 0,2	6	3	53	3	< 0,07	13

Tabelle 9: Anforderungen an Holzpellets der Qualitätsstufe A1 laut einschlägiger Normen und möglicher Zertifizierungen (Stand Oktober 2015). wf = wasserfrei, an = im Anlieferungszustand, m.-% = Masseprozent, k. A. = keine Angaben, Fettdruck = Änderung gegenüber 2014

Eigenschaftsklasse	DIN EN ISO 17225-2 A1	DINplus	ENplus A1
Herkunft und Quelle	Stammholz, chemisch unbehandelte Holzurückstände	k. A.	Stammholz, chemisch unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie
Durchmesser d [mm]	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1	6 ± 1 oder 8 ± 1
Länge l [mm]	3,15 ≤ l ≤ 40	3,15 ≤ l ≤ 40	3,15 ≤ l ≤ 40
Wassergehalt [m.-%]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Aschegehalt (wf) [m.-%]	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7
Mech. Festigkeit [m.-%]	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 98
Feinanteil [m.-%]	≤ 1,0	≤ 1,0 (Schüttgut) ≤ 0,5 (Sackware bis 20 kg)	≤ 1,0 ≤ 0,5 (Sackware, versiegelte Big-Bags)
Additive (wf) [m.-%]	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 Art und Menge sind anzugeben	≤ 2
Heizwert H _u (an) [MJ/kg]	≥ 16,5	≥ 16,5	≥ 16,5
Schüttdichte (an) [kg/m ³]	≥ 600	600 ≤ x ≤ 750	600 ≤ x ≤ 750
Stickstoff (wf) [m.-%]	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3
Schwefel (wf) [m.-%]	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04
Chlor (wf) [m.-%]	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02
Arsen (wf) [mg/kg]	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cadmium (wf) [mg/kg]	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Kupfer (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Blei (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Quecksilber (wf) [mg/kg]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel (wf) [mg/kg]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zink (wf) [mg/kg]	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Ascheschmelzverhalten [°C]	Sollte angegeben werden	Erweichungstemperatur ≥ 1 200	Erweichungstemperatur ≥ 1 200

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

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

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbau szenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenölsauglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 – Absenkung der Gehalte an Calcium, Magnesium und Phosphor
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe

