

55

Berichte aus dem TFZ

# Lagerung von Holzhackschnitzeln

## Trockenmasseverluste, Änderungen der Brennstoffqualität und Kosten

Projektpartner:

**LWF** Bayerische Landesanstalt  
für Wald und Forstwirtschaft





## Lagerung von Holzhackschnitzeln





## Lagerung von Holzhackschnitzeln

**Trockenmasseverluste, Änderungen der  
Brennstoffqualität und Kosten**

Nicolas Hofmann  
Theresa Mendel  
Dr. Daniel Kuptz  
Fabian Schulmeyer  
Dr. Herbert Borchert  
Dr. Hans Hartmann

**Berichte aus dem TFZ 55**

**Straubing und Freising-Weihenstephan,  
November 2017**

Titel:	Lagerung von Holzhackschnitzeln	
Projektleiter:	Dr. Hans Hartmann (TFZ)	Fabian Schulmeyer (LWF)
Autoren:	Theresa Mendel (TFZ) Dr. Daniel Kuptz (TFZ) Dr. Hans Hartmann (TFZ)	Nicolas Hofmann (LWF) Fabian Schulmeyer (LWF) Dr. Herbert Borchert (LWF)
Mitarbeiter:	Albert Maierhofer (TFZ) Anja Rocktäschel (TFZ) Mirjana Bubalo Ivanisevic (TFZ) Jens Enke (TFZ) Benedikt Haas (TFZ) Alexander Marks (TFZ) Stephan Winter (TFZ) Thomas Kießlinger (TFZ) Simon Lesche (TFZ) Andreas Lermer (TFZ)	Martin Högl (LWF) Stefan Schuster (LWF) Dr. Uwe Blum (LWF) Irmgard Kern (LWF) Constanze Hartmann (LWF) Elisabeth Solic (LWF) Elisabeth Rabenbauer (LWF) Sabrina Zimmermann (LWF) Georg Dischner (LWF) Dominic de Hasque (LWF)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) unter dem Förderkennzeichen EW/13/53 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.01.2014 bis 30.06.2016. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2017

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

Alle Rechte vorbehalten.

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

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

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)  
Schulgasse 18, 94315 Straubing  
E-Mail: [poststelle@tfz.bayern.de](mailto:poststelle@tfz.bayern.de)  
Internet: [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)

Redaktion: Theresa Mendel, Nicolas Hofmann, Fabian Schulmeyer, Dr. Daniel Kuptz  
Verlag: Eigenverlag  
Erscheinungsort: Straubing & Freising-Weihenstephan  
Erscheinungsjahr: 2017  
Gestaltung: Mendel, Hofmann, Schulmeyer, Kuptz  
Fotonachweis: Mendel, Hofmann, Schulmeyer, Kuptz

## Danksagung

Der vorliegende Bericht „Qualitätserhaltende Hackschnitzzellagerung“ umfasst die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen, die über den Zeitraum von knapp drei Jahren gemeinsam durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) gesammelt wurden.

Die Planung und Umsetzung dieser Untersuchungen wären ohne die produktive Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. (BaySF) nicht möglich gewesen. Wir bedanken uns ganz besonders bei Herrn Bernd Wachsmann für die sehr gute Unterstützung und den intensiven fachlichen Austausch.

Besonderer Dank gilt Herrn Konrad Breitenhuber und seinem Team des Biomassehofs Breitenhuber für die Bereitstellung der Lagerflächen, die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Feldversuche und die dauerhafte Bereitschaft für die Probenziehungen.

Weiterhin bedanken wir uns bei Herrn Manfred Faltermeier für seine Unterstützung auf vielfache Art und Weise: für die Brennstofflieferungen bei den Vorversuchen, den Behälterversuchen und der KWF-Tagung und für die Unterstützung bei den Vorversuchen zur Bilanzbeutelstabilität.

Des Weiteren bedanken wir uns bei der Stadtgärtnerei Straubing, den Teilnehmern des Methodenworkshops und den Ansprechpartnern für Holzenergie der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AELF) für die Unterstützung und Beteiligung am Planungsprozess der Untersuchungen.

Die Studie wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) unter dem Förderkennzeichen EW/13/53 gefördert.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>11</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>21</b>
<b>2 Problemstellung .....</b>	<b>23</b>
<b>3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit .....</b>	<b>25</b>
<b>4 Stand des Wissens.....</b>	<b>27</b>
4.1 Holzhackschnitzel – Definitionen und Verwendung .....	27
4.2 Holzhackschnitzel – Qualität .....	27
4.3 Waldhackschnitzel – Bereitstellung .....	30
4.4 Lagerung von Hackschnitzeln.....	31
4.4.1 Arten der Lagerung.....	31
4.4.1.1 Lagerung im Freien .....	32
4.4.1.2 Lagerung in Gebäuden.....	32
4.4.1.3 Lagerung vor dem Hacken .....	33
4.4.2 Risiken bei der Lagerung.....	33
4.4.2.1 Qualitäts- und Verlustrisiko.....	33
4.4.2.2 Weitere Risiken bei der Lagerung .....	35
<b>5 Lagerungspraxis in Bayern.....</b>	<b>37</b>
5.1 Hackschnitzellagerung im Privat- und Körperschaftswald.....	37
5.1.1 Methode.....	37
5.1.2 Ergebnisse.....	38
5.1.3 Diskussion .....	41
5.2 Hackschnitzellagerung im Staatswald .....	44
<b>6 Methodenentwicklung für Lagerungsversuche .....</b>	<b>47</b>
6.1 Methoden bisher durchgeführter Studien zur Lagerung.....	47
6.2 Vorversuche zu Freilandversuchen.....	48
6.3 Vorversuche zu den Behälterversuchen.....	52
6.4 Zusammenfassung wichtigster Erkenntnisse zur Entwicklung des Versuchsdesigns von Feld- und Behälterversuchen.....	54
<b>7 Freilandversuche.....</b>	<b>55</b>
7.1 Material und Methoden .....	55
7.1.1 Versuchsdesign und Versuchsdurchführung.....	55
7.1.1.1 Aufbau und Probenahme der Lagermieten und Polter .....	57
7.1.1.2 Probenaufbereitung .....	60

7.1.2	Bilanzierung der Trockenmasseverluste .....	61
7.1.3	Brennstoffanalysen .....	62
7.1.3.1	Wassergehalt und Schüttdichte .....	63
7.1.3.2	Aschegehalt und Heizwert .....	63
7.1.3.3	Sieb- und Bildanalyse .....	64
7.1.4	Statistische Auswertungen.....	66
<b>7.2</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>67</b>
7.2.1	Charakterisierung des Ausgangsmaterials .....	67
7.2.2	Wetterbedingungen während der Lagerung .....	68
7.2.3	Mietentemperatur .....	70
7.2.4	Wassergehaltsänderung .....	72
7.2.5	Trockenmasseverluste .....	75
7.2.6	Schichtbildung.....	79
7.2.7	Aschegehalt .....	81
7.2.8	Heizwert, Schüttdichte und Energiedichte .....	84
7.2.9	Nutzbarer Energieinhalt .....	88
7.2.10	Partikelgrößenverteilung und Partikelform.....	90
7.2.11	Vergleich mit der Lagerung ungehackt in Poltern .....	94
<b>7.3</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>96</b>
7.3.1	Trockenmasseverluste, Energieänderungen und Schichtbildung.....	96
7.3.2	Qualitätsveränderungen.....	97
7.3.3	Methodendiskussion .....	98
7.3.4	Schlussfolgerungen und abschließende Bewertung.....	99
<b>8</b>	<b>Behälterversuche .....</b>	<b>101</b>
<b>8.1</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>101</b>
8.1.1	Verwendete Hackschnitzelsortimente .....	102
8.1.2	Versuchsdesign und Probenvorbereitung .....	103
8.1.3	Kontinuierliche Messungen während der Lagerung .....	104
8.1.4	Messungen bei der Ein- und Auslagerung der Hackschnitzel .....	104
8.1.5	Statistische Auswertung.....	106
<b>8.2</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>106</b>
8.2.1	Charakterisierung des Ausgangsmaterials .....	106
8.2.2	Klimaparameter und Gewichtsänderungen.....	107
8.2.3	Entwicklung der Hackschnitzeltemperatur .....	109
8.2.4	Trockenmasseverluste und Wassergehaltsänderungen.....	111
8.2.5	Vergleich der Ergebnisse mit den Freilandversuchen .....	113
<b>8.3</b>	<b>Zusammenfassung und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Freilandversuche .....</b>	<b>114</b>
<b>9</b>	<b>Analyse der Kosten der Hackschnitzellagerung .....</b>	<b>117</b>
<b>9.1</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>117</b>
9.1.1	Definition von Szenarien .....	117
9.1.1.1	Szenario L: Land- und forstwirtschaftlicher Betrieb .....	118
9.1.1.2	Szenario H: Biomasse-Händler.....	119
9.1.2	Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel.....	120
9.1.3	Einbindung der Lagerungsprozesse .....	120
<b>9.2</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>124</b>

---

9.2.1	Szenario L: Land- und forstwirtschaftlicher Betrieb .....	124
9.2.1.1	Direkt mit der Lagerung verbundene Kosten .....	124
9.2.1.2	Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel .....	125
9.2.1.3	Lagerungsprozesse .....	126
9.2.1.4	Kostenübersicht Szenario L und Bewertung .....	127
9.2.2	Szenario H: Biomasse-Händler .....	129
9.2.2.1	Direkt mit der Lagerung verbundene Kosten .....	129
9.2.2.2	Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel .....	131
9.2.2.3	Lagerungsprozesse .....	132
9.2.2.4	Kostenübersicht Szenario H und Bewertung .....	134
<b>9.3</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>Gesamtzusammenfassung .....</b>	<b>139</b>
<b>11</b>	<b>Abstract .....</b>	<b>143</b>
<b>12</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>153</b>
<b>13.1</b>	<b>Anhang A – Lagerungspraxis in Bayern .....</b>	<b>153</b>
<b>13.2</b>	<b>Anhang B – Freilandversuche .....</b>	<b>156</b>
<b>13.3</b>	<b>Anhang C – Behälterversuche .....</b>	<b>164</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typisches Verfahren der Hackschnitzelbereitstellung .....	30
Abbildung 2:	Häufigkeit, mit der die verschiedenen Akteure in Bayern in die Hackschnitzellagerung involviert sind .....	39
Abbildung 3:	Lagerungsarten für Waldhackschnitzel hinsichtlich Regenschutz, Haufenform und Untergrund .....	40
Abbildung 4:	Vorversuchsmiete am Betriebshof des TFZ (a) mit den drei Beprobungsvarianten: Bilanzbeutel (b), Beprobung einer Mietenschicht im Schüttwinkel (Schicht, c), Beprobung eines horizontalen Segments (Gestell-Schicht, d) .....	49
Abbildung 5:	Aufbau eines Bilanzbeutels .....	50
Abbildung 6:	Schematischer Aufbau der Vorversuchsmiete .....	51
Abbildung 7:	Leerer (links) und mit Hackschnitzeln befüllter Behälter (rechts) mit einem Füllvolumen von 610 l, einer Isolierung und eingebauten Temperatursensoren .....	53
Abbildung 8:	Lagerplatz mit den 4 verschiedenen Hackschnitzelmieten à ca. 200 Srm; rechts die Mieten aus Waldrestholz hackschnitzeln, links die Mieten aus Energierundholz hackschnitzeln .....	56
Abbildung 9:	Ungehacktes Energierundholz (links) und Waldrestholz (rechts) zum Vergleich mit der Lagerung in Form von Hackschnitzeln .....	57
Abbildung 10:	Homogenisierung der Hackschnitzel mit dem Radlader zur Gewinnung von einheitlichem Probenmaterial zur Befüllung der Bilanzbeutel .....	58
Abbildung 11:	Probenahmepunkte (schwarze Kästchen) mit verschiedenen Entnahmezeitpunkten (a, b, c, d) und Messwiederholungen (3 Segmente) .....	59
Abbildung 12:	Probenverteilung nach Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht, Kernzone) in den Lagermieten .....	60
Abbildung 13:	Probenahme und Probenaufbereitung für anschließende Analysemethoden .....	61
Abbildung 14:	Messverfahren der Bildanalyse und Beispiele für den Kornformfaktor; $A$ = minimaler Feret, $B$ = maximale Partikellänge, $U$ = Partikelumfang, $U'$ = Umfang eines flächengleichen Kreises [61] .....	65
Abbildung 15:	Niederschlag (Tagessummen), Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (Tagesmittelwerte) während des Winterversuchs .....	69
Abbildung 16:	Niederschlag (Tagessummen), Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (Tagesmittelwerte) während des Sommersversuchs .....	69
Abbildung 17:	Mietentemperatur (Durchschnitt der Tagesmittelwerte aus 0,5; 1,5 und 2,5 m Messhöhe) und Lufttemperatur während des Winterversuchs .....	70

---

Abbildung 18: Mietentemperatur (Durchschnitt der Tagesmittelwerte aus 0,5; 1,5 und 2,5 m Messhöhe) und Lufttemperatur während des Sommersversuchs .....	71
Abbildung 19: Mittlere absolute Änderung des Wassergehalts während des Winterversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel). .....	74
Abbildung 20: Mittlere absolute Änderung des Wassergehalts während des Sommersversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel). .....	74
Abbildung 21: Lineare Regression (Energierundholz hackschnitzel, Er-HS: $p = 0,09$ , Waldrestholz hackschnitzel, Wrh-HS: $p < 0,001$ ) der Trockenmasseverluste und Mietentemperaturen während des Winter- und Sommersversuchs.....	77
Abbildung 22: Mittlere Trockenmasseverluste während des Winterversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel). .....	78
Abbildung 23: Mittlere Trockenmasseverluste während des Sommersversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel). .....	78
Abbildung 24: Bildung von signifikant ( $p \leq 0,05$ , Dunn's Test (WG, links) bzw. Scheffé-Test (TM-Verlust, rechts)) unterschiedlichen Schichten in den Hackschnitzelmieten – am häufigsten eingetretene Fälle.....	80
Abbildung 25: Mittlerer Aschegehalt ( $w_f$ , $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel).....	82
Abbildung 26: Mittlerer Aschegehalt ( $w_f$ , $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Sommersversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel).....	82
Abbildung 27: Lineare Regression (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel; $p \leq 0,05$ ) der Aschegehalte und Heizwerte während des Winter- und Sommersversuchs.....	85
Abbildung 28: Mittlere Heizwerte ( $w_f$ , $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel).....	86
Abbildung 29: Mittlere Heizwerte ( $w_f$ , $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Sommersversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel).....	86

Abbildung 30: Veränderung des nutzbaren Energieinhalts (Einlagerung = 100 %) während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel) .....	89
Abbildung 31: Veränderung des nutzbaren Energieinhalts (Einlagerung = 100 %) während der Sommersversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel) .....	89
Abbildung 32: Waldrestholz hackschnitzel (a) und Energierundholz hackschnitzel (b).....	90
Abbildung 33: Veränderung des Anteils an den Siebfractionen im Winterversuch (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel, SD = Standardabweichung).....	92
Abbildung 34: Veränderung des Anteils an den Siebfractionen im Sommersversuch (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel, SD = Standardabweichung).....	92
Abbildung 35: Behälterversuche – Aufbau der Lagerbehälter .....	102
Abbildung 36: Untersuchte Hackschnitzelsortimente: Energierundholz aus Fichte (1) und Buche (2), Waldrestholz aus Nadel- (3) und Laubholz (4) und Pappelholz aus dem Kurzumtrieb (5) .....	102
Abbildung 37: Siebung (a) und Homogenisierung (b) der Hackschnitzelsortimente ....	103
Abbildung 38: Kontinuierliche Messungen (a: Wiegen der Behälter; b: Temperaturmessungen in den Behältern) .....	104
Abbildung 39: Entleeren des Behältermaterials (a) und anschließende Homogenisierung und Probenteilung (b, c) der Hackschnitzel nach der Lagerung.....	105
Abbildung 40: Sättigungsdefizit der Luft, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte während der gesamten Lagerdauer von 23 Wochen .....	108
Abbildung 41: Lineare Regression ( $p = 0,0086$ , SD = Standardabweichung) des mittleren Sättigungsdefizits der Luft und der Gewichtsverluste pro Woche.....	108
Abbildung 42: Entwicklung der Hackschnitzeltemperatur in den Behältern während der Lagerung.....	110
Abbildung 43: Lineare Regression zwischen dem Anteil der Partikel mit einer Größe $\leq 3,15$ mm ( $p = 0,0036$ ) bzw. 8 mm ( $p = 0,0019$ ) und der Temperaturdifferenz ( $\Delta$ = Behältertemperatur - Lufttemperatur).....	111
Abbildung 44: Lineare Regression ( $p = 0,0006$ ) des Wassergehalts der Hackschnitzel bei Einlagerung (0 Wochen) der Hackschnitzel und der Trockenmasseverluste der Hackschnitzel bei Auslagerung (23 Wochen).....	113
Abbildung 45: Extrapolation der Wassergehaltsverläufe der Hackschnitzelmieten für die 10-monatige Lagerung in Szenario L (Eine mögliche Wiederbefeuchtung im Herbst/ Winter ist hierbei nicht berücksichtigt.).....	122

Abbildung 46: Extrapolation der Trockenmasseverlustverläufe der Hackschnitzelmieten für die 10-monatige Lagerung in Szenario L..... 122

Abbildung 47: Änderung des Ummantelungsgewichts der Bilanzbeutel bei Auslagerung im Vergleich zur Einlagerung in Abhängigkeit des Wassergehalts der Hackschnitzel bei Auslagerung ..... 156

Abbildung 48: Verkürzte Miete zur Ermittlung von Materialein- und -austrag bei der Probenahme..... 157

Abbildung 49: Ausreißeridentifizierung nach der zweifachen Standardabweichung, markiert durch die vertikalen Whisker. Je ein Ausreißer am oberen Ende beim Trockenmasseverlust von Miete 1 und 2 in der Zwischenschicht zur dritten Probenahme ..... 158

Abbildung 50: Fallstudie: Homogenisierung der Hackschnitzel vom Lagerplatz zum Container anhand des Wassergehalts ..... 163



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifikation von klassifizierten Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225–4 (Auszug, wf = auf wasserfreier Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand; englisch: „as received“) [32].....	28
Tabelle 2:	Partikelgrößenverteilung von klassifizierten Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [32] .....	29
Tabelle 3:	Übersicht über gemessene Wassergehaltsänderungen, Mietentemperaturen und Trockenmasse(TM)-verluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln .....	34
Tabelle 4:	Gemessene Durchschnittswerte (Mittelwert ±Standardabweichung) der Behältervorversuche und Vergleich der drei untersuchten Lagerungsorte nach zwei Monaten Lagerdauer .....	53
Tabelle 5:	Versuchsdesign mit den unterschiedlichen Varianten bei den Freilandversuchen sowohl bei der Winter- als auch bei der Sommerlagerung .....	56
Tabelle 6:	Übersicht über die Bestimmungsverfahren der Brennstoffeigenschaften .....	62
Tabelle 7:	Mittlerer Wassergehalt, Feinanteil ( $\leq 3,15$ mm Partikellänge), Partikelfraktion $\leq 8$ mm, Aschegehalt und Heizwert der Hackschnitzel in den Bilanzbeuteln vor der Lagerung ( $\pm$ Standardabweichung).....	67
Tabelle 8:	Durchschnittstemperatur ( $^{\circ}$ C) der Hackschnitzelmieten (Mittelwerte der drei Sensoren je Miete) .....	72
Tabelle 9:	Mittlerer Wassergehalt (m-%) nach 5 Monaten Lagerung ( $\pm$ Standardabweichung).....	72
Tabelle 10:	Signifikante ( $p \leq 0,05$ ) Effekte der verschiedenen Faktoren (1–4) auf die Änderung des Wassergehalts während der Hackschnitzellagerung (mehrfaktorielle ANOVA).....	73
Tabelle 11:	Durchschnittliche Trockenmasseverluste (m-%) nach 5 Monaten Lagerdauer ( $\pm$ Standardabweichung) .....	75
Tabelle 12:	Signifikante ( $p \leq 0,05$ ) Effekte der verschiedenen Faktoren (1–4) auf die Trockenmasseverluste während der Hackschnitzellagerung (mehrfaktorielle ANOVA) .....	76
Tabelle 13:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmiete während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	80
Tabelle 14:	Heizwert, Schüttdichte, Energiedichte und Energieinhalt der Lagermieten nach fünf Monaten Lagerung (absolute Veränderung im Vergleich zur Einlagerung; ar: "as received", d. h. im Anlieferungszustand) .....	87

---

Tabelle 15:	Formparameter Kornformfaktor (KFF) und Rauigkeit (RAU) der Hackschnitzel (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel) bei Auslagerung und ihre Veränderungen im Vergleich zur Einlagerung ( $\Delta$ ).....	93
Tabelle 16:	Brennstoffqualität zum Zeitpunkt der Auslagerung und Qualitätsveränderungen ( $\Delta$ ) der ungehackten Polter (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, x = aufgrund von Messfehlern zu verwerfende Werte, Angabe erfolgt nur zur Vollständigkeit).....	94
Tabelle 17:	Klassifizierung der Sortimente nach DIN EN ISO 17225–4 bei Ein- und Auslagerung (n. k. = nicht klassifizierbar) .....	97
Tabelle 18:	Bewertung der in den Freilandversuchen für die Parameter Trockenmasse, Wassergehalt und nutzbarer Energieinhalt ermittelten Änderungen .....	99
Tabelle 19:	Zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse aus den Freilandversuchen.....	100
Tabelle 20:	Charakterisierung des Ausgangsmaterials der Behälterversuche (Mittelwerte, $\pm$ Standardabweichung, n = 3; n. k. = nicht klassifizierbar) .....	106
Tabelle 21:	Durchschnittliche Hackschnitzeltemperatur und Differenz zur Lufttemperatur .....	109
Tabelle 22:	Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung, SD) und Trockenmasseverlust (TM) am Ende der Lagerung und Veränderung des Wassergehalts im Vergleich zur Einlagerung ( $\Delta$ absolut).....	112
Tabelle 23:	Vergleich der Trockenmasse(TM)-Verluste und Wassergehaltsänderungen von Behälter- und Freilandversuchen .....	114
Tabelle 24:	Überblick über die Szenarien und Varianten in der ökonomischen Betrachtung.....	118
Tabelle 25:	Jährliche Kosten bei Bau eines neuen Lagerplatzes (120 m <sup>2</sup> ) in Variante L.n.0 und L.n.1 (Stand der Berechnung: September 2016)....	124
Tabelle 26:	Jährliche Kosten für Maschinen und Arbeitskräfte in Szenario L.....	125
Tabelle 27:	Herleitung des betriebsinternen Kostenwerts der Hackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung in Szenario L .....	126
Tabelle 28:	Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für Szenario L .....	127
Tabelle 29:	Übersicht über die Lagerungskosten für Szenario L. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung. ....	128
Tabelle 30:	Jährliche Kosten bei Bau eines Lagerplatzes in Szenario H .....	130
Tabelle 31:	Jährliche Maschinenkosten in Szenario H .....	131
Tabelle 32:	Zusätzliche Kosten beim Einsatz eines Schutzvlieses in Szenario H...	131

Tabelle 33:	Herleitung der Kosten der Hackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung in Szenario H.....	132
Tabelle 34:	Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.k.0 und H.k.1 (kurze Lagerdauer) in Szenario H.....	133
Tabelle 35:	Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.m.0 und H.m.1 (mittlere Lagerdauer) in Szenario H.....	133
Tabelle 36:	Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.l.0 und H.l.1 (lange Lagerdauer) in Szenario H.....	134
Tabelle 37:	Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.k.0 und H.k.1 (kurze Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.....	135
Tabelle 38:	Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.m.0 und H.m.1 (mittlere Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.....	135
Tabelle 39:	Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.l.0 und H.l.1 (lange Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.....	136
Tabelle 40:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% ±Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	159
Tabelle 41:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% ±Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	159
Tabelle 42:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% ±Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	159
Tabelle 43:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% ±Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	160
Tabelle 44:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% ±Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung.	

	Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	160
Tabelle 45:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	160
Tabelle 46:	Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	160
Tabelle 47:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	161
Tabelle 48:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	161
Tabelle 49:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	161
Tabelle 50:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	161
Tabelle 51:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	162
Tabelle 52:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	162
Tabelle 53:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten. ....	162

---

Tabelle 54:	Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-% ±Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmiete während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.....	162
-------------	---	-----



# 1 Einleitung

Die Verknappung fossiler Energieträger, aber auch die Klimaschutzziele der Bundesregierung zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen rücken die Nutzung erneuerbarer Energien immer mehr in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit [18]. Der Beitrag der regenerativen Energieträger stieg in den letzten Jahren deutlich an und deckt heute rund 12,5 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland (Stand Februar 2016) [20]. Im Bereich der erneuerbaren Energien stellt die Biomasse die wichtigste Säule dar; bei der Wärmebereitstellung liegt ihr Anteil sogar bei knapp 88 % [19] [20]. Hierbei dominiert die Nutzung von Holz [43]. Es ist der traditionellste unter den biogenen Festbrennstoffen und ist heutzutage in vielseitiger Form verfügbar, z. B. als Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets. Zudem stellt Holz durch seine Lagerfähigkeit einen Energiespeicher dar. Die Holzproduktion steigert die Wertschöpfung im ländlichen Raum und ist klimafreundlich [79]. Auch die Feuerungstechnik ist mittlerweile technisch ausgereift, und automatisch beschickte Zentralheizungen können mit ähnlich geringem Aufwand und Komfort betrieben werden wie Kessel für fossile Energieträger wie Heizöl oder Gas [57]. Als Folge ist die Nachfrage nach dem Brennstoff Holz in Bayern in den letzten zehn Jahren stark angestiegen [48] [61]. So konnte z. B. im privaten Sektor eine vermehrte Installation von Hackschnitzelheizungen beobachtet werden. Gleichzeitig erhöhte sich auch die Zahl der Biomasseheiz(kraft)werke innerhalb der letzten 13 Jahre in Deutschland um das Zehnfache [43]. Diese positive Entwicklung stagnierte in letzter Zeit etwas, v. a. aufgrund derzeitiger niedriger Ölpreise und der seit mehreren Jahren milden Witterungsverläufe in den Heizperioden.

Die Qualität des Brennstoffes gewinnt zunehmend an Bedeutung. Gerade Kleinfeuerungsanlagen sind für den störungsfreien Betrieb auf eine definierte, gleichbleibend hohe Brennstoffqualität angewiesen [44] [51] [75]. Diese Vorbedingung ist seit dem 01. Januar 2015 besonders wichtig, da deutlich schärfere Emissionsgrenzwerte für neu errichtete Zentralheizungs-Biomassefeuerungen gelten ( $0,4 \text{ g/Nm}^3$  für CO und  $0,02 \text{ g/Nm}^3$  für Staub, jeweils bei 13% O<sub>2</sub>) und bei den regelmäßigen Überprüfungen durch den Schornsteinfeger / die Schornsteinfegerin eingehalten werden müssen (Stufe 2 der ersten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes – 1. BImSchV) [44]. Niedrige CO- und Staubemissionen können nach aktuellem Stand der Technik dabei nur durch die optimale Abstimmung der Brennstoffqualität, der Anlagentechnik und des Benutzerverhaltens eingehalten werden [44] [57] [75].

Die nachhaltige Bereitstellung von qualitativ hochwertigen Holzbrennstoffen ist somit für den weiteren Ausbau der energetischen Holznutzung, aber auch für die Sicherung bestehender Anlagen ausschlaggebend. In Bayern werden jährlich fast fünf Millionen Schüttraummeter Waldhackschnitzel produziert [48]. Die Produktionsmengen sind in den letzten Jahren gestiegen. In den deutschen Wäldern kann dennoch eine Zunahme [48] des Holzvorrats festgestellt werden. Aus den Untersuchungen zur dritten Bundeswaldinventur [17] geht hervor, dass der Holzvorrat zwischen 2002 und 2012 um sieben Prozent auf  $336 \text{ m}^3$  pro Hektar anstieg. Einem jährlichen Zuwachs von  $11,2 \text{ m}^3$  pro Hektar standen Abgänge von  $9,8 \text{ m}^3$  gegenüber, wovon  $8,9 \text{ m}^3$  sowohl stofflich, als auch energetisch

genutzt wurden. Zu unterscheiden ist dabei jedoch zwischen dem jährlichen Zuwachs als theoretischem Nutzungspotenzial und dem tatsächlich technisch erschließbaren Holzpotenzial [48]. In Regionen mit intensiver Holznutzung wird dieses schon heute genutzt [17].

Aufgrund der begrenzten Holzverfügbarkeit hat eine nachhaltige und ressourceneffiziente Nutzung des Rohstoffes oberste Priorität. Gerade bei verhältnismäßig jungen Entwicklungen, wie der gestiegenen Bereitstellung von Waldhackschnitzeln, besteht noch viel Optimierungspotenzial zur weiteren Rationalisierung der Prozesskette [61]. Insbesondere die Lagerung von Waldhackschnitzeln ist ein wichtiger Teilprozess der Bereitstellungskette. Sie hat eine wichtige Funktion als Mengenpuffer [10]. Daneben kann die Lagerung eine Verbesserung der Qualität durch die Wassergehaltssenkung aufgrund natürlicher Trocknungsprozesse in großen Lagermieten ermöglichen [61] [51]. Jedoch kann es bei der Lagerung von frischem Hackgut mit einem hohen Wassergehalt zum Abbau organischer Substanz durch Mikroorganismen und gleichzeitig zu einer Verschlechterung von Brennstoffparametern kommen [68] [72]. Die Bildung von Pilzsporen kann dabei zu gesundheitlichen Belastungen führen [50]. Diese Prozesse führen zu einem Verlust von verfügbarer Brennstoffmenge und damit von nutzbarer Energie. Folglich können die Ressourceneffizienz und die Wirtschaftlichkeit der Hackschnitzelbereitstellung durch schlechte Lagerung sinken.



## 2 Problemstellung

Die steigende Nachfrage nach kostengünstigen Holzhackschnitzeln mit einer hohen Brennstoffqualität stellt die Brennstoffproduzenten vor viele Herausforderungen. Um eine gute Qualität von Hackschnitzeln zu gewährleisten, müssen optimale Bedingungen bei allen Prozessschritten der Bereitstellungskette vorherrschen. Die Lagerung spielt dabei eine zentrale Rolle, da bei einer unsachgemäßen Ausführung hohe Masse- und Qualitätsverluste auftreten können. Diese stellen ein relevantes wirtschaftliches Risiko dar.

In der Literatur trifft man auf eine Vielzahl unterschiedlicher Aussagen zu den Verlusten bei der Lagerung. HARTMANN [50] führt zum Beispiel Trockenmasseverluste zwischen 20 bis über 35 m-% im Jahr (d. h. zwischen 1,7 bis 2,5 m-% pro Monat) bei der Lagerung von feinem, frisch geerntetem Waldhackgut ohne Witterungsschutz an. Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) nennt Verlusten von 2 bis 4 m-% pro Monat [6]. SCHOLZ et al. [74] geben sogar Werte zwischen 0,5 und 10 m-% im Monat an. Die genannten Wertebereiche wurden jeweils aus Literaturanalysen abgeleitet.

Die großen Unterschiede zwischen den beschriebenen Verlusten lassen sich auf die mitunter sehr heterogenen Lagerungsbedingungen zurückführen. Diese werden durch das verwendete Rohmaterial, die Mietengröße, den Lagerungsort, die Lagerungsdauer, die Lagertechnik (z. B. mit oder ohne Abdeckung) und den Einlagerungszeitpunkt beeinflusst. Auch die sehr unterschiedliche Messmethodik bei Versuchen kann zu abweichenden Ergebnissen führen. Da bisher kein methodisch einheitliches Versuchsdesign zum Aufbau und zur Art der Beprobung an Hackschnitzellagermieten existiert, ist ein Vergleich bisheriger Studien zur Lagerung von Hackschnitzeln mit einer aussagekräftigen Bewertung der Ergebnisse schwierig. Viele der Beprobungsmethoden beinhalten große Messunsicherheiten, wodurch die Ergebnisse im Vergleich zu den realen Trockenmasseverlusten verfälscht sein können. Zudem verursacht die Probenahme häufig einen Eingriff in die Bedingungen in der Lagermiete, wodurch die Aussagekraft für die Lagerpraxis infrage gestellt sein kann.



### 3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung umfangreicher Verfahrensdaten zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln. Dabei sollten neben den Trockenmasseverlusten insbesondere die verschiedenen Wirkungen der Lagerung auf die Hackschnitzelqualität bestimmt werden. Zu den betrachteten Qualitätsparametern zählen der Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert und die Partikelgrößenverteilung sowie weitere Formparameter eines photooptischen Bildanalyseverfahrens. Das Vorhaben ergänzt ein zwischen den Jahren 2011 und 2014 bearbeitetes und in der Schriftenreihe des TFZ veröffentlichtes Forschungsvorhaben, das die Ermittlung von Verfahrenskenndaten und Einflussgrößen bei der Hackschnitzelproduktion und bei der Lagerbelüftung zum Inhalt hatte (Projekt „Optimale Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel“ (K/10/17) [61] [37]).

Die vorliegende Studie gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Erfassung und Bewertung bereits erprobter Methoden zur Untersuchung der Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Biomasse in großen Haufwerken (Kapitel 4)
- Erfassung der typischen Lagerbedingungen in der Praxis mittels einer Umfrage (Kapitel 5)
- Entwicklung eines Versuchsprogramms zur Bewertung der rohstoff- und aufbereitungsbedingten Einflussgrößen der Lagerfähigkeit (Kapitel 6)
- Durchführung von Praxisversuchen zur Lagerung von Hackschnitzeln und Energieholzsorimenten mit verschiedenen Materialvarianten, Lagertechniken und Jahreszeiten (Kapitel 7)
  - ungehacktes Material mit Nadeln/Laub
  - ungehacktes Material ohne Nadeln/Laub
  - gehacktes Material mit Nadeln/Laub
  - gehacktes Material ohne Nadeln/Laub
- Zusammenfassende Bewertung des Einflusses der Lagerung auf die Trockenmasseverluste und auf die Brennstoffqualität (siehe Abschnitt 7.3)
- Durchführung von Behälterversuchen zur Lagerung von Hackschnitzeln unter definierten Klimabedingungen (siehe Abschnitt 8)
- Analyse der Kosten der Hackschnitzelbereitstellung (siehe Abschnitt 9)



## 4 Stand des Wissens

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Verwendung, die Qualität und die Bereitstellung von Holzhackschnitzeln zusammenfassend beschrieben. Darauf folgt eine Darstellung unterschiedlicher Lagerungsarten für Holzhackschnitzel sowie mögliche Lager Risiken.

### 4.1 Holzhackschnitzel – Definitionen und Verwendung

Holzhackschnitzel sind eine Handelsform holzartiger Biomasse, welche durch das Schneiden mit scharfen Messern mittels Holzhammer auf eine typische Partikelgröße von 5 bis 100 mm zerkleinert wird [31]. Der Einsatzbereich von Holzhackschnitzeln umfasst sowohl die stoffliche als auch die energetische Nutzung. Sie dienen unter anderem als Rohstoff für die Papier- und Spanplattenproduktion, als Brennstoff für Biomasseheiz(kraft)werke und werden auch in kleineren Hackschnitzelheizungen im privaten Sektor verfeuert. Hackschnitzel zur energetischen Nutzung können aus Waldholz, Industrieholz, Altholz, Flur- und Siedlungsholz sowie aus Holz von Kurzumtriebsplantagen erzeugt werden [48] [31]. In den hier dargestellten Untersuchungen wurden vornehmlich Waldhackschnitzel betrachtet, daher beziehen sich auch die folgenden Kapitel zur Bereitstellung und Lagerung von Hackschnitzeln hauptsächlich auf Waldhackschnitzel.

### 4.2 Holzhackschnitzel – Qualität

Die große Bandbreite geeigneter Rohstoffe bedingt eine mögliche hohe Variation der Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln. Neben dem Rohmaterial hat v. a. der Herstellungsprozess, z. B. die verwendete Hackmaschine oder ausgewählte Maschineneinstellungen, wie die Messerschärfe und das Austragssystem, einen Einfluss auf die Brennstoffqualität [60]. Weitere Einflüsse sind die Arbeitsweise in der Vorkette (Fällen und Rücken des Holzes), der Erfahrungsgrad des Maschinenführers, die Lagerung des Holzes (gehackt und ungehackt) oder zusätzliche Aufbereitungsschritte am Biomassehof, z. B. die technische Trocknung mit der Abwärme von Biogasanlagen oder die Siebung. Kleinfeuerungsanlagen benötigen eine homogene und gleichbleibende Hackschnitzelqualität für einen effizienten und emissionsarmen Betrieb [68] [77] [60]. Eine hohe Qualität zeichnet sich besonders durch einen niedrigen Wassergehalt, einen geringen Aschegehalt und einen geringen Feinanteil aus [37].

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen einen Auszug aus der international gültigen Produktnorm für Holzhackschnitzel (DIN EN ISO 17225–4) [32]. In dieser Norm werden Brennstoffspezifikationen für Hackschnitzel, z. B. zum Gebrauch in Kleinfeuerungsanlagen, definiert. Für die Einteilung nach dieser Norm werden sowohl normative (d. h. verpflichtende) Eigenschaften, wie Partikelgröße, Wassergehalt, Aschegehalt und Schüttdichte, als auch informative Eigenschaften (d. h. empfohlene Vorgaben), wie der Heizwert, herangezogen.

Die physikalischen Brennstoffparameter sind auch Gegenstand dieses Forschungsberichtes. Andere (teilweise ebenfalls normative) Qualitätsvorgaben, z. B. die Gehalte an verbrennungsrelevanten chemischen Inhaltsstoffen (z. B. N, S, K, Cl), werden in dieser Untersuchung dagegen nicht betrachtet.

In der DIN EN ISO 17225–4 sind vier Spezifikationen festgeschrieben. Die Spezifikation A1 stellt dabei die höchste, Spezifikation B2 die geringste Qualität dar. Für den Betrieb von kleineren, privaten Heizkesseln mit einem Leistungsbereich von bis zu 100 kW kommen vor allem die Spezifikationen A1 und A2 infrage. Die Klassen B1 und B2 richten sich eher an mittelgroße Heizwerke, z. B. für kommunale Wärmenetze.

*Tabelle 1: Spezifikation von klassifizierten Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225–4 (Auszug, wf = auf wasserfreier Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand; englisch: „as received“) [32]*

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

Der Wassergehalt (in m-%) ist der wichtigste Qualitätsparameter von Holzhackschnitzeln. Er beeinflusst direkt den Heizwert und die Lagerfähigkeit der Brennstoffe. Daneben beeinflusst er die bei der Verbrennung frei werdenden Emissionen an CO und Staub sowie den Anfall von Asche. Weiterhin beeinflusst der Wassergehalt die Schüttdichte, sowohl durch die Masse des Wassers an sich als auch durch Schrumpfungseffekte und somit das Gewicht des Brennstoffes bei der Lieferung. Eine Abrechnung nach Masse mit einheitlicher Bezugsbasis oder unter Angabe des Wassergehalts ist daher zu empfehlen (z. B.  $t_{\text{atro}}$  = Tonne absolut trockener Brennstoff) [72] [49]. Der Wassergehalt von erntefrischen Hackschnitzeln liegt meist zwischen 45 und 55 m-% [61]. Für die Qualitätsklassen A1 und A2 darf dieser maximal 25 bzw. 35 m-% betragen.

Der Aschegehalt (in m-% auf wasserfreier Bezugsbasis (wf)) beeinflusst die Partikelemissionen, die Schlackebildung und den Entsorgungsaufwand von Asche [49]. Der

Aschegehalt von qualitativ hochwertigen Hackschnitzeln der Klasse A1 sollte 1,0 m-% nicht überschreiten [32]. Höhere Aschegehalte resultieren meist aus einem höheren Anteil an Rinde, Zweigen, Nadeln und Blättern, da diese im Vergleich zu Holz stoffwechselbedingt einen höheren Anteil an Makro- und Mikronährstoffen und damit auch einen höheren Anteil an anorganischen Stoffen aufweisen. Der Aschegehalt erhöht sich aber auch durch Kontamination der Brennstoffe z. B. mit Mineralboden [72] [61].

Die Partikelgröße bestimmt maßgeblich die Transport- und Fließeigenschaften von Hackschnitzeln. Sie wird primär durch die Produktions- und Aufbereitungsschritte beeinflusst [49], ist aber auch von der Holzart und dem gewählten Sortiment abhängig. Zudem hat die Partikelgröße einen Einfluss auf das Lager- und Trocknungsverhalten der Hackschnitzel, da z. B. kleine Partikel bzw. ein hoher Anteil an Feinmaterial die Durchlüftung einschränken können [56] [71]. Ein zu großer Feinanteil kann zu Staubemissionen bei der Bunkerbefüllung führen. Große und überlange Partikel können Blockaden in den Fördersystemen oder Brückenbildung im Lager verursachen [54] [56]. Qualitativ hochwertige Hackschnitzel zeichnen sich unter anderem durch einen geringen Feinanteil (Länge der Partikel  $\leq 3,15$  mm), eine relativ homogene Hauptfraktion und eine geringe maximale Länge aus (P16S, P31S, P45S, Tabelle 2).

*Tabelle 2: Partikelgrößenverteilung von klassifizierten Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [32]*

Hauptanteil ( $\geq 60$ m-%), mm	Feinanteil m-%	Grobanteil m-% (Länge eines Partikels, mm)	Max. Länge von Partikeln mm	Maximale Quer- schnittsfläche des Grobanteils in $\text{cm}^2$
P16S (3,15 < P $\leq$ 16)	$\leq 15$ %	$\leq 6$ (> 31,5 mm)	$\leq 45$	$\leq 2$
P31S (3,15 < P $\leq$ 31,5)	$\leq 10$ %	$\leq 6$ (> 45 mm)	$\leq 150$	$\leq 4$
P45S (3,15 < P $\leq$ 45)	$\leq 10$ %	$\leq 10$ (> 63 mm)	$\leq 200$	$\leq 6$

Die Schüttdichte (in  $\text{kg m}^{-3}$ ) von Hackschnitzeln wird hauptsächlich durch die Holzart und durch den Wassergehalt beeinflusst. Hackschnitzel werden häufig nach Volumen abgerechnet. Die Schüttdichte und der Wassergehalt sind daher wichtige Parameter bei der Einschätzung der im Schüttgut enthaltenen nutzbaren Energie [49].

Der Heizwert (in  $\text{MJ kg}^{-1}$ ) beschreibt die Wärmemenge, die bei der Verbrennung einer bestimmten Menge an Brennstoff freigesetzt wird, unter Berücksichtigung der Wärmemenge des Wasserdampfes [27]. Da der Heizwert dadurch stark von dem im Brennstoff befindlichen Wasser beeinflusst wird, ist dieser in der Regel auf wasserfreier Bezugsbasis (wf; d. h. bezogen auf die Trockenmasse) dargestellt. Wasserfreie Heizwerte von biogenen Festbrennstoffen unterscheiden sich primär aufgrund ihrer Gehalte an energiereichen Substanzen, zum Beispiel Harz oder Lignin [31]. Der Heizwert bildet zusammen mit der Schüttdichte die Energiedichte (in  $\text{MJ m}^{-3}$  oder  $\text{kWh m}^{-3}$ ) von biogenen Festbrennstoffen. Dies ist ein weiterer Parameter, der zur Berechnung des Lager- und Transportaufwands verwendet werden kann [49]. Dabei ist der Heizwert kein normativer

Parameter, sollte allerdings angegeben werden, da er Informationen über den Energieinhalt des Brennstoffes wiedergibt.

### 4.3 Waldhackschnitzel – Bereitstellung

Für die Waldhackschnitzelbereitstellung existieren in der Praxis unterschiedliche Verfahrensketten, in denen Hackschnitzel z. B. als Nebenprodukt der Stammholznutzung oder bei der Jungdurchforstung anfallen. Daneben gibt es aufgrund der hohen Nachfrage mittlerweile auch gezielte Energieholzbereitstellungsketten [76]. Von der Fällung bis zur letztendlichen Lieferung zum Abnehmer durchlaufen Hackschnitzel mehrere Prozessschritte. Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln in Bayern wurde in dem vorangegangenen Forschungsprojekt „Optimale Bereitstellungsverfahren für Holz hackschnitzel“ (Förderkennzeichen K/10/17) [61] eingehend untersucht und beschrieben. Die wichtigsten Ergebnisse sind folgend zusammengefasst.

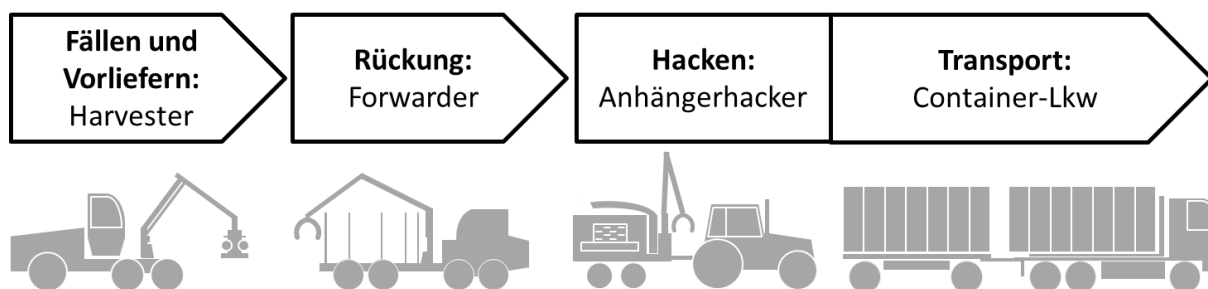


Abbildung 1: Typisches Verfahren der Hackschnitzelbereitstellung

Bei der Waldhackschnitzelbereitstellung werden meist Standardverfahren und etablierte Maschinenausstattungen eingesetzt (Abbildung 1). Für die Ernte werden bei kombinierter Aushaltung stofflicher Sortimenten und Energieholz i. d. R. motormanuelle Verfahren oder Standard-Harvester-Aggregate verwendet. Bei der reinen Energieholzernte können Fäller-Bündler-Aggregate an preisgünstigeren Trägerfahrzeugen die Maschinenkosten senken. Nach der Ernte wird das Hackholz zunächst mit einem Forwarder aus dem Bestand gerückt und an der Forststraße gepoltert. Dort wird es auch gehackt. Die Lagerung von ungehacktem Holz außerhalb des Waldes wird uneinheitlich gehandhabt und spielt vor allem für den Privatwald eine Rolle. Beim Verfahrensschritt „Hacken“ hat sich der Einsatz mobiler Großhacker auf der Forststraße etabliert. Es handelt sich meist um Trommelhacker, entweder als Lkw-Aufbau oder über die Zapfwelle leistungsstarker landwirtschaftlicher Schlepper betriebene Maschinen. Eine weitgehende Entkoppelung dieses Verfahrensschritts von der Ernte hat sich in der Praxis durchgesetzt. Der Transport zum Abnehmer ist wiederum zumeist direkt an das Hacken gekoppelt, d. h., es werden Transportfahrzeuge oder -container vom Hacker direkt befüllt. Zur optimalen Hackerauslastung kommt daher der Organisation der Logistik die entscheidende Rolle zu. Bei der Polterung im Wald ist v. a. bei Waldrestholz aus Fichte, dem häufigsten Hack-



holzsortiment in Bayern [61], zu beachten, dass der Zeitraum zwischen Ernte und Hacken ca. 4 Wochen nicht überschreitet. Ansonsten kann durch Besiedelung und Wiederausflug von Borkenkäfern ein beträchtliches Waldschutzrisiko entstehen.

Die Verfahrensketten zur Waldhackschnitzelbereitstellung können sich je nach Zielsortimenten, eingesetzten Maschinen und der Organisation der Verfahrensschritte unterscheiden. Höher mechanisierte Verfahren zeichnen sich durch höhere Leistung aber i. d. R. auch durch höhere Maschinenkostensätze aus. Die Gesamtkosten der Waldhackschnitzelbereitstellung (ohne Ferntransport) beliefen sich in den im vorgenannten Projekt untersuchten Modellverfahrensketten auf 5 bis 31 € Srm<sup>-1</sup>. Die Kosten für die dem Hacken vorgelagerten Prozessschritte wurden vorrangig durch Literaturstudien ermittelt. Auf die Produktivität beim Hacken wurde im Rahmen von 38 Praxiseinsätzen ein besonderer Fokus gelegt. Die technische Arbeitsproduktivität (in Srm je Maschinenarbeitsstunde, MAS) des Hackers steigt mit zunehmender Antriebsleistung. Auch das Hackholzsortiment spielt eine Rolle. Die technische Arbeitsproduktivität liegt bei Waldrestholz mit durchschnittlich ca. 74,0 Srm h<sup>-1</sup> (MAS) niedriger als bei Energierundholz mit durchschnittlich ca. 99,1 Srm h<sup>-1</sup> (MAS). Dies liegt u. a. an den Arbeitsunterbrechungen, welche bei Waldrestholz mit 17,8 % der Arbeitszeit signifikant länger sind als bei Energierundholz mit 5,5 %. Ursache hierfür sind vorrangig höhere mechanische Verteilzeiten und Umsetzzeiten. Die höheren mechanischen Verteilzeiten deuten auf eine höhere Maschinenbeanspruchung bei Waldrestholzeinsätzen hin. Die höheren Umsetzzeiten resultieren aus der lockereren Lagerung der Waldrestholzpolter. Der Hacker muss öfter seinen Standort wechseln, da sich in Kranreichweite weniger Holzmasse befindet. Bedeutend sind auch die Wartezeiten des Hackers, die durch den Wechsel von Transportbehältern verursacht werden. Diese können durch organisatorische Maßnahmen reduziert werden. Allerdings wird immer ein gewisser Zeitbedarf für Fahrzeugwechsel und Rangieren verbleiben.

#### **4.4 Lagerung von Hackschnitzeln**

Die Lagerung ist ein wichtiger Bestandteil der Bereitstellungskette. Sie dient in erster Linie als zeitlicher Ausgleich zwischen dem Anfall des Brennstoffes bis zum Verbrauch und fungiert somit oft als Zwischenspeicher, wenn keine direkte Lieferung zum Heizwerk möglich ist, oder als Puffer, um eine konstante Lieferung zu gewährleisten [10]. Zusätzlich kann die Lagerung gezielt eingesetzt werden, um die Brennstoffqualität z. B. durch Trocknung zu verbessern [50]. Ein weiterer Vorteil der Lagerung ist, dass auf schwankende Brennstoffpreise flexibel reagiert werden kann.

##### **4.4.1 Arten der Lagerung**

Die Lagerung von Hackschnitzeln erfolgt in der Praxis auf unterschiedliche Art und Weise. Dabei spielt der Ort der Lagerung die entscheidende Rolle. Die Lagerung kann beim Produzenten, beim Zwischenhändler oder auch beim Abnehmer erfolgen. Man kann grob

unterscheiden zwischen einer Lagerung im Freien, in Hallen oder anderen Gebäuden [50] [6].

#### **4.4.1.1 Lagerung im Freien**

Die Lagerung im Freien kann auf unbefestigten Böden, wie z. B. am Wald- und Feldrand oder auf Wiesenflächen, aber auch auf geschotterten oder geteerten Flächen stattfinden. Bei der Lagerung im Freien können als Witterungsschutz Planen, z. B. ein Vlies, zur Abdeckung verwendet werden. Ein diffusionsoffenes Vlies ermöglicht die Verdunstung von Wasser aus der Miete und hält gleichzeitig große Teile des Niederschlags ab.

Bei der Hackschnitzellagerung lassen sich einige generelle Empfehlungen aussprechen: Ein optimaler Lagerplatz sollte einen befestigten Untergrund aufweisen, sodass der Brennstoff nicht vom Boden Wasser aufnimmt und keine Verschmutzung des Brennstoffes mit Mineralboden, z. B. beim Abtragen der Miete mittels Radlader, eintritt. Zudem ist ein befestigter Platz im Gegensatz zu anderen Freiflächen ganzjährig befahrbar. Andererseits entstehen bei einer versiegelten Fläche hohe Kosten – und eine lange Festlegung auf diese Nutzungsart ist die Folge. Eine praktikable Lösung kann ein geschotterter Lagerplatz sein. Er lässt sich relativ kostengünstig anlegen, ist schwerlasttauglich und hat ein naturnäheres Aussehen. Wie beim Grünland oder beim Waldboden besteht jedoch auch hier die Problematik, dass Untergrund (Schotter) ins Lagergut aufgenommen werden kann.

Im Freien sind sonnige, windexponierte und trockene Orte von Vorteil, um Trocknungsprozesse zu verstärken. Neben dem Lagerungsort spielt auch die Mietengröße und Mietenform eine wichtige Rolle. Die Form der Miete sollte dachprofilartig sein, damit sich das Niederschlagswasser nicht in Mulden an der Mietenoberfläche ansammeln kann. Außerdem entsteht in solchen Mieten durch die Eigenerwärmung ein Kaminzugeffekt, bei dem Umgebungsluft seitlich in die Miete einströmt, sich erwärmt und Feuchtigkeit aufnimmt und die Miete schließlich im Bereich des Scheitelpunktes wieder verlässt. Dies begünstigt die Trocknung. Ein solcher Effekt ist in einer unförmigen Schüttung womöglich schwächer ausgeprägt. Des Weiteren lässt sich eine Schüttung in Mietenform besser mit einem Regenschutz abdecken und die Hackschnitzelmenge kann besser abgeschätzt werden als bei einer unförmigen Schüttung. Die Mietenhöhe sollte jedoch vier Meter nicht übersteigen, um das Brandrisiko durch Selbstentzündung (siehe Abschnitt 4.4.2.2) zu vermeiden. Die maximale Lagerungsdauer sollte laut Literatur i. d. R. drei Monate nicht überschreiten [10] [50] [6]. Je nach Witterung kann aber auch eine längere Lagerung unproblematisch sein.

#### **4.4.1.2 Lagerung in Gebäuden**

Die Lagerung in Gebäuden wird in der Praxis meist dann angewendet, wenn freie Lagerhallen zur Verfügung stehen. Ein Vorteil der Lagerung in Gebäuden besteht in erster Linie im Schutz vor Niederschlag. Weitere Lagerungsoptionen bieten Hochbehälter oder Flachlagerzellen. Diese verursachen jedoch, genauso wie Lagerhallen, einen hohen

Kosten- und Arbeitsaufwand, es sein denn, sie werden als Folgenutzung betrieben und würden sonst leer stehen. Die Lagerung direkt im Hackschnitzelbunker wird häufig angewendet, wenn z. B. keine Lagerhallen oder -flächen vorhanden sind [6]. In Lagerhallen sollte eine gute Luftzufuhr gewährleistet sein, um der Kondensationswasserbildung und der daraus resultierenden Schimmelbildung in Gebäuden entgegenzuwirken [51]. Die Lagerung in Fahrsilos und Hallen erfolgt zumeist auf befestigtem Untergrund.

#### **4.4.1.3 Lagerung vor dem Hacken**

Die Lagerung von ungehacktem Holz ist v. a. im Privatwald in Deutschland ebenfalls eine gängige Methode. Je nach Bereitstellungsverfahren und/oder Absicht des Hackschnitzelproduzenten kann das Holz vor dem Hacken noch als Polter an der Waldstraße oder am Feldrand außerhalb des Waldes gelagert werden. Die Polterlagerung im Wald ist v. a. beim relevantesten Hackholzsortiment in Bayern, dem Waldrestholz aus Fichte, aufgrund von Waldschutzrisiken zeitlich begrenzt. Die biologischen und physikalischen Prozesse sowie das resultierende Lagerungsverhalten können sich bei der ungehackten Lagerung stark von der Hackschnitzellagerung unterscheiden. Es kommt zu keiner oder nur zu einer sehr schwachen Eigenerwärmung, die Zersetzung ist normalerweise geringer und die Brennstoffqualität kann durch das Abrieseln von Nadeln, Feinreisig und Rinde erhöht werden [2] [77] [65] [56] [72]. Für loses Waldrestholz besteht jedoch ein deutlich höherer Platzbedarf als für Hackschnitzel aus demselben Material.

#### **4.4.2 Risiken bei der Lagerung**

Wie bei allen organischen Materialien treten auch bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln gewisse Probleme und Risiken auf. In der Literatur [50] [55] [6] werden diese unterteilt in Verlustrisiko, Gesundheitsrisiko, Gefährdungsrisiko, technisches Risiko, Qualitätsrisiko und Umweltrisiko.

##### **4.4.2.1 Qualitäts- und Verlustrisiko**

Tabelle 3 zeigt die Messungen zu Qualitätsveränderungen hinsichtlich des Wassergehalts sowie zu den Trockenmasseverlusten in einigen ausgewählten Studien. Die durchschnittliche Lagerungsdauer der Hackschnitzelmieten dieser Studien lag bei 4 bis 12 Monaten.

**Tabelle 3:** *Übersicht über gemessene Wassergehaltsänderungen, Miettemperaturen und Trockenmasse(TM)-verluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln*

Holzart	Lagerort, Land	Lagerdauer, Monate	Wassergehalt, Einlagerung m-%	Wassergehalt, Auslagerung m-%	Max. Temperatur, °C	TM-Verluste, m-%	Studie
Fichte	AT	5–8	< 10–> 60	15–60	58	-18–+19*	[53]
Birke	CA	12	37,5	11–63	26	8–27	[2]
Pappel	DE	5	55,5**	46,5**	-	6,4	[5]
Pappel	DE	6–8	55–60	30–35	63	15–27	[71]
Pappel, Weide, Kiefer	DE	8–12	50–60	20–50	65	10–30	[74]
Fichte	DK	5,5	39,2***	24,6***	-	2,2	[52]
Buche	DK	4	38,8	46,5	-	3,7	[52]
Pappel, Weide, Robinie	IT	6	40–55	20–60	65	5–10	[3]
Pappel	IT	6	48–54	31–34	70	7–27	[4]
Mischung (80 % Nadelholz)	SE	4	39–44	36,5	69	5,4	[14]
Nadelholz	SE	4	-	-	-	22	[77]

\* TM-Zunahmen sind auf Messunsicherheiten zurückzuführen;; \*\* Vlies; \*\*\* Lagerhalle

Die (Wieder-)Befeuchtung bei der Lagerung, z. B. durch Niederschlag, ist ein Risiko für die Qualität der Hackschnitzel (Qualitätsrisiko). Zum einen ist ein hoher Wassergehalt nachteilig für den nutzbaren Energieinhalt der Hackschnitzel und i. d. R. auch für das Verbrennungsverhalten, zum anderen kann der Wassergehalt durch Niederschlag und Kondensation innerhalb der Schüttung sehr inhomogen werden, was insbesondere für den Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen ungünstig ist [51]. Neben Versuchen, in denen sich der Wassergehalt erhöhte oder kaum änderte [2] [3] [52] [53], gab es jedoch auch Untersuchungen, bei denen die Hackschnitzel auf einen Wassergehalt von unter 30 m-% trockneten, also eine Qualitätsverbesserung eintrat [53] [71] [52]. Dies kann insbesondere während des Sommers geschehen, wenn günstige Witterungsbedingungen für eine hohe Verdunstung herrschen. Die Lagerung in einer Halle kann eine Wiederbefeuchtung der Hackschnitzel verhindern und zu einer starken Trocknung führen [52], die Verwendung eines Vlieses [5] führte zwar ebenfalls zu einer Trocknung, allerdings in geringerem Umfang.

Durch den Abbau von organischer Substanz kann bei der Lagerung ein großer Anteil der Trockenmasse verloren gehen (Verlustrisiko). Die Angaben aus der verfügbaren Primärliteratur schwanken dabei von monatlich 0,4 m-% [52] bei der Hallenlagerung von Fichtenhackschnitzeln bis 4,5 m-% [4] bzw. 5,5 m-% [77] pro Monat bei der Freilandlagerung von Pappel- bzw. Nadelholzhackschnitzeln (Tabelle 3). Eine längere Lagerdauer bewirkt oftmals höhere Trockenmasseverluste, da die Zersetzung meistens auch nach vielen

Monaten nicht ganz zum Erliegen kommt. Es wurden aber auch Einträge von bis zu 3 m-% pro Monat, das heißt eine Zunahme an Trockenmasse, festgestellt [53]. Dies könnte z. B. an Unsicherheiten bei der Wassergehaltsmessung liegen (siehe Abschnitt 6.4).

Generell stellt sich die Frage nach der Höhe der Messunsicherheit in den unterschiedlichen Untersuchungen und inwieweit Messfehler für teilweise starke Schwankungen der gemessenen Trockenmasseverluste innerhalb und zwischen den Studien verantwortlich sein können. Meist wird der Trockenmasseverlust bestimmt, indem Einlagerungswassergehalt und -masse einer Probe mit Auslagerungswassergehalt und -masse der Probe verglichen werden, d. h., es wird die Differenz aus Trockenmasse bei Ein- und Auslagerung gebildet. Als weiterer Indikator zur Bestimmung des Trockenmasseverlusts können Messungen des Aschegehalts herangezogen werden, da dieser beim Abbau von Zellulose und Lignin ansteigt [53]. Oft werden die Verluste mit der Zahl der Pilzsporen und den unterschiedlichen Pilzarten oder mit dem Temperaturanstieg verglichen [53] [74].

#### 4.4.2.2 Weitere Risiken bei der Lagerung

Die Bildung von Pilzsporen durch das Wachstum holzzeretzender Pilze kann bei der Arbeit an Hackschnitzelmieten ein Gesundheitsrisiko bedeuten. Dies kann sich in allergischen Reaktionen, Erkrankungen der Atemwege und Bildung von Mykosen äußern [51] [45].

Bei den Abbauprozessen durch die biologische Aktivität wird Wärme frei, die zu einem Temperaturanstieg in der Lagermiete führt (Selbsterwärmung). In einigen Studien [3] [4] [14] [53] [71] [74] wurde ein rascher Anstieg der Temperatur auf bis zu 70 °C gemessen. Durch Verdichtung einer Schüttung wird die Selbsterwärmung weiter verstärkt. Speziell bei großen, dichtlagernden Schüttungen kann kein ausreichender Luftaustausch in der Miete mehr stattfinden. Ab Temperaturen von 100 °C kann es dabei zur Selbstentzündung der Lagermiete kommen (Gefährdungsrisiko) [56] [46] [55].

Die Außentemperatur kann sich in unterschiedlicher Weise auf die Lagermiete auswirken. Hohe Temperaturen können biologische Prozesse in der Lagermiete verstärken [50]. Bei der Lagerung im Winter können die Hackschnitzel durch Frost verklumpen. Dies stellt, ähnlich einer Verunreinigung der Brennstoffe durch Fremdkörper (v. a. Steine), ein technisches Risiko für die Feuerungsanlagen dar.

Darüber hinaus besteht ein weiteres Umweltrisiko darin, dass es bei Lagerung im Freien zum einen zu einer Geruchsbelästigung kommen kann, zum anderen durch das Austreten von Sickerwasser organische Stoffe in nahliegende Gewässer gelangen können.



## 5 Lagerungspraxis in Bayern

Für die praxisorientierte Ausgestaltung der im Projekt durchzuführenden Hackschnitzellagerungsversuche war es von großer Bedeutung, die aktuelle Situation der Waldhackschnitzellagerung in Bayern zu kennen. Über den Privat- und Körperschaftswald, der 68,1 % [7] der Waldfläche ausmacht, liegen hierzu nur wenige Informationen, z. B. über die Art und Dauer der Hackschnitzellagerung oder über typische Lagermengen, vor. Deshalb wurde die dortige Lagerungspraxis mithilfe einer Umfrage unter Fachleuten aus ganz Bayern erfasst. Für den Staatswald besteht hingegen ein festes Lagerungskonzept, in dem flächendeckende Betriebsdaten, z. B. über jährliche Hackschnitzelmengen, aufgenommen werden. Die Informationen über die Hackschnitzellagerung im Staatswald wurde mithilfe von Experteninterviews mit dem für die Energieholzbereitstellung im Staatswald verantwortlichen Zentrum für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. (BaySF) erhoben.

Aus den Befragungen sollten Ableitungen für die möglichst praxisnahe Gestaltung der eigenen Freilandversuche erfolgen (Kapitel 7). Wichtige Punkte waren hierbei beispielsweise Lagermenge, Lagerdauer oder die Verwendung eines Regenschutzes.

### 5.1 Hackschnitzellagerung im Privat- und Körperschaftswald

#### 5.1.1 Methode

Die Informationen zur Lagerungspraxis im Privat- und Körperschaftswald in Bayern wurden mithilfe einer Umfrage erhoben.

Die Umfrage wurde an Personen gerichtet, die sich professionell mit dem Wald und dem Holzenergiebereich beschäftigen und dadurch eine möglichst gute Kenntnis von der Hackschnitzellagerungspraxis vor Ort haben. Die Teilnehmergruppe sollte weitgehend flächendeckende Informationen für ganz Bayern liefern können. Diese Bedingungen konnten über die Ansprechpartner für Holzenergie der 47 Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (ÄELF) erfüllt werden.

Die Umfrage wurde per E-Mail durchgeführt. Dadurch konnte sie für beide Seiten kostengünstig und zeitsparend durchgeführt werden, außerdem wurden so mögliche Fehlerquellen bei der Übertragung der Werte, z. B. durch Digitalisierung der Umfragebögen, minimiert. Hinzu kommt, dass der Kontakt zur Zielgruppe auf diese Weise schnell und unkompliziert über den E-Mail-Verteiler der Fachberatung Holzenergie der LWF möglich wurde.

Die E-Mail-Umfrage wurde anhand eines mitgesendeten Fragebogens realisiert (siehe Anhang, Abschnitt 13.1). Es bestand neben dem Ausfüllen direkt am Bildschirm aber auch die Option, den Fragebogen auszudrucken, händisch auszufüllen und postalisch zurückzusenden.

Die Umfrage beruhte mehrheitlich auf qualitativen Fragen mit vereinzelt Ausnahmen, bei denen feste Zahlenwerte gefordert wurden. Bei den qualitativen Fragen wurde nach den relativen Häufigkeiten „nie“, „selten“, „gelegentlich“ und „oft“ gefragt, d. h., es wurden subjektive Einschätzungen festgehalten. Dies hat den Hintergrund, dass exakte, quantitative Daten, falls überhaupt, nur mit einem sehr großen (Mess-)Aufwand seitens der Teilnehmer ermittelt werden könnten. Zudem sind die qualitativen Ergebnisse ausreichend, um die Fragestellung hinreichend zu beantworten. Bei allen qualitativen Fragen wurde ein Eingabefeld für „sonstige“, d. h. für ergänzende Eintragungen angeboten.

Bei den qualitativen Antworten stellte sich während der Auswertung heraus, dass es praktikabel ist, die beiden stärkeren Kategorien („gelegentlich“ und „oft“) und die beiden schwächeren Kategorien („nie“ und „selten“) jeweils zusammenzuzählen und dann gegenüberzustellen. Hierdurch sollte die Übersichtlichkeit erhöht und Fehlinterpretationen aufgrund der begrenzten Stichprobe verringert werden.

### **5.1.2 Ergebnisse**

Von den 53 angeschriebenen Personen füllten 33 den Fragebogen aus. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 62 %.

Der Lagerung von Waldhackschnitzeln kommt in Bayern eine große Bedeutung zu. Dabei gaben 73 % der Teilnehmer an, dass die Hackschnitzellagerung außerhalb von Biomasseheiz(kraft)werken eine Rolle in ihrem Amtsbereich spielt. Nur 27 % schreiben, dass die Hackschnitzellagerung bei ihnen keine Relevanz hat.

Unter den Akteuren, die in die Hackschnitzellagerung involviert sind, ist die Gruppe der Privatwaldbesitzer am stärksten vertreten (Abbildung 2).

Diese werden von 78 % der Teilnehmer als relevant („gelegentlich“ oder „oft“) eingestuft und nur von 22 % der Kategorie „nie“ oder „selten“ zugeordnet. An zweiter Stelle wird die Gruppe der Hackschnitzelhändler und Hackerunternehmer genannt (76 % zu 24 %), dann die forstwirtschaftlichen Zusammenschlüsse (55 % zu 45 %) und zuletzt die waldbesitzenden Körperschaften (32 % zu 68 %).



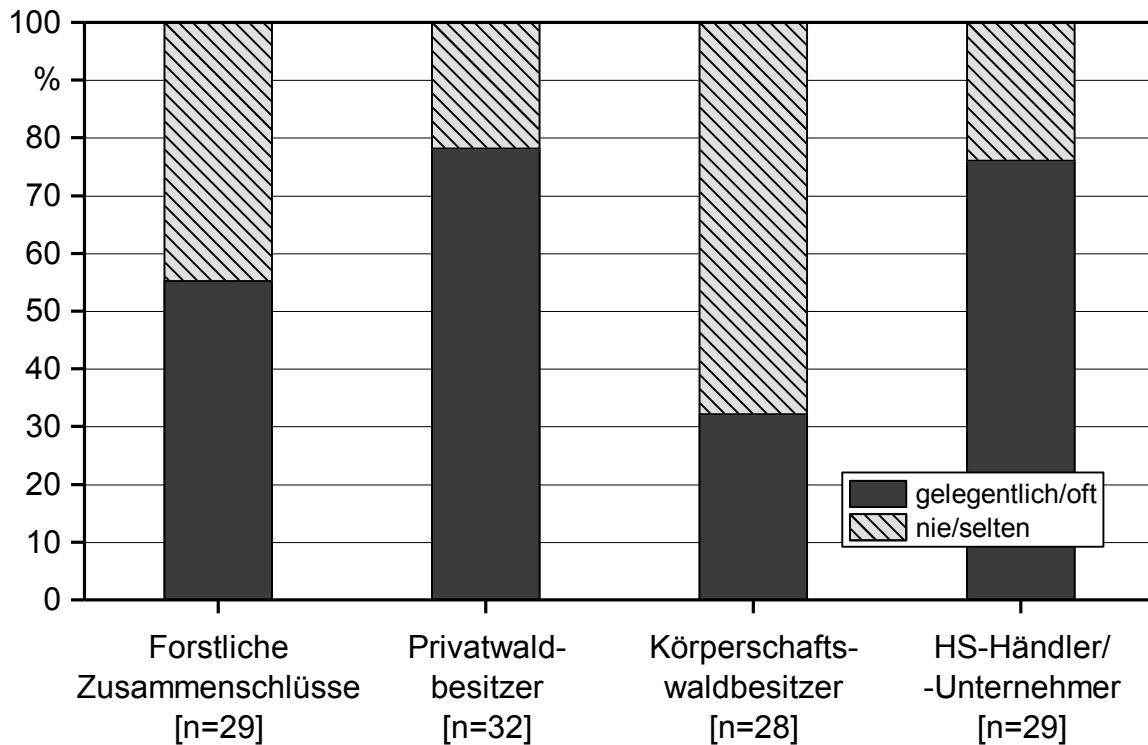


Abbildung 2: Häufigkeit, mit der die verschiedenen Akteure in Bayern in die Hackschnitzzellagerung involviert sind

Zur Motivation für eine Lagerung konnten freie Antworten gegeben werden. Insgesamt wurden 73 Nennungen zu den Motiven gemacht. Für die privaten und körperschaftlichen Waldbesitzer wurde am häufigsten die Eigenversorgung genannt (11 und 7 Nennungen). Für die forstwirtschaftlichen Zusammenschlüsse sowie die Hackschnitzelhändler sind die Bedienung von Abnahmeverträgen bzw. eine durchgehende Bereitstellung der vorrangige Lagerungsgrund (10 und 6 Nennungen). Außerdem wird bei allen vier Akteuren die Qualitätsverbesserung / Trocknung als Lagerungsmotiv genannt (Privatwald, forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse und Hackschnitzelhändler: je 4 Nennungen; Körperschaftswald: 2 Nennungen). Auch der Waldschutz wird genannt, ihm wird aber keine große Bedeutung in Verbindung mit der Hackschnitzzellagerung eingeräumt (insgesamt 2 Nennungen).

Bei der Größe der Lagerhaufen kam eine sehr große Bandbreite an Werten zustande; sie reicht von 10 bis 3.000 Srm. Der Mittelwert aller Schätzungen liegt bei 575 Srm, der Medianwert allerdings nur bei 275 Srm, da lediglich einzelne Teilnehmer sehr große Lagerhaufen angegeben haben.

Die verschiedenen Lagerungsarten stellen sich wie folgt dar (Abbildung 3): Der häufigste Regenschutz ist die Überdachung. Diese wird mit 93 % „gelegentlich“ oder „oft“ verwendet, nur in 7 % der Fälle „nie“ oder „selten“. Vlies als Regenschutz wird deutlich seltener verwendet (27 % zu 73 %). Die Lagerung ohne Regenschutz liegt in ihrer Häufigkeit zwischen den beiden regengeschützten Lagerungsarten (40 % zu 60 %). Bei der Haufenform gibt es keine Präferenz, beide möglichen Formen werden recht häufig verwendet.

Die unförmigen Schüttungen werden zu 75 % „gelegentlich“ oder „oft“ angelegt. Längliche Mieten haben eine Quote von 73 %. Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, dass aus der Häufigkeit nicht auf die Menge der eingelagerten Hackschnitzel geschlossen werden kann.

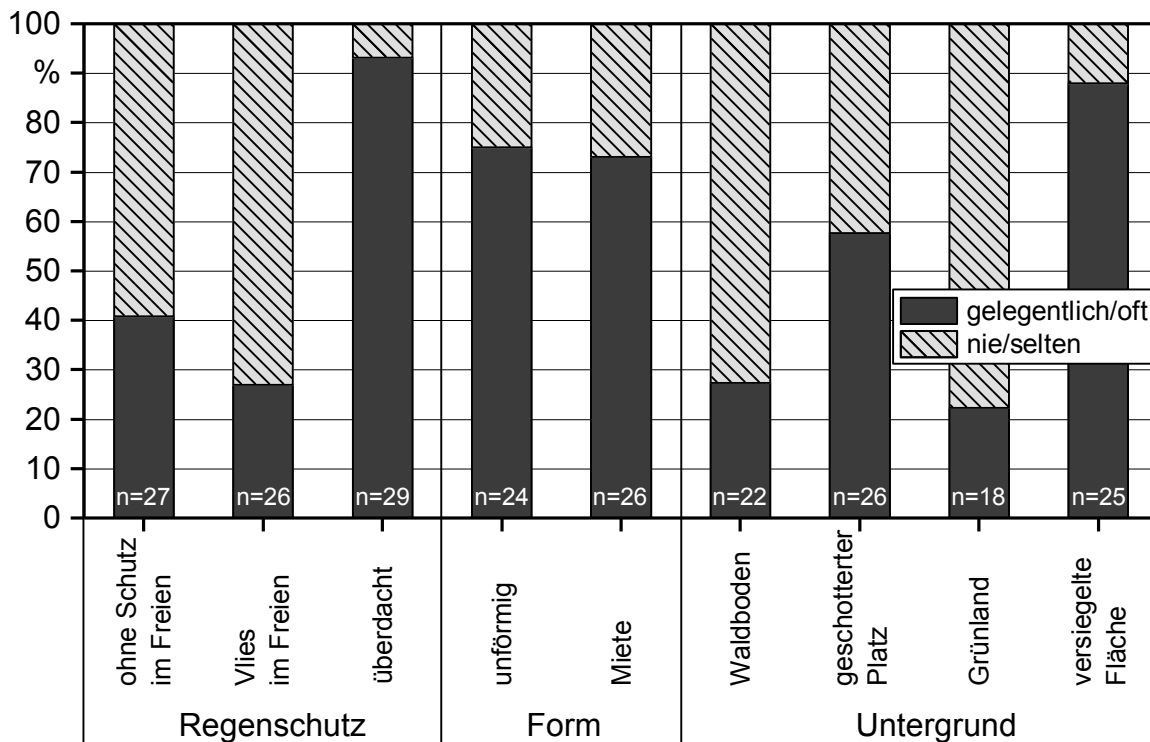


Abbildung 3: Lagerungsarten für Waldhackschnitzel hinsichtlich Regenschutz, Haufenform und Untergrund

Als Untergrund für den Lagerplatz wird am häufigsten die versiegelte Fläche genannt (88 % „gelegentlich“/„oft“, 12 % „nie“/„selten“). An Position zwei folgt der geschotterte Platz (58 % zu 42 %). Auf dem Waldboden (28 % zu 72 %) und auf Grünland (22 % zu 78 %) wird relativ selten gelagert. Eine Vortrocknung der Hackschnitzel durch die Abwärme von Biogasanlagen wird häufig genannt (70 % zu 30 %, n = 27).

Die Lagerungsdauer beträgt laut Umfrage im Mittel 6,4 Monate. Da keine extremen Ausreißer auftreten, liegt der Medianwert der Lagerungsdauer mit 6 Monaten nahe am Mittelwert. Der Lagerungszeitraum befindet sich vorrangig im Sommerhalbjahr (89 %, n = 27), im Winterhalbjahr (62 %, n = 26) wird jedoch ebenfalls häufig gelagert.

Der Umgang mit dem Hackholz zeigt folgendes Bild: Sowohl das sofortige Hacken (74 %, n = 30) als auch die Vorlagerung des ungehackten Holzes (88 %, n = 32) scheinen gängige Praxis zu sein. Im Mittel wird das Hackholz für eine Dauer von ca. 4 Monaten (Median 3 Monate) vorgelagert.

### 5.1.3 Diskussion

Die Lagerung von Hackschnitzeln außerhalb des Betriebshofs von Heiz(kraft)werken hat in Bayern eine große Relevanz. Fast drei Viertel der Befragten geben an, dass in ihrem Amtsbereich die Lagerung von Hackschnitzeln eine Rolle spielt. Hackschnitzel sind ein Massengut. Sie fallen z. B. bei Durchforstungen oder im Rahmen der Borkenkäferbekämpfung in großen Mengen an, oftmals auch im Frühjahr/Sommer, wenn deren Nutzungsmöglichkeit als Brennstoff stark eingeschränkt ist. Außerdem werden Hackschnitzel meist dezentral gewonnen, aber zentral verheizt [78]. Diese Faktoren machen eine Zwischenlagerung unerlässlich. Dementsprechend hoch ist die Relevanz der Hackschnitzellagerung in Bayern.

Unter den Akteuren, die sich mit der Hackschnitzellagerung befassen, sind die Privatwaldbesitzer am stärksten vertreten. Das könnte daran liegen, dass der mit Abstand größte Teil der Waldfläche Bayerns Privatwald ist (55,7 %; [7]), und zum anderen am bis zum Zeitpunkt der Umfrage konstant hohen Ölpreis, der die (Eigen-)Versorgung mit dem wesentlich günstigeren Brennstoff Hackschnitzel attraktiv machte. Dieser Punkt trifft jedoch auch auf den kommerziellen Hackschnitzelmarkt zu. So profitierten auch professionelle Hackschnitzelhändler bzw. Hackerunternehmer lange Zeit von einem niedrigen Ölpreis und sind erwartungsgemäß ebenfalls häufig in die Hackschnitzellagerung involviert. Die forstwirtschaftlichen Zusammenschlüsse folgen den ersten beiden Gruppen an dritter Stelle. Mittlerweile sind immerhin etwa 152.000 der rund 700.000 Waldbesitzer Bayerns in solchen Zusammenschlüssen organisiert, um ihre Waldflächen gemeinsam zu bewirtschaften [11]. Die Körperschaftswaldbesitzer spielen bei der Hackschnitzellagerung die kleinste Rolle. Allerdings entfallen auch nur 12,4 % der Waldfläche auf die Kommunen [7]. Außerdem werden kleinere Körperschaftswälder oftmals durch forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse bewirtschaftet und sind somit möglicherweise in dieser Gruppe bereits erfasst.

Bezüglich der Lagerungsmotive gibt es einen klaren Unterschied zwischen den Akteuren. Die Privatwald- und Körperschaftswaldbesitzer lagern vorrangig aus Gründen der Eigenversorgung, die forstwirtschaftlichen Zusammenschlüsse und Hackschnitzelhändler wegen der dauerhaften Bereitstellung von Hackschnitzeln bzw. der Erfüllung von Lieferverträgen. Dies ist insofern naheliegend, als die erstgenannte Gruppe potenziell eher für den eigenen Hof bzw. für die kommunale Hackschnitzelheizung im mittleren Leistungsbereich (z. B. in Schulen, Krankenhäusern, Schwimmbad) produziert, während die forstwirtschaftlichen Zusammenschlüsse größere Hackschnitzelmengen bündeln können, um sie dann gewerblich beispielsweise an Heizkraftwerke zu verkaufen. Die Motive der Hackschnitzelhändler sind selbsterklärend; eine dauerhafte Bereitstellung ist zur Erfüllung von Lieferverträgen unverzichtbar.

Die Qualitätsverbesserung bzw. die Trocknung wird zwar bei allen Gruppen als Lagerungsmotiv genannt, jedoch nicht vorrangig. Hierfür sind mehrere Gründe denkbar: Bei der Direktbelieferung größerer Heizwerke ist z. B. die Qualität waldfrischer Hackschnitzel i. d. R. bereits ausreichend, sodass andere Motive in den Vordergrund treten. Für Abnehmer mit hohen Qualitätsansprüchen kann auch auf die häufig genannte technische

Trocknung erforderlich sein. Zudem ist der durch reine Lagerung erzielbare Qualitätsgewinn ungewiss, hierin bestand auch eine wesentliche Forschungsfrage der in diesem Bericht beschriebenen Lagerungsversuche. Auffällig ist, dass der Hackschnitzzellagerung in Verbindung mit dem vorbeugenden Waldschutz keine große Bedeutung eingeräumt wird. Allerdings bezieht sich die Umfrage auf die aktuelle Situation 2014 und der Anteil der sogenannten zufälligen Holznutzung (durch Kalamitäten verursachter, unplanmäßiger Holzanfall) ist in den Jahren 2013 und 2014 auf einem eher niedrigen Niveau geblieben [9] [11] [12]. Der Sturm „Niklas“ im Frühjahr 2015 und der darauf folgende trocken-warme Sommer haben inzwischen wieder zu einem deutlich höheren Schadholzanfall geführt. Eine weitere mögliche Erklärung wäre, dass der Waldschutz nicht als ursächlich für die Lagerung gesehen wird, sondern nur als Grund für das zeitnahe Hacken. Das Hauptmotiv für die Lagerung wäre dann wieder die Mengenpufferung bis zur Heizperiode.

Die Größe der Lagerhaufen variiert sehr stark, was einerseits tatsächlich der Fall sein kann und andererseits auch auf das unterschiedliche Schätzverhalten der Teilnehmer zurückzuführen ist. Durch die ungleichmäßige Verteilung der genannten Werte wird der Mittelwert des Lagervolumens stark verzerrt, weshalb für diese Größe der Medianwert von 275 Srm als das zutreffendere statistische Maß angenommen wird. Ein Hackschnitzelhaufen in Mietenform mit einem Volumen von 275 m<sup>3</sup> hat ca. eine Länge von 21 m, eine Breite von 8 m und eine Höhe von 4 m.

Bei den Lagerungsarten sind vor allen Dingen die Angaben zum Regenschutz auffällig. Demnach spielt im Privat- und Körperschaftswald die Lagerung unter Dach die größte Rolle. Hierbei könnte einen Einfluss haben, dass durch die größere Auffälligkeit von Lagerhallen deren Häufigkeit im Vergleich zu eher schlichten, örtlich variierenden, unabgedeckten Schüttungen überschätzt wird oder dass in der Praxis nicht zwischen einer Lagerung in kleineren Bunkern und tatsächlichen Lagerhallen unterschieden wird. Auch lässt sich aus der reinen Einschätzung der Häufigkeit keine mengenmäßige Bedeutung ableiten. Die Freilandlagerung ohne Abdeckung wird immerhin in knapp 40 % der Fälle als gelegentlich oder häufig bewertet. Im Freien lässt sich i. d. R. leicht eine größere Menge lagern. Die Abdeckung mit Vlies ist hingegen bislang anscheinend nicht in der Praxis verbreitet. Dies kann mehrere Gründe haben, beispielsweise die zusätzlichen Kosten bei limitierter Lebensdauer des Vlieses oder der zusätzliche Arbeitsaufwand beim Aufschütten und Abtragen der Hackschnitzel (s. Kap. 9).

Die technische Trocknung an Biogasanlagen ist gängige Praxis. Zwar unterliegen trockene Hackschnitzel in wesentlich geringerem Umfang Zersetzungsprozessen, besitzen einen höheren Heizwert [49] und sind geeigneter für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen [42], was eine technische Trocknung durchaus sinnvoll erscheinen lässt. Jedoch bedeutet dies einen zusätzlichen Aufwand, der den Kosten der Lagerung frischer Hackschnitzel gegenübergestellt werden muss.

Der Lagerung unter Dach wurde ebenso wie der technischen Trocknung eine hohe Relevanz zugesprochen. Da bei der Lagerung unter Dach eine Wiederbefeuchtung vermieden wird, könnte so die gewonnene Qualität (d. h. der verringerte Wassergehalt) gesi-

chert werden. Aus den Umfrageergebnissen lässt sich jedoch nicht ableiten, ob technisch getrocknete Hackschnitzel überwiegend direkt unter Dach verbracht werden. Im kürzlich begonnenen Forschungsprojekt „Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel“ (Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: KS/16/03) soll daher unter anderem auch untersucht werden, ob der durch technische Trocknung erzielte Qualitätsgewinn auch bei der Freilandlagerung unter Vlies gesichert werden kann und ob dies eine ökonomisch sinnvolle Alternative zur Lagerung unter Dach darstellt.

Als Untergrund für die Hackschnitzelschüttungen dient – neben der versiegelten Fläche – relativ häufig ein geschotterter Platz. Diese Lösung besitzt einige Vorteile (siehe Abschnitt 4.4.1). Direkt auf dem Waldboden oder auf Grünland wird erwartungsgemäß nur selten gelagert. Die fehlende Schwerlasttauglichkeit, die witterungsabhängige Befahrbarkeit und der direkte Kontakt des Brennstoffs mit dem feuchten Boden sind hier als Gründe zu nennen.

Bei der Form der Hackschnitzelschüttungen sind die „unförmigen Haufen“ und die „länglichen Mieten“ offenbar ähnlich häufig anzutreffen. Während „unförmige Haufen“ rascher und unkomplizierter aufzuschütten sind, haben die „länglichen Mieten“ den Vorteil, dass an ihren steilen Flanken Regenwasser besser abfließen kann und sie nur wenige Senken haben, in denen sich Wasser sammelt. Zudem kann das Hackschnitzelvolumen von Mieten wesentlich leichter abgeschätzt werden. Der zusätzliche Vorteil, nämlich die erleichterte Abdeckung mit einem vor Niederschlag schützenden Vlies, spielt dagegen wegen der geringen Popularität des Vlieses in der Praxis vermutlich keine Rolle.

Die Umfrageergebnisse deuten auf eine mittlere Lagerungsdauer von ca. einem halben Jahr hin, wobei die Schwankungen hoch sind (zwischen wenigen Wochen bis zu über einem Jahr). Dies bedeutet, dass die Hackschnitzel oftmals für eine relativ lange Dauer den Prozessen innerhalb der feuchten und (zumindest anfangs) erwärmten Schüttung ausgesetzt sind und diese Prozesse somit eine erhebliche Forschungsrelevanz besitzen. Der Hauptlagerungszeitraum befindet sich im Sommerhalbjahr. Dann werden die Hackschnitzel, welche im Frühjahr anfallen, für die Heizperiode im Winter gelagert. Allerdings ist auch die Lagerung im Winterhalbjahr gängige Praxis. Dies kann beispielsweise daran liegen, dass der Verbrauch niedriger ist als erwartet. Zudem sind in höheren Lagen die Forststraßen nicht den ganzen Winter befahrbar, sodass auf ganzjährig anfahrbaren Plätzen zwischengelagert werden muss.

Bezüglich des Waldrestholzes ist festzuhalten, dass es in vielen Fällen zwar sofort gehackt, aber noch häufiger einige Monate ungehackt vorgelagert wird. Dies kann logistische Ursachen haben, z. B. das Vorkonzentrieren einer gewissen Menge für eine gute Hackerauslastung, oder zur Vortrocknung geschehen [61]. Waldrestholzpolter sind deutlich lockerer geschichtet als Hackschnitzel und können somit gut vom Wind durchströmt werden. Zudem können noch vorhandene grüne Nadeln durch Transpiration den Wassergehalt des Holzes beschleunigt absenken. Auch kann die Qualität der Hackschnitzel durch das Abrieseln von Nadeln und Rinde im Verlaufe der Lagerung bezüglich des Asche- und Feingehalts verbessert werden. Diese Faktoren sowie die wesentlich kleine-

re relative Oberfläche beugen einem starken Schimmelpilzbefall vor, wenn die Polter an exponierter Stelle gelagert werden. Allerdings sind die notwendigen Voraussetzungen für eine sinnvolle Vortrocknung im Wald i. d. R. nicht gegeben. Zudem kann die Lagerung von ungehacktem Waldrestholz v. a. aus Fichte aus Waldschutzgründen kritisch sein. Auch eine Besiedelung mit Vögeln und Kleinsäugetern ist möglich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Lagerung von Hackschnitzeln in den Privat- und Körperschaftswäldern Bayerns in der Praxis eine große Bedeutung zukommt. Es wird auch teilweise für eine relativ lange Dauer gelagert, weshalb es sinnvoll erscheint, die Auswirkungen und Prozesse der Lagerung unter den Bedingungen in Bayern zu untersuchen. Bezüglich der Schüttungsgröße, der Haufenform, der Lagerungsdauer und des Lagerungszeitraums wurden die laufenden Versuchsplanungen der LWF und des TFZ bestärkt. Einige Umfrageergebnisse waren jedoch so nicht vorhergesehen worden, beispielsweise die Häufigkeit einer überdachten Lagerung oder die oftmalige technische Trocknung mittels Abwärme. Diese Aspekte sollen in folgenden Projekten berücksichtigt werden.

## **5.2 Hackschnitzellagerung im Staatswald**

Der Staatswald im Eigentum des Freistaats hat in Bayern einen Flächenanteil von 29,8 % [7]. Für den Staatswald besteht im Gegensatz zum Privat- und Körperschaftswald ein einheitliches Hackschnitzellagerungskonzept, welches vom Zentrum für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten (BaySF) entwickelt wurde und seit Jahren konsequent angewandt wird. Die Beschreibung der Hackschnitzellagerungssituation und -praxis im Staatswald wurde auf Grundlage von Gesprächen mit den Experten des ZfE erstellt und ist nachfolgend zusammengefasst.

Im Staatswald wurden in den vergangenen Jahren jährlich ca. eine Million Schüttraummeter Hackschnitzel produziert, was 7 bis 9 % der Verkaufsmenge des gesamten Holzes entspricht [8]. Davon entfallen etwa 800.000 Srm auf das Sortiment Waldhackgut, das überwiegend aus ganzen Nadelholzkronen und -ästen besteht, inklusive ca. 5.000 Srm Wurzelschredder. Die restliche Menge (ca. 200.000 Srm) wird als Energierundholz am Stück und zunehmend auch als „Premiumhackschnitzel“, also gehacktes Energierundholz, verkauft. Das letztgenannte Sortiment geht hauptsächlich an kleinere Hackschnitzelheizungen, während das Waldhackgut in großen Biomasseheiz(kraft)werken (BMH(K)W) verfeuert wird.

Der Grund für die Lagerung im Staatswald ist zum einen die Mengenspufferung zur Einhaltung von Lieferverträgen im Winter, zum anderen die Möglichkeit, eine schnelle Hackschnitzelproduktion im Sommer zu garantieren (Waldschutz, Borkenkäferbekämpfung) – unabhängig vom dann geringeren Brennstoffbedarf. Im Vergleich mit Hackschnitzelhändlern und forstwirtschaftlichen Zusammenschlüssen, die i. d. R. ebenfalls nicht für den Eigenverbrauch Hackschnitzel produzieren, aber vorrangig zur Erfüllung von Lieferverträgen lagern, sind die Lagerungsmotive im Staatswald somit offenbar vielseitiger.

Die BaySF besitzt rund 180 eigene und 15 angemietete Lagerstätten. Die eigenen Flächen haben mindestens einen geschotterten Untergrund, der aufgebaut ist wie eine Forststraße und für einen besseren Wasserabflusses leicht geneigt ist. Die angemieteten Lagerstätten sind überwiegend ehemalige Industriestandorte und haben i. d. R. einen asphaltierten bzw. betonierten Untergrund, teils mit einer Überdachung/Halle.

Die eigenen, geschotterten Freiflächen sind im Schnitt 2.000 m<sup>2</sup> groß, im Mittel werden etwa 2.000 Srm Hackschnitzel dort gelagert. In den externen, teils überdachten Lagerstätten werden meistens deutlich mehr Hackschnitzel und auch die besseren Sortimente (Premiumhackschnitzel) gelagert. Die Lagerhaufen im Freien werden als längliche Mieten angelegt, mit möglichst steilen Flanken und bis zu 5 m hoch aufgeschoben. Durch diese Geometrie läuft das Regenwasser besser ab. Durch die große Höhe wird im Haufen ein Kaminzugeffekt erreicht, der den durch Eigenerwärmung entstandenen Wasserdampf verstärkt aus dem Haufwerk befördert.

Die Lagerplätze werden fast ausschließlich für die Zwischenlagerung eingesetzt. Von Juni bis September wird das meiste Material auf die Lagerplätze gefahren (hoher Anfall u. a. wegen Waldschutz). Im Winter werden die Plätze schrittweise geleert. Die maximale Lagerdauer beträgt 4 bis 5 Monate. Die Lagerdauer im Staatswald liegt also unter der in den anderen Waldbesitzarten in Bayern, bei welchen durchschnittlich über 6 Monate gelagert wird. Von den 1 Mio. Srm Hackschnitzeln werden über das Jahr gesehen 30 bis 40 % zwischengelagert, weshalb der Hackschnitzellagerung auch im Staatswald eine hohe Bedeutung eingeräumt werden kann.

Eine Qualitätsverbesserung hinsichtlich des Wassergehalts tritt laut Aussage des ZfE offenbar selten auf. Der Wassergehalt wird unmittelbar bei Werkeingang mit der Trockenschrankmethode gemessen und liegt bei den frisch gehackten Hackschnitzeln bei durchschnittlich ca. 43 %. Der Wassergehalt zwischengelagerter Hackschnitzel ist erfahrungsgemäß i. d. R. so hoch wie der Wassergehalt der frisch gehackten Hackschnitzel, bei längerer Lagerung etwas höher. Dies könnte auch daran liegen, dass die Hauptmenge im Herbst und Winter zu den Kunden geliefert und dann erst der Wassergehalt gemessen wird. Trockenmasseverluste werden nicht gemessen.

Die längere Lagerung in ungehacktem Zustand in Poltern wird vom ZfE grundsätzlich nur bei waldschutzunkritischem Laubholz in Erwägung gezogen. Im Durchschnitt wird das Holz von März bis Oktober zwei Wochen nach Freigabe durch den Forstbetrieb gehackt oder abgefahren. Somit existiert im Staatswald praktisch keine Vorlagerung von Gipfelmaterial in ungehacktem Zustand – was ein großer Gegensatz zur Lagerpraxis im Privat- und Körperschaftswald ist, wo sehr häufig und im Durchschnitt vier Monate lang ungehackt gelagert wird.





## 6 Methodenentwicklung für Lagerungsversuche

Die Erfassung und Bewertung bereits erprobter Methoden zur Quantifizierung von Trockenmasseverlusten während der Lagerung von großen Hackschnitzelmieten und zur Bewertung der Veränderung der Brennstoffqualität erfolgte mit zwei Schwerpunkten. Zunächst wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei wurden wissenschaftliche Veröffentlichungen, primär aus Peer-Review-Journalen, aber auch aus Präsentationen unterschiedlicher Fachtagungen sowie Beiträgen aus der nationalen Fachpresse zusammengetragen (siehe Abschnitt 6.1). Neben der Literaturrecherche wurde unmittelbar zu Projektbeginn ein Experten-Workshop zum Thema „Untersuchung chemischer und physikalischer Prozesse in Waldhackschnitzelschüttungen“ durchgeführt. Aus den Recherchen wurden Versuchsdesigns für Behälter- und Freilandversuche entwickelt und unterschiedliche Probenahmemethoden in Vorversuchen hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit getestet (siehe Abschnitt 6.2 und 6.3).

### 6.1 Methoden bisher durchgeführter Studien zur Lagerung

Bisherige Untersuchungen zur Lagerung von Holzhackschnitzeln zeigen häufig stark abweichende Ergebnisse in Bezug auf die gemessenen Qualitätsänderungen und Trockenmasseverluste. Dies liegt hauptsächlich an den sehr unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen hinsichtlich der Versuchsanlage, der repräsentativen Probenahme sowie den Messmethoden zur Bilanzierung von Trockenmasseverlusten oder der Hackschnitzelqualität (vgl. Abschnitt 4.4.2). Im Folgenden wird daher kurz auf aktuelle Verfahren eingegangen.

In mehreren Studien wurden unterschiedliche Hackschnitzelmieten in Größenordnungen von 20 m<sup>3</sup> [3] bis 500 m<sup>3</sup> untersucht [71]. Die Herkunft des gehackten Materials war dabei sehr variabel und reichte von reinen Birkenhackschnitzeln aus Stammholz [2] über Holzabfallstoffe aus der Bau- und Gewerbeindustrie [40] bis zu Waldrestholz [53]. Die meisten aktuellen Studien befassten sich mit Hackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb, speziell mit Pappelholz [3] [4] [71] [74]. Die Lagerungsorte waren Hallen, Freiland, Feldrand, Lagersilos und Lagerboxen. In mehreren Studien wurde der Einfluss von Abdeckplanen untersucht. Hierbei wurden luftdurchlässige Folien und Vliese verwendet [2] [3] [71] [74]. Als Lagerdauer wurde meist eine sechsmonatige Lagerung gewählt. Neben der Lagerdauer hatte auch der Zeitpunkt der Ernte, d. h. die Lagersaison, Einfluss auf die Ergebnisse [15].

Nur in wenigen Studien werden genaue Angaben hinsichtlich des Versuchsdesigns gemacht und die Anzahl und Verteilung der Proben detailliert beschrieben. Trockenmasseverluste werden in vielen Studien über Bilanzbeutel bestimmt [3] [4] [40] [71]. Hierfür werden feinmaschige Netzbeutel mit Hackschnitzeln befüllt. Über das Trockenmassegewicht bei der Einlagerung und bei den Probenahmen kann der Trockenmasseverlust während der Lagerung bestimmt werden. Die Probenahme erfolgt meist am Ende der Lagerzeit, um durch die Entnahme der Beutel keinen Einfluss auf die Lagermiete auszu-

üben und ein Aufreißen der Beutel zu verhindern. Als Beutelmateriale wurden unterschiedliche Beutel aus Plastiknetzen verwendet.

Die Art der Probenahme ist abhängig vom Beprobungsintervall. Erfolgt eine Probenahme nur bei der Ein- und Auslagerung, werden die eingebrachten Beutel i. d. R. durch Abtragen der Miete am Ende der Lagerdauer gesammelt und analysiert. Die Beprobung während der Lagerdauer wird hingegen auf unterschiedliche Arten durchgeführt, z. B. durch Abtragen der Miete bis zu den vergrabenen Beuteln und anschließendes Wiederaufschütten der Miete [40], durch Ziehen der Proben mit am Beutel befestigten Stahlseilen [53] oder durch das maschinelle Ziehen sogenannter Probensäulen mittels eines Krans, an dem die Probenbeutel befestigt sind [71].

Die Anzahl der Beutel variiert von vier Proben [3] bis zu über 100 Proben [71]. Hierdurch variiert die Repräsentativität der Ergebnisse für die gesamte Miete. Neben der Probenanzahl spielt auch die räumliche Verteilung der Proben eine wichtige Rolle. In den meisten Studien werden die Beutel auf verschiedenen Ebenen mit definierter Entfernung zum Boden und möglichst gleichmäßig über die gesamte Miete verteilt. Beutel in der äußersten Mietenschicht, der sogenannten „Deckschicht“, finden sich dagegen kaum.

## **6.2 Vorversuche zu Freilandversuchen**

Zu Beginn des Projektes wurde die Methodik für die Anlage von Feldversuchen im Rahmen einer Masterarbeit am TFZ erarbeitet [67]. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier deshalb nur zusammengefasst wiedergegeben.

Die praktische Durchführung der Arbeiten wurde von TFZ und LWF gemeinsam getätigt. Nach umfassender Literaturrecherche (siehe Abschnitt 6.1) wurde eine 165 Srm umfassende Versuchsmiete am Betriebshof des TFZ angelegt (Abbildung 4a, Abbildung 6).



**Abbildung 4:** Vorversuchsmiete am Betriebshof des TFZ (a) mit den drei Beprobungsvarianten: Bilanzbeutel (b), Beprobung einer Mietenschicht im Schüttwinkel (Schicht, c), Beprobung eines horizontalen Segments (Gestell-Schicht, d)

In der Versuchsmiete wurden drei Methoden zur Probenahme getestet. Die Methodik sollte u. a. eine hohe Messgenauigkeit aufweisen, eine Probenahme während der Lagerung ermöglichen, repräsentativ für die gesamte Lagermiete sein und einen geringen Personal- und Zeitaufwand benötigen. Die sogenannte „Bilanzbeutel“-Methode, wie sie auch schon in vorherigen Studien angewendet wurde (s. Kap. 6.1, Abbildung 4b), wurde dabei der Beprobung eines kompletten Mietensegments (Abbildung 4c und d) gegenübergestellt. Das Segment war durch ein Netz von der restlichen Miete abgetrennt. Durch den Ein- und Auslagerungswassergehalt sowie das Ein- und Auslagerungsgewicht wurde die Trockenmasse bilanziert. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Methoden getestet: der Einbau parallel zum Schüttwinkel (Abbildung 4c) im Vergleich zum Einbau vertikal (Abbildung 4d). Während bei ersterer Methode das Netz lediglich beim Aufschütten der Miete auf den Schüttgutwinkel aufgelegt wird, benötigt letztere den Einbau einer stabilen Rahmenkonstruktion (Abbildung 4d). Die Probenahme der Segmente konnte nur durch Abtragen und Wiederaufschütten der Miete erfolgen.

Die untersuchten Bilanzbeutel bestanden aus einer exakt gewogenen Probenmenge in zwei übereinander gestülpten Raschelsäcken, welche zusätzlich zur Stabilisierung mit einem Maschendraht verstärkt wurden. Ein an den Beuteln befestigtes Zugseil ermög-

licht eine Probenahme während der Lagerung, ohne dass die Lagerprozesse dabei wesentlich gestört werden (Abbildung 5). Die Beutel wurden mithilfe eines Radladers und versuchsweise auch mittels einer Seilwinde aus der Miete gezogen.

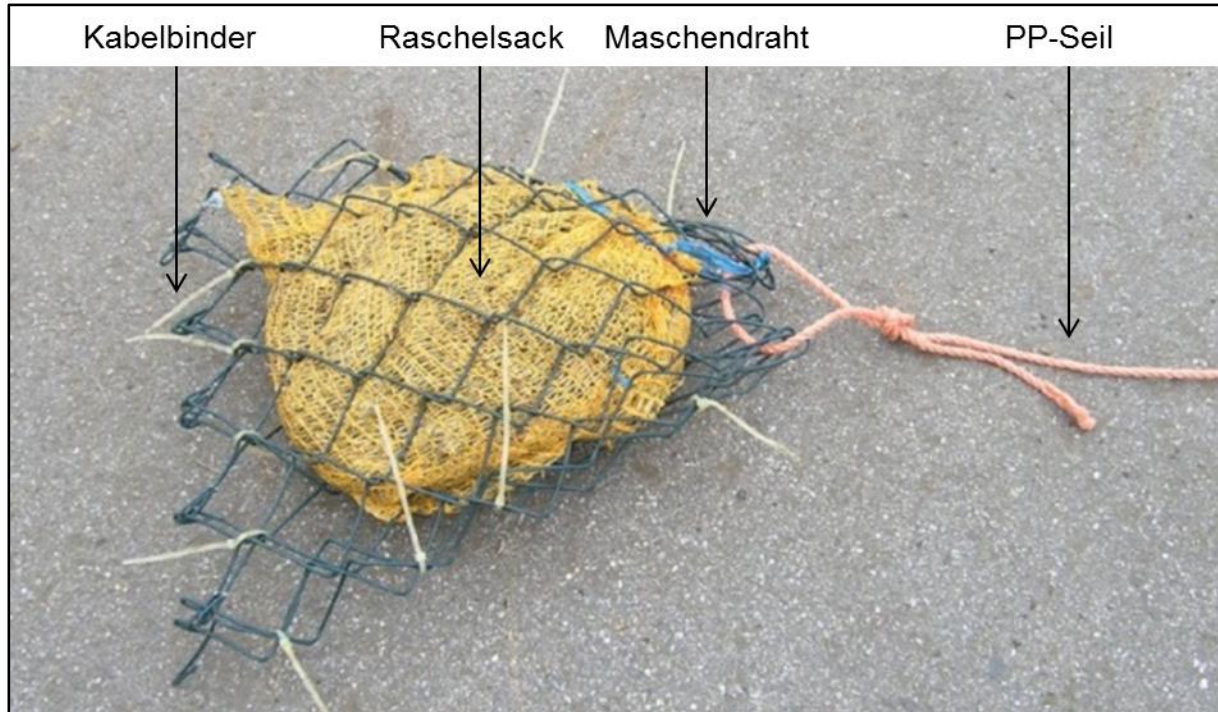


Abbildung 5: Aufbau eines Bilanzbeutels

Die Versuchsmiete wurde über den Zeitraum von drei Monaten regelmäßig beprobt. Neben der Bilanzierung der Trockenmasseverluste erfolgte die Analyse des Wassergehaltes, Aschegehaltes, Heizwertes und der Partikelgrößenverteilung. Zusätzlich wurden die Temperatur in der Miete sowie die Umgebungsparameter (Lufttemperatur, Niederschlag etc.) mittels einer Klimastation kontinuierlich aufgezeichnet.



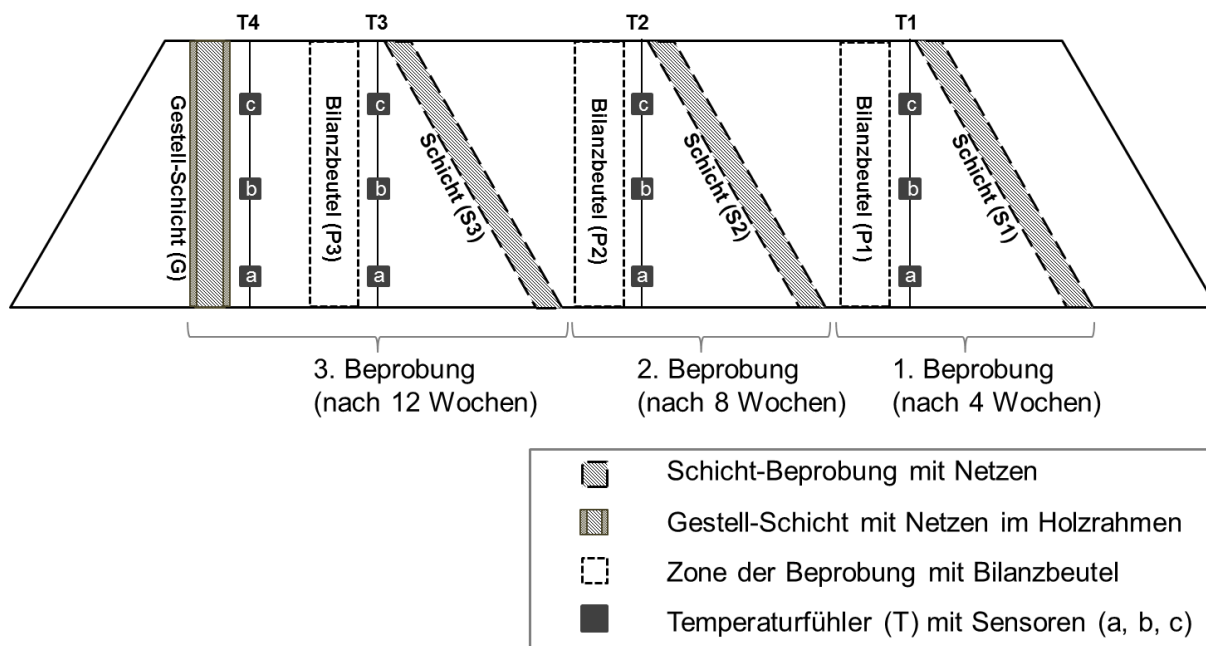


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Vorversuchsmiete

Trocken-warmes Wetter sowie der schnelle Anstieg der Mietentemperatur auf ein Maximum von 63 °C führten zu einem raschen Abtrocknen der Hackschnitzel. Der Wassergehalt bei der Auslagerung der Lagermiete (nach drei Monaten) lag insgesamt unter 35 m-%, jedoch wurden bei den verschiedenen Verfahren unterschiedliche Trends beobachtet. Der höchste Wassergehalt und der höchste Trockenmasseverlust wurden beim Beprobungsverfahren mit der Gestell-Schicht gemessen. Das verwendete Material des Gestells bildete möglicherweise eine Dampfsperre und behinderte dadurch den Trocknungsprozess. Dies wiederum hatte eine höhere mikrobielle Aktivität über die gesamte Lagerdauer und dadurch hohe Trockenmasseverluste (11 m-%) zur Folge. Die Beprobung der Schichten (ohne Gestell) ergab Verluste bis zu 9 m-%. Die durchschnittlich niedrigsten Trockenmasseverluste (5 m-%) nach zwölf Wochen wurden bei den Bilanzbeuteln festgestellt. Gleichzeitig konnte durch die räumliche Verteilung der Beutel festgestellt werden, dass im Mieteninern die höchsten Trocknungseffekte auftraten.

Insgesamt konnte die Brennstoffqualität der Hackschnitzel durch die Trocknung gesteigert werden. Die Beprobung mit Bilanzbeuteln erwies sich wegen der höheren Messauflösung sowie der räumlichen Darstellung der Ergebnisse als die geeignetste Methode. Sie benötigt den geringsten Zeit- und Kostenaufwand, v. a. bei der Probengewinnung. Im Vergleich zu der Bilanzbeutelmethode kann die aufwendigere Schicht-Beprobung nur dann empfohlen werden, wenn keine Aussage über räumliche Veränderungen in einer Miete getroffen werden soll. Die Beprobung mit einer Gestell-Schicht erscheint dagegen für Praxisversuche kaum geeignet. Neben dem Einfluss des Gestells auf die Messergebnisse und dem Einfluss der Probenahme auf die Lagerprozesse durch Abtragen und Wiederaufschütten der Lagermiete ist der deutlich höhere maschinelle und personelle

Aufwand dieser Methode im Vergleich zu den anderen Beprobungsverfahren für einen groß angelegten Feldversuch nicht vertretbar [67].

Neben der Untersuchung zur Messmethode wurde auch die Homogenisierung der Hackschnitzel untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine sehr genaue, aber auch aufwendige Homogenisierung des Ausgangsmaterials zur Bestimmung des Wassergehalts die Unsicherheiten bei der Bilanzierung der Trockenmasseverluste deutlich minimieren kann. Daneben wurden praktische Erfahrungen zur Anlage großer Lagermieten und zum zeitlichen und personellen Aufwand gewonnen. Somit konnten nicht nur verschiedene Probenahmeverfahren untersucht, sondern auch erste Erfahrungen mit Lagermieten gesammelt werden, die für die Planung der späteren Freilandversuche von großer Bedeutung waren.

### **6.3 Vorversuche zu den Behälterversuchen**

In Freilandversuchen sind die Möglichkeiten für eine breite Abstufung unterschiedlicher Lagerungsvarianten aus Platzgründen und aufgrund des sehr hohen Arbeitsaufwands naturgemäß begrenzt. Daher stellte sich die Frage, inwieweit eine größere Vielzahl von Einflüssen durch stationäre Versuche mit kleineren Behältern bewertet werden könnte, und inwieweit derartige Ergebnisse eine Aussagekraft für die Praxis haben könnten. Ziel der Behälterversuche war es daher, neben Vergleichsuntersuchungen unterschiedlicher Varianten bei der Lagerung auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Freilandversuche zu untersuchen.

Zur Entwicklung eines entsprechenden Versuchsdesigns wurde das Verfahren der Behälterlagerung in einem Vorversuch getestet. Als Behälter wurden Lagerkisten aus Kunststoff mit 610 l Füllvolumen verwendet (Abbildung 7). In die Kistenböden wurden Löcher gebohrt und der Boden wurde mit einem Netz ausgelegt. Auf diese Weise war ein natürlicher Luftaustausch im Behälter möglich. Die Seitenwände der Kisten wurden mittels 30 mm starker Dämmplatten aus Hartschaum (extrudiertes Polystyrol) wärmeisoliert, um möglichst geringe Temperaturunterschiede innerhalb der Kiste zu gewährleisten und Kondensation in den Grenzschichten vorzubeugen. Es wurden sechs Kisten mit frischen Hackschnitzeln aus Waldrestholz (Wassergehalt ca. 45 m-%) gefüllt. Jede Kiste wurde mit zwei Temperatursensoren in der Mitte der Schüttgüter ausgestattet, um die Temperatur der eingelagerten Hackschnitzel kontinuierlich aufzuzeichnen. Darüber hinaus wurde die Wirksamkeit der Isolierung der Behälter durch weitere Temperatursensoren, welche im Randbereich der Behälter eingebaut wurden, untersucht.



Abbildung 7: *Leerer (links) und mit Hackenschnitzeln befüllter Behälter (rechts) mit einem Füllvolumen von 610 l, einer Isolierung und eingebauten Temperatursensoren*

Während der Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Lagerungsorte als Versuchsstandorte untersucht und verglichen. Hierfür wurden zwei Behälter in einer abgeschlossenen Kühlkammer bei maximal 10° C gelagert. Allerdings konnten aus Platzgründen nur zwei Kisten je Versuchsphase in der Kammer gelagert werden. Vier weitere Kisten wurden im Außenbereich des TFZ gelagert, zwei davon in einem überdachten Carport, zwei in einem überdachten Außenlager. Durch die Verwendung von jeweils zwei Behältern je Lagerungsort wurde die Wiederholbarkeit des Verfahrens getestet.

An jedem Lagerungsort wurden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte kontinuierlich mittels Datenlogger aufgezeichnet (Testo 175-H1, Testo AG). Zudem wurde das Gewicht der gefüllten Behälter wöchentlich mittels einer Kranwaage (Dini Argeo MCW1500, AS-Wägetechnik GmbH, Messgenauigkeit  $\pm 0,45$  kg) bestimmt. Die Analyse des Wassergehaltes und damit die Analyse des Trockenmasseverlustes erfolgten am Ende des Vorversuches. Die gesamte Lagerdauer betrug sechs Wochen (Ende Februar bis Anfang April).

Tabelle 4: *Gemessene Durchschnittswerte (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) der Behältervorversuche und Vergleich der drei untersuchten Lagerungsorte nach zwei Monaten Lagerdauer*

Messwert	Kühlkammer	Lager	Carport
Temperatur (°C)	9,7 ( $\pm 0,8$ )	6,3 ( $\pm 2,8$ )	6,2 ( $\pm 3,3$ )
Relative Luftfeuchte (%)	86,3 ( $\pm 8,4$ )	76,4 ( $\pm 8,3$ )	68,4 ( $\pm 12,4$ )
Wassergehaltsänderung (m-%)	-2,9 ( $\pm 0,0$ )	-1,8 ( $\pm 0,2$ )	-3,2 ( $\pm 0,4$ )
Trockenmasseverluste (m-%)	3,8 ( $\pm 0,1$ )	7,1 ( $\pm 4,2$ )	2,9 ( $\pm 0,2$ )

Im Vergleich zum Carport konnte bei der Lagerung in der Kühlkammer und im Außenlager kein regelmäßiger Luftaustausch stattfinden, sodass die Luftfeuchte deutlich höher lag. Das dadurch geringe Wasseraufnahmevermögen der Luft schränkte die Trocknung der Hackschnitzel ein. Gleichzeitig wurden bei diesen beiden Lagerungsarten erhöhte Trockenmasseverluste gemessen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse von Behälterversuchen auf Freilandversuche kann daher nur bei einem Lagerungsort mit gutem Luftaustausch ermöglicht werden, der die Lagerbedingungen der Freilandversuche unter Verwendung des Regenschutzes nachbildet. Als Lagerungsort für Behälterversuche wurde daher der Carport gewählt. Dieser hat zudem den Vorteil, ein deutlich höheres Platzangebot als die Kühlkammer und das Lager aufzuweisen.

#### **6.4 Zusammenfassung wichtigster Erkenntnisse zur Entwicklung des Versuchsdesigns von Feld- und Behälterversuchen**

Obwohl bereits zahlreiche Studien zur Freilandlagerung von Hackschnitzeln durchgeführt wurden, verwendeten diese teils sehr unterschiedliche Beprobungstechniken und Versuchsdesigns [2] [3] [4] [16] [21] [40] [53] [56] [71] [72]. Folglich schwanken die gewonnenen Ergebnisse, z. B. die gemessenen Trockenmasseverluste, nicht nur aufgrund unterschiedlicher Hackschnitzelsortimente und Mietengrößen, sondern auch aufgrund unterschiedlicher Lagerungstechniken, der Lagerdauer oder der Probenahme. Die Vergleichbarkeit der Studien untereinander und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Sortimente und Lagerbedingungen muss somit infrage gestellt werden.

Ziel der Methodenentwicklung war es daher, für die in Kapitel 7 vorgestellten Freilandversuche methodische Einflussfaktoren zu minimieren. Dies wurde u. a. dadurch erreicht, dass die Lagerbedingungen, d. h. der Lagerungsort, die Lagertechnik, die Lagerdauer und die Partikelgröße des jeweiligen Hackschnitzelsortiments, weitgehend identisch waren. Daneben wurde aus den gewonnenen Erfahrungen und Ergebnissen aus der Literaturstudie und den Vorversuchen ein optimales Versuchsdesign für Feld- und Behälterversuche abgeleitet. Für die Freilandversuche wurde die Bilanzbeutelmethode gewählt. Der erste Lagerungsversuch mit dem optimierten Messdesign begann im Herbst 2014 (siehe Kapitel 7). Die Behälterversuche wurden zeitgleich mit der zweiten Messkampagne zu den Freilandversuchen im Mai 2015 begonnen. Daher konnten nicht nur verschiedene Sortimente unter geregelten Bedingungen untersucht werden, sondern auch ein Vergleich zu den Freilandversuchen hergestellt werden (siehe Kapitel 8).



## 7 Freilandversuche

Durch die Freilandversuche sollte herausgefunden werden, wie sich die Trockenmasse, die Brennstoffqualität und der Energieinhalt von Hackschnitzeln bei Lagerung unter bayerischen Praxisbedingungen verändern. Zusätzlich sollte die Lagerung von ungehacktem Holz untersucht und mit der Hackschnitzellagerung verglichen werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Vorversuche, des Expertenworkshops, der Literaturanalyse und der Umfrage wurde ein umfangreicher Versuchsplan entwickelt. Die Lagerung wurde sowohl im Winter als auch im Sommer für eine Dauer von jeweils 5 Monaten untersucht, wobei beide Durchgänge einen identischen Versuchsaufbau besaßen. Der Winterversuch fand von November 2014 bis April 2015 und der Sommersversuch von Mai 2015 bis Oktober 2015 statt. Die Freilandversuche wurden auf einem asphaltierten Lagerplatz der Firma Biomassehof Breitenhuber (48.96° N, 11.18° E) in der Nähe von Eichstätt (Oberbayern) durchgeführt. Das verwendete Holz stammte aus Durchforstungen und wurde vom Zentrum für Energieholz der Bayerischen Staatsforsten kostenlos zur Verfügung gestellt.

### 7.1 Material und Methoden

#### 7.1.1 Versuchsdesign und Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden bei jedem Durchgang sechs verschiedene Varianten untersucht (Tabelle 5). Als Ausgangsmaterialien wurden einerseits Waldrestholz und andererseits Energierundholz gewählt. Bei dem verwendeten Holz handelte es sich mit einem Anteil von etwa 80 % überwiegend um Fichte (*Picea abies*). Die übrigen ca. 20 % setzten sich hauptsächlich aus Kiefer (*Pinus sylvestris*) sowie in geringem Umfang aus Buche (*Fagus sylvatica*) und anderen Laubbäumen zusammen. Das Hackholz wurde vorab besichtigt und Polter entsprechend ihrer Zusammensetzung so ausgewählt, dass eine möglichst einheitliche Brennstoffqualität innerhalb der Sortimente erwartet werden konnte. Das Waldrestholz bestand aus kompletten Kronen inklusive Feinreisig und Nadeln. Hackschnitzel aus Waldrestholz bilden das Standard-Hackschnitzelsortiment in Bayern. Das Energierundholz bestand aus entasteten Stammabschnitten geringer Qualität. Hackschnitzel aus Energierundholz besitzen im Gegensatz zu Waldrestholzhackschnitzeln fast keine Grünanteile sowie weniger Feinanteile und deshalb eine höhere Brennstoffqualität (siehe Abschnitt 4.2). Diesem Sortiment könnte in Zukunft aufgrund steigender Brennstoffanforderungen im Zuge strengerer Emissionsgrenzwerte bei Kleinf Feuerungsanlagen eine wachsende Bedeutung zukommen.

**Tabelle 5:** *Versuchsdesign mit den unterschiedlichen Varianten bei den Freilandversuchen sowohl bei der Winter- als auch bei der Sommerlagerung*

Ausgangsmaterial /Sortiment	Zerkleinerung (Siebkorbweite des Hackers)	Regenschutz	Haufengröße in m <sup>3</sup> (ca.)
Waldrestholz	gehackt (80 × 80 mm)	-	200
Waldrestholz	gehackt (80 × 80 mm)	Vlies	200
Energierundholz	gehackt (40 × 40 mm)	-	200
Energierundholz	gehackt (40 × 40 mm)	Vlies	200
Waldrestholz	ungehackt	-	120
Energierundholz	ungehackt	-	65

Beim Hacken des Waldrestholzes wurde im Hacker ein 80 × 80 mm-Siebkorbbeinsatz, beim Energierundholz ein 40 × 40 mm-Siebkorbbeinsatz verwendet, was der gängigen Praxis in Bayern entspricht [61]. Um den Einfluss eines einfachen Regenschutzes auf die Lagerungsprozesse beurteilen zu können, wurde jeweils ein Hackschnitzelsortiment mit einem diffusionsoffenen Vlies (PolyTex, 200 g m<sup>-2</sup>, Zill GmbH und Co. KG) abgedeckt. Damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden konnte, wurden die 4 Schüttungen direkt nebeneinander angelegt (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** *Lagerplatz mit den 4 verschiedenen Hackschnitzelmieten à ca. 200 Srm; rechts die Mieten aus Waldrestholzhackschnitzeln, links die Mieten aus Energierundholzhackschnitzeln*

Die Schüttungen wurden in Form von Dreiecksmieten errichtet. Diese Ausformung ist in Bayern weit verbreitet und auch bei anderen landwirtschaftlichen Erzeugnissen üblich.

Sie bietet diverse Vorteile gegenüber unförmigen Haufwerken (siehe Kapitel 5). Die Polter mit dem ungehackten Holz wurden am Rand desselben Lagerplatzes aufgesetzt (Abbildung 9).



*Abbildung 9: Ungehacktes Energierundholz (links) und Waldrestholz (rechts) zum Vergleich mit der Lagerung in Form von Hackschnitzeln*

#### **7.1.1.1 Aufbau und Probenahme der Lagermieten und Polter**

Das Hackholz für die Mieten wurde nahezu zeitgleich zum Versuchsaufbau frisch im Wald gehackt und mit Container-Lkw zum Lagerplatz gefahren. Der eingesetzte Hacker war ein Lkw-Trommelhacker (Heizohack HM 14-800 KL, Heizomat Gerätebau-Energiesysteme GmbH) mit 294 kW Leistung und einer offenen 500 mm-Trommel, ausgestattet mit frisch geschliffenen Messern. Der Aufbau des Versuchs dauerte 5 Tage. Am ersten Tag wurde die Messtechnik installiert und der Platz vorbereitet. Anschließend wurde an jedem weiteren Tag eine Miete schrittweise vertikal mit einem Radlader auf eine Höhe von 3 m aufgeschüttet. Diese Höhe wurde gewählt, da sie mit einem normalen Radlader i. d. R. noch ohne Befahren der Schüttung problemlos erreicht werden kann; bei wesentlich höheren Schüttungen bestünde die Gefahr einer Selbstentzündung im Lager (siehe Abschnitt 4.4.2).

Beim Aufbau der Versuche wurde jeder eintreffende Container (ca. 35 Srm) nach dem Abkippen drei Mal hinsichtlich Wassergehalt und Schüttdichte beprobt, um Orientierungswerte für das komplette Versuchsmaterial zu bekommen. Die Probenahme während der Lagerung erfolgte mittels Bilanzbeuteln; diese Methode hatte sich in den Vorversuchen als am besten geeignet erwiesen (siehe Abschnitt 6.2). Die Hackschnitzel zur Befüllung der Bilanzbeutel wurden zunächst intensiv mit einem Radlader homogenisiert



(Abbildung 10), um für alle Proben einer Miete die gleichen Ausgangsvoraussetzungen zu schaffen und um eine geringe Streuung der Einlagerungswerte zu erreichen.



*Abbildung 10: Homogenisierung der Hackschnitzel mit dem Radlader zur Gewinnung von einheitlichem Probenmaterial zur Befüllung der Bilanzbeutel*

Von diesen gut durchmischten Hackschnitzeln wurden während der Befüllung der Bilanzbeutel regelmäßig Proben für die Bestimmung der Ausgangswerte für den Wassergehalt (36 je Miete), den Aschegehalt und den Heizwert (12 je Miete) sowie die Partikelgrößenverteilung genommen (3 je Miete). Beim direkt anschließenden Aufbau der Miete wurden die Bilanzbeutel nach einem vorgegebenen Raster in die Schüttung eingebracht und dann während der Lagerdauer nach festgelegten Zeitintervallen mit einem Radlader am Zugseil herausgezogen. Durch diese Probenahmemethode wurde eine Beprobung im laufenden Lagerungsbetrieb ermöglicht, wobei die Mietenschüttung nur sehr geringfügig gestört wurde.

Insgesamt wurden in jeder Miete 144 Bilanzbeutel platziert (Abbildung 11). Der Mietenquerschnitt wurde hierbei durch jeweils 12 gleichmäßig verteilte Bilanzbeutel komplett erfasst. Die zeitliche Auflösung wurde durch das Beprobieren von drei Segmenten, bestehend aus je vier hintereinanderliegenden Querschnitten, die zu vier Probenahmezeitpunkten beprobt wurden, realisiert. Die Beprobungsintervalle waren zu Versuchsbeginn enger gewählt als gegen Versuchsende, da in der ersten Phase der Lagerung die größten Veränderungen erwartet wurden. Die Probenahmen erfolgten 3, 6, 12 und 21 bzw. 22 Wochen nach Versuchsaufbau. Um statistische Berechnungen zu ermöglichen und

um die Datenqualität weiter zu erhöhen, wurden zwei weitere vollständige Probensegmente als Messwiederholungen angelegt (Abbildung 11).

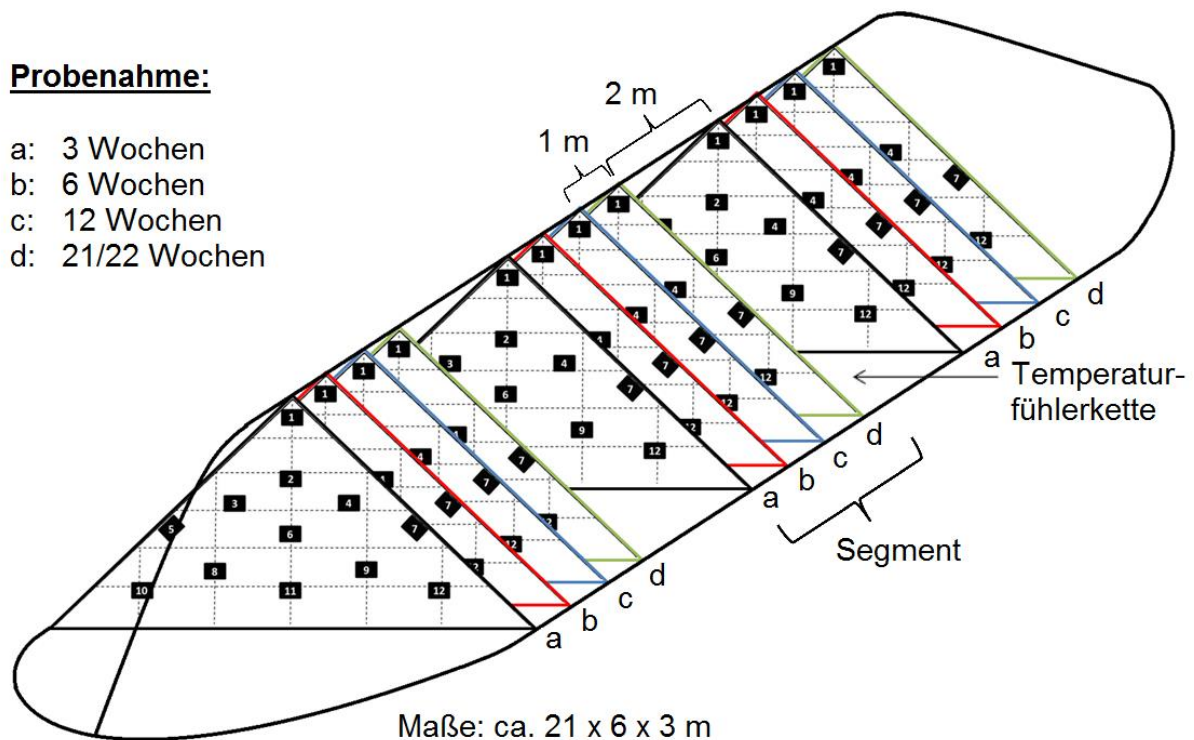


Abbildung 11: Probenahmepunkte (schwarze Kästchen) mit verschiedenen Entnahmezeitpunkten (a, b, c, d) und Messwiederholungen (3 Segmente)

Um die Bildung unterschiedlicher Schichten in den Hackenschnitzelmieten während der Lagerung nachzuweisen, wurden für den Mietenquerschnitt drei verschiedene Schichten definiert (Abbildung 12). Der Deckschicht wurden drei Bilanzbeutel (Beutel 1, 5 und 7), der Zwischenschicht fünf Bilanzbeutel (Beutel 2, 3, 4, 10 und 12) und der Kernzone vier Bilanzbeutel (Beutel 6, 8, 9, 11) zugeordnet. Durch die Messwiederholungen wurden somit bei jeder Miete zu jedem Probenahmezeitpunkt 9 Beutel aus der Deckschicht, 15 aus der Zwischenschicht und 12 aus der Kernzone gewonnen. Diese Gruppen konnten dann hinsichtlich Wassergehalt und Trockenmasseverlust statistisch ausgewertet werden (siehe Abschnitt 7.1.4). Insgesamt wurden 32 Fälle (4 Mieten, 4 Probenahmetermine und 2 Durchgänge) untersucht.

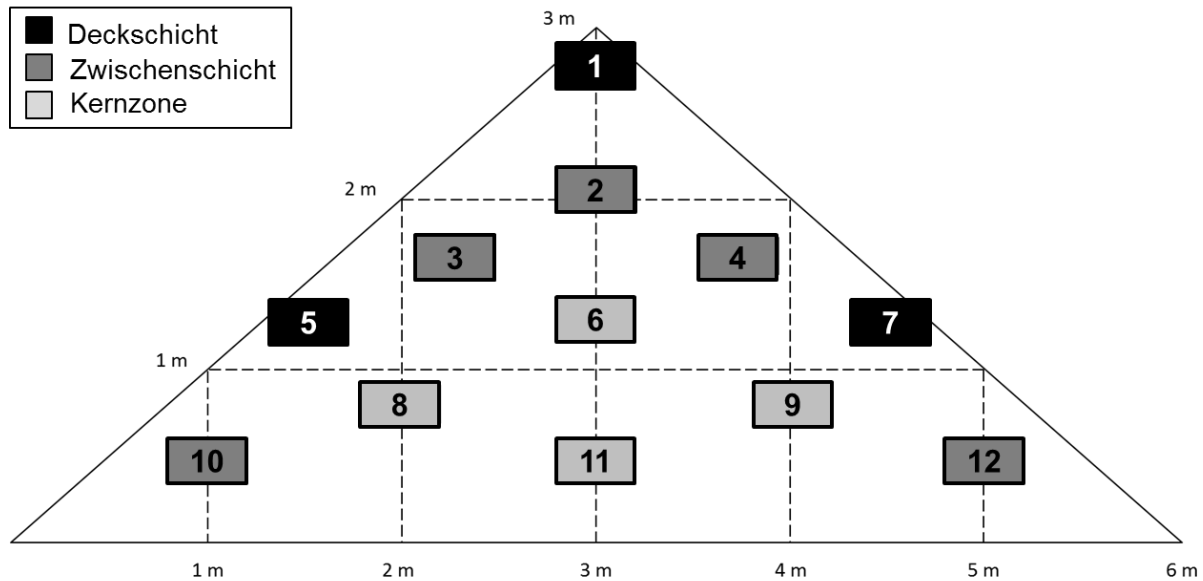


Abbildung 12: Probenverteilung nach Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht, Kernzone) in den Lagermieten

Über eine Wetterstation (iMetos pro, Pessl Instruments) wurden direkt auf dem Lagerplatz Lufttemperatur und -feuchte, Niederschlag, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit ermittelt, um die jahreszeitlichen Witterungsunterschiede quantifizieren zu können. Außerdem wurde in jeder Miete die Mietentemperatur in drei Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m) mit Temperaturfühlerketten durch die Wetterstation gemessen.

Das ungehackt gelagerte Holz konnte nicht mit Bilanzbeuteln beprobt werden. Der Einlagerungszustand der Polter wurde aus den Einlagerungsmittelwerten der Hackschnitzelmieten, die aus dem jeweiligen Material aufgebaut worden waren, abgeleitet. Es wurden hierfür nicht nur die Messungen an den für die Beutelbefüllung homogenisierten Hackschnitzeln, sondern auch die Zusatzmessungen an der kompletten Lieferung herangezogen. Messungen während der Lagerdauer wurden an den Poltern nicht durchgeführt, da eine repräsentative Beprobung solch inhomogener Polter im laufenden Lagerungsbetrieb nicht möglich gewesen wäre. Nach fünf Monaten Lagerung wurden die Polter gehackt und die Hackschnitzel analysiert. Das Gesamtgewicht der Polter wurde bei Ein- und Auslagerung mit einer Überfahrwaage (Auflösung: 10 kg) gemessen. Unter den Poltern war ein wasserdurchlässiges Bodenschutzgewebe ausgelegt worden, um herabrieselnde Nadeln, Rinde und Feinreisig aufzufangen. Die Masse dieses Materials wurde ebenfalls bei Auslagerung gewogen.

### 7.1.1.2 Probenaufbereitung

Nach der Probenahme erfolgte die Probenaufbereitung in Anlehnung an DIN EN 14780 [30]. Zunächst wurden die Bilanzbeutel vorsichtig mit einer Handbürste von überschüssigem Material befreit, welches sich außen am Raschelsack bzw. zwischen Raschelsack und Maschendraht befand. Das Zugseil wurde entfernt und der Beutel gewogen (Präzisi-

onswaage 470-36, Kern & Sohn GmbH; Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  g). Anschließend wurden die Hackschnitzel aus dem Beutel mit einem Riffel-Probenteiler (Haver RT50, Haver & Boecker OHG) in zwei homogene Teilproben geteilt (Abbildung 13).

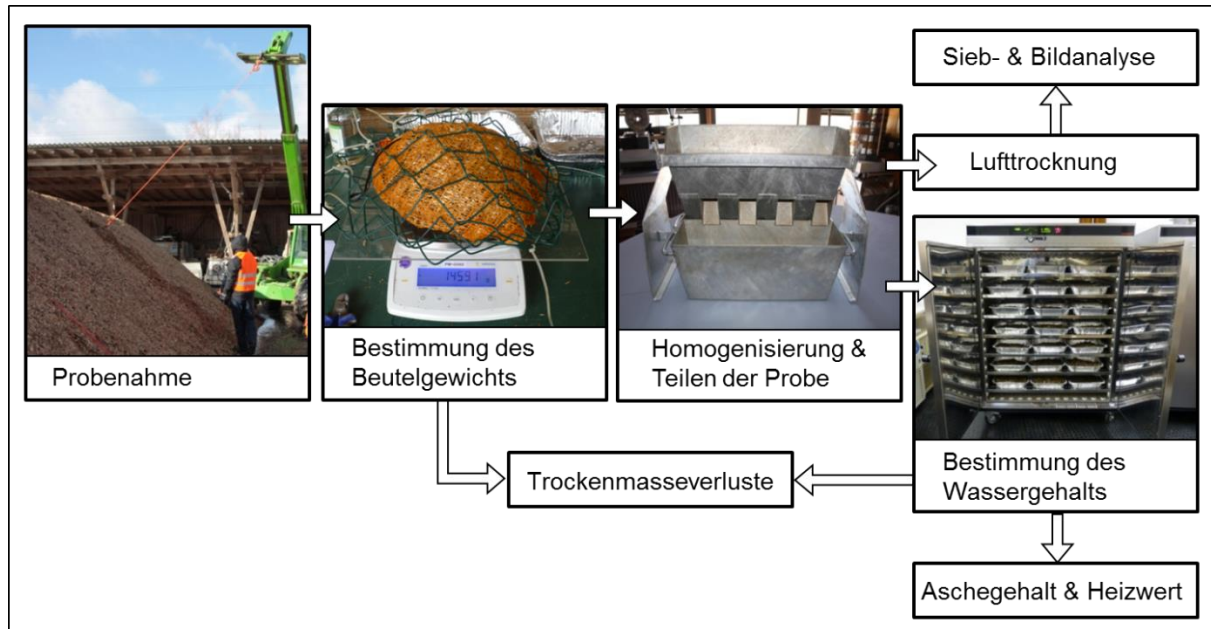


Abbildung 13: Probenahme und Probenaufbereitung für anschließende Analysemethoden

Die eine Hälfte der Probe wurde zur Bestimmung des Wassergehalts über die Trockenschrankmethode noch direkt am Feld in Aluminiumschalen eingewogen (siehe Abschnitt 7.1.3.1). Die zweite Hälfte der Hackschnitzelprobe wurde zur Lufttrocknung ebenso in Aluminiumschalen abgefüllt. Die zweite Probe diente hierbei der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung über die Siebanalyse und zur Bestimmung verschiedener Formparameter durch das Bildanalyseverfahren (siehe Abschnitt 7.1.3.3).

### 7.1.2 Bilanzierung der Trockenmasseverluste

Die Trockenmasseverluste während der Lagerung wurden bei den Hackschnitzelmieten über die Änderungen der Masse und des Wassergehalts der Hackschnitzelproben in den Bilanzbeuteln errechnet.

Beim Aufbau der Versuche wurde das Gewicht des leeren Beutels, bestehend aus zwei Netzraschelsäcken, Maschendraht, Kabelbinder sowie Unterlegscheibe mit Beutelnummer (siehe Abschnitt 6.2), erfasst. Nach der Befüllung wurde der gesamte Beutel gewogen und durch Abzug des Leergewichts, im Folgenden „Ummantelungsgewicht“, die Masse der Hackschnitzelprobe bei Einlagerung errechnet.

Nach der Probenahme wurden die Bilanzbeutel mit einer Bürste von anhaftendem Material befreit und zurückgewogen (siehe Abschnitt 7.1.1.2). Da sich das Ummantelungsge-

wicht während der Lagerung – vermutlich durch Aufnahme/Anhaften von Wasser und Feinstpartikeln – leicht änderte, wurden Korrekturwerte ermittelt und in die Berechnung des Trockenmasseverlusts einbezogen (siehe Anhang, Abbildung 47). Um darüber hinaus zu untersuchen, ob Material durch den Beprobungsvorgang in die Bilanzbeutel ein- oder ausgetragen wird (v. a. durch das Herausziehen aus der Miete), wurden beim Abbau des Winterversuchs zusätzlich Zugversuche unternommen. Dabei wurden Beutel befüllt und in Mieten eingebaut, diese mit der Radladerschaufel verdichtet, um eine Setzung während der Lagerung zu simulieren, und die Beutel direkt im Anschluss aus der Schüttung gezogen und gewogen. Da in dieser kurzen Zeit keine Abbauprozesse und Wassergehaltsänderungen zu erwarten waren, konnten aus der Wiegung vor und nach der Ziehung Rückschlüsse auf mögliche Verfälschungen gezogen werden. Die Ergebnisse wurden bei der Berechnung des Trockenmasseverlusts berücksichtigt (siehe Anhang, Abbildung 48). Die Bestimmung des Wassergehalts der Hackschnitzelprobe im Bilanzbeutel konnte bei der Einlagerung nur indirekt über das stichpunktartige Beprobieren des homogenisierten Hackschnitzelvorrats während der Beutelfüllung (siehe Abschnitt 7.1.1.1) erfolgen. Bei Auslagerung hingegen konnten die Hackschnitzel des Beutels direkt beprobirt werden (siehe Abschnitt 7.1.3.1).

Auch bei den Poltern aus ungehacktem Holz wurden die Trockenmasseverluste über die Masse- und Wassergehaltsänderung des Holzes zwischen Ein- und Auslagerung bestimmt. Im Unterschied zu den Hackschnitzelmieten wurden die Polter jedoch komplett gewogen (siehe Abschnitt 7.1.1.1).

### 7.1.3 Brennstoffanalysen

Die Brennstoffproben, welche bei der Ein- und Auslagerung und bei der Probenahme während der Lagerung durch das Ziehen der Bilanzbeutel anfielen, wurden nach aktuellen europäischen EN-Normen für biogene Festbrennstoffe auf die jeweiligen Brennstoffeigenschaften hin analysiert (Tabelle 6). In der Zwischenzeit wurden einige dieser Normen durch international gültige ISO-Normen ersetzt, wobei die eingetretenen Veränderungen bei den Methoden nur sehr geringfügig sind und für die Ergebnisse keine Relevanz besitzen.

*Tabelle 6: Übersicht über die Bestimmungsverfahren der Brennstoffeigenschaften*

Brennstoffeigenschaft	Bestimmungsverfahren	Ersetzt durch (seit)
Wassergehalt	DIN EN 14774-2 [24]	DIN EN ISO 18134-2 (12/2015) [36]
Aschegehalt	DIN EN 14775 [26]	DIN EN ISO 18122 (03/2016) [35]
Partikelgrößenverteilung	DIN EN 15149-1 [29]	DIN EN ISO 17827-1 (10/2016) [33]
Partikelform	Eigenes Verfahren	-
Schüttdichte	DIN EN 15103 [28]	DIN EN ISO 17828 (05/2016) [34]
Heizwert	DIN EN 14918 [27]	DIN EN ISO 18125 (Entwurf)



### 7.1.3.1 Wassergehalt und Schüttdichte

Zur Bestimmung des Wassergehalts wurde, wie bereits in Kapitel 7.1.1.2 beschrieben, die Hälfte eines jeden Bilanzbeutels in Aluschalen eingewogen (Präzisionswaage 470-36, Kern & Sohn GmbH; Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  g) und im Trockenschrank bei  $105 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach dem Trocknen wurde der Trocknungsbehälter mit dem Brennstoff im noch heißen Zustand und innerhalb von 15 Sekunden zurückgewogen. Der Wassergehalt im Anlieferungszustand („ar“, englisch für „as received“) wird wie folgt berechnet [24]:

$$M = \frac{m_W}{m_B + m_W} \cdot 100 \quad \text{[Formel 1]}$$

$M$  stellt dabei den Wassergehalt in m-%,  $m_W$  die Masse des Wassers im Brennstoff und  $m_B$  die Masse der trockenen Biomasse dar.

Die Schüttdichte (in  $\text{kg m}^{-3}$ ) wurde jeweils bei Ein- und Auslagerung der Hackschnitzella-germieten nach DIN EN 15103 bestimmt. Dafür wird ein 50 l Zylinder mit Hackschnitzeln befüllt. Das Probenmaterial wird dabei aus einer Höhe von 20 bis 30 cm über dem Zylinderrand in den Behälter geschüttet [28]. Sobald sich ein Hackschnitzel-Kegel über der Öffnung gebildet hat, wird alles überschüssige Material von der Oberfläche mit einem Kantholz entfernt. Anschließend wird der Behälter aus 15 cm Höhe dreimal fallen gelassen, damit sich das Material setzen kann. Daraufhin wird der Zylinder erneut befüllt und, nachdem überschüssiges Material wieder entfernt wurde, gewogen. Die Schüttdichte (BD, englisch für „bulk density“) im Anlieferungszustand wird aus dem Verhältnis des gestauchten Hackschnitzelgewichts (in kg) und dem Füllvolumen des Behälters berechnet (in  $\text{m}^3$ ). Vor allem der Wassergehalt beeinflusst das Gewicht und somit die berechnete Schüttdichte einer Probe.

### 7.1.3.2 Aschegehalt und Heizwert

Für die Bestimmung des Aschegehalts und des Heizwerts wurde eine Teilchengrößenreduktion der Probe vorgenommen, indem das ofentrockene Probenmaterial gemahlen und luftdicht verschlossen wurde. Das Mahlen erfolgte in zwei Arbeitsschritten: Zuerst wurde das Material mit einer Grobmühle (SM2000, Retsch GmbH & Co. KG) vorzerkleinert und daraufhin mit einer Zentrifugalmühle (ZM100, Retsch GmbH & Co. KG) auf  $< 1^\circ\text{mm}$  gemahlen.

Für die Bestimmung des Heizwertes und des Aschegehaltes ist die Kenntnis des Wassergehalts der gemahlene Probe notwendig. Die Bestimmung dieses sogenannten „analysefeuchten Wassergehalts“ erfolgte nach DIN EN 14774-3 [25] parallel zur Aschegehaltsmessung. Für die Bestimmung wird 1 g gemahlene Probe eingewogen und für vier Stunden im Trockenschrank bei  $105 ^\circ\text{C}$  getrocknet und anschließend zurückgewo-

gen. Um Messunsicherheiten ausschließen zu können, werden Doppelbestimmungen durchgeführt und bei einer Messabweichung von 0,2 m-% die Messung wiederholt.

Der Aschegehalt wurde nach DIN EN 14775 analysiert. An jeder gemahlene Probe wird hierbei eine Doppelbestimmung durchgeführt. Dazu wird eine Teilprobe von 1 g in einem Tiegel eingewogen. Diese Teilprobe wird über vier Stunden unter geregelten Bedingungen in einem Muffelofen (LT 15/13, Nabertherm GmbH) stufenweise bei max. 550 °C verascht [26]. Das Ergebnis wird auf den absolut trockenen Brennstoff bezogen, damit unterschiedliche Ausgangswassergehalte keine Fehlinterpretation verursachen.

Der Heizwert wurde nach DIN EN 14918 in dem Bombenkalorimeter (C 2000 basic, IKA Analysetechnik) bestimmt. Dabei wird 1 g gemahlene Probenmaterial eingewogen und unter hohem Druck und unter Sauerstoffüberschuss verbrannt. Die Wärmemenge, die dabei freigesetzt wird, unter Berücksichtigung der Kondensationsenergie des freien und des gebundenen Wassers, entspricht dem Brennwert. Für die Berechnung des Heizwertes wurden Datenbankwerte für die Konzentrationen an Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel verwendet. In die Darstellung des Heizwertes auf wasserfreier Basis („wf“) fließt zusätzlich der Wassergehalt der zugehörigen Analyseprobe mit ein [27]. Um den tatsächlichen Heizwert im Anlieferungszustand („ar“) darstellen zu können, kann der wasserfreie Heizwert mit folgender Formel berechnet werden.

$$H_{u(as)} = \frac{H_{u(wf)} (100 - w) - 2,443 w}{100} \quad \text{[Formel 2]}$$

Aufgrund des sehr hohen Arbeits- und Zeitaufwands für das Mahlen der Proben und die anschließenden Analysen wurden Aschegehalt und Heizwert nur an einem Segment je Miete und Probenahme bestimmt. Es wurden daher 12 Bilanzbeutel, d. h. jeder dritte Beutel, je Probenahme und Miete analysiert. Auch bei Einlagerung wurden die Bestimmungen auf 12 Proben je Miete und bei der Auslagerung auf mindestens 6 je Polter beim Aschegehalt und 5 je Polter beim Heizwert begrenzt.

### 7.1.3.3 Sieb- und Bildanalyse

Die luftgetrockneten Proben (Wassergehalt < 20 m-%) wurden für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und Partikelform verwendet. Da für die Bestimmung dieser Parameter eine Probenmenge von 8 l benötigt wird, war die Menge je Bilanzbeutel nicht ausreichend. Somit wurden Sieb- und Bildanalysen nach Schichten durchgeführt (siehe Abschnitt 7.1.1.1). Je Probenahme und Lagermiete wurden somit 36 Proben aus 3 Segmenten auf 3 Proben (1 × Deckschicht, 1 × Zwischenschicht, 1 × Kernzone) je Probenahme und Miete reduziert.

Die Partikelgrößenverteilung wurde mit dem Rüttelsiebverfahren nach DIN EN 15149-1 bestimmt. Dabei kam eine horizontale Rüttelsiebmaschine zum Einsatz (KS1 Plansiebmaschine, Retsch GmbH). Es wurden mit zunehmender Lochgröße sechs Rundlochsie-

be und eine Auffangschale aufeinander gesteckt (3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm, 63 mm) und von oben mit ca. 8 l Material befüllt. Mit einer Rüttelgeschwindigkeit von 200 Umdrehungen pro Minute und einer Siebdauer von 15 min wurde das Material in die jeweiligen Siebfractionen separiert. Das auf den Sieben verbliebene Material wurde auf 0,1 g genau gewogen und das Ergebnis als Anteil (m-%) der Gesamtmasse aller Fraktionen angegeben [29]. Anhand der Daten lassen sich die Proben den Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225-4 zuordnen (siehe Tabelle 2). Hierzu müssen zusätzlich die maximale Länge der Partikel (in mm) und der maximale Teilchendurchmesser (in  $\text{cm}^2$ ) durch Messung von Hand bestimmt werden.

Neben der Siebanalyse wurden Proben der Ein- und der Auslagerung zusätzlich mit einem fotooptischen Bildanalyseverfahren untersucht. Das Verfahren misst über ein Bildanalysegerät (CP4, Haver & Boecker) die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform einer Brennstoffprobe. Hierbei wird dieselbe 8 l-Teilprobe verwendet, welche vorab mit der Siebanalyse gemessen wurde. Die Probe passiert von dem Probenbehälter eine Vibro-Rinne (langsamer Transport) und anschließend ein Förderband (schneller Transport). Dabei werden die Einzelpartikel voneinander losgelöst. Nach dem Förderband fliegen die Partikel an einer linearen Lichtquelle vorbei, welche gegenüber einer digitalen CCD Kamera angebracht ist. Die Kamera nimmt dabei ein 2D-Schattenbild von jedem Partikel auf. Neben verschiedenen Längen- und Breitenparametern wird dabei auch die Partikelform analysiert. Diese wird z. B. durch den Kornformfaktor (KFF, dimensionslos) gemessen, der ein Maß für die Rundheit eines Partikels wiedergibt, indem der Umfang eines Partikels in Relation zum Umfang eines flächengleichen Kreises gesetzt wird [54].

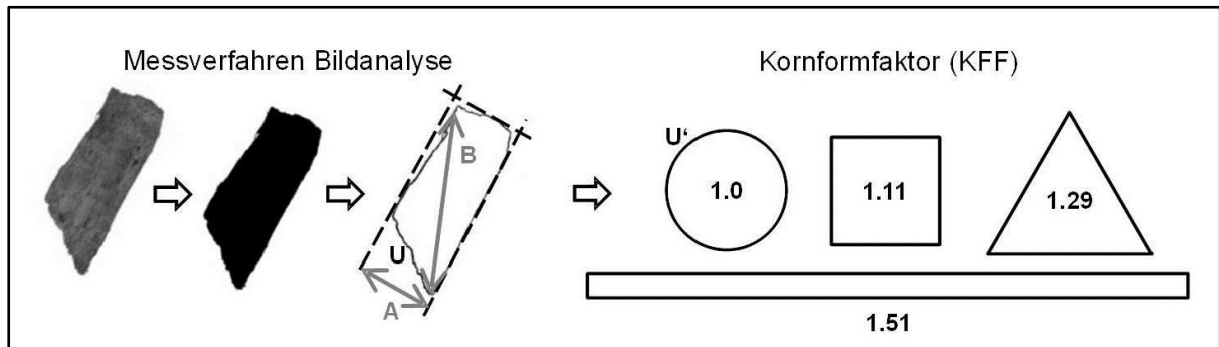


Abbildung 14: Messverfahren der Bildanalyse und Beispiele für den Kornformfaktor; A = minimaler Feret, B = maximale Partikellänge, U = Partikelumfang, U' = Umfang eines flächengleichen Kreises [61]

Zur Darstellung der Oberflächenbeschaffenheit wird die Rauigkeit der Partikel angegeben. Diese wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$RAU = \frac{KFF}{L_{max}/B_{max}} \quad \text{[Formel 3]}$$

Die Rauigkeit zeigt das Verhältnis der Rundheit eines Partikels zum Verhältnis der maximalen Länge ( $L_{\max}$ ) und der maximalen Breite ( $B_{\max}$ ) [54].

#### 7.1.4 Statistische Auswertungen

Statistische Analysen wurden mit den Programmen STATISTICA 12, Origin Pro 2015, Microsoft Excel 2010 sowie SAS 9.3 durchgeführt.

Das Ziel der statistischen Tests bestand darin, herauszufinden, ob Mittelwertunterschiede zwischen verschiedenen Gruppen als zufällig, z. B. aufgrund hoher Streuung der Werte, oder als nicht zufällig (signifikant) beurteilt werden konnten. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf 5 % festgelegt (Überschreitungswahrscheinlichkeit  $p \leq 0,05$ ).

Um herauszufinden, welche Faktoren den Lagerungsprozess beeinflussen und wie stark dieser Effekt ist, wurde mit den Wassergehalts- und Trockenmasseverlustdaten eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die Testvoraussetzungen Normalverteilung und Varianzhomogenität wurden nicht geprüft, da für jede Miete und jeden Probenahmezeitpunkt nur drei Mittelwerte vorlagen (abgeleitet aus den drei beprobten Querschnitten). Es wurde davon ausgegangen, dass diese Messgrößen entlang ein und derselben Miete einer Normalverteilung folgen.

Um die Schichtbildung innerhalb der Hackschnitzelmieten nachzuweisen, wurden zunächst alle Gruppen (siehe Abschnitt 7.1.1.1) auf Normalverteilung geprüft (Shapiro-Wilk-Test). Die drei Gruppen je Miete und Probenahmezeitpunkt wurden hinsichtlich Varianzhomogenität (Levene-Test) getestet. Da die Wassergehalte innerhalb der Schichten oftmals nicht normalverteilt waren, wurde ein nichtparametrischer Test (Kruskal-Wallis-Test) verwendet, um Unterschiede zwischen den Schichten nachzuweisen. Bei signifikanten Ergebnissen wurde ein Post-hoc-Test (Dunn's Test) durchgeführt, um herauszufinden, welche Schichten sich bezüglich des Wassergehalts von anderen unterschieden. Die Trockenmasseverlustdaten wurden mit einer ANOVA und einem Scheffé-Test (Post-hoc-Test) analysiert, da die Gruppen in nahezu allen Fällen normalverteilt waren. Allerdings wurde die Varianzhomogenität in etwa einem Drittel der Fälle abgelehnt, weshalb die Daten zusätzlich mit dem Kruskal-Wallis-Test untersucht wurden. Da diese Testergebnisse vergleichbare Interpretationen zuließen, wurden die ANOVA/Scheffé-Ergebnisse für die Beurteilung der Schichtbildung hinsichtlich der Trockenmasseverluste verwendet.

Die Messdaten der ungehackten Polter wurden ebenfalls auf Normalverteilung und Varianzhomogenität geprüft. Waren diese Voraussetzungen für parametrische Tests erfüllt, wurde der t-Test angewandt, da es nur zwei Gruppen (Ein- und Auslagerung) gab. Bestand keine Normalverteilung oder Varianzhomogenität, wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test durchgeführt.

Bei Korrelationsanalysen wurde der Korrelationskoeffizient von Pearson verwendet. Ausreißer wurden bei den Trockenmasseverlustdaten getrennt nach Schichten (siehe Ab-

schnitt 7.1.1.1) mithilfe der zweifachen Standardabweichung identifiziert und durch den Mittelwert der beiden anderen Beutel an der gleichen Position im Mietenquerschnitt ersetzt (s. Anhang, Abbildung 49). Beim Wassergehalt wurden nur die Daten zur Einlagerung bereinigt, da sich die Wassergehalte während der Lagerung oftmals sehr heterogen entwickelten und keine offensichtlich falschen Messwerte identifiziert werden konnten.

## 7.2 Ergebnisse und Diskussion

### 7.2.1 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Der mittlere Wassergehalt der Hackschnitzel für die Bilanzbeutel lag zwischen 47,9 und 56,8 m-% bei der Einlagerung. Dies ist ein typischer Bereich für frische Waldhackschnitzel [61]. Da das Kronenmaterial einen hohen Anteil an Nadeln und Feinreisig besaß, hatten die Hackschnitzel aus Waldrestholz (Wrh-HS) einen deutlich höheren Feinanteil und Aschegehalt als die Hackschnitzel aus Energierundholz (Er-HS).

*Tabelle 7: Mittlerer Wassergehalt, Feinanteil ( $\leq 3,15$  mm Partikellänge), Partikelfraktion  $\leq 8$  mm, Aschegehalt und Heizwert der Hackschnitzel in den Bilanzbeuteln vor der Lagerung ( $\pm$ Standardabweichung)*

Parameter	Variante	Winterversuch	Sommerversuch
Wassergehalt (m-%)	Wrh offen	51,1 ( $\pm 0,6$ ) [n = 35]	50,4 ( $\pm 0,7$ ) [n = 34]
	Wrh Vlies	50,7 ( $\pm 0,7$ ) [n = 35]	56,8 ( $\pm 0,5$ ) [n = 34]
	Er offen	56,6 ( $\pm 0,8$ ) [n = 35]	47,9 ( $\pm 0,5$ ) [n = 35]
	Er Vlies	55,1 ( $\pm 1,2$ ) [n = 33]	53,2 ( $\pm 1,0$ ) [n = 34]
Feinanteil $\leq 3,15$ mm (m-%)	Wrh*	24,9 ( $\pm 8,7$ ) [n = 3]	15,1 ( $\pm 1,8$ ) [n = 3]
	Er*	10,0 ( $\pm 2,2$ ) [n = 3]	7,5 ( $\pm 2,4$ ) [n = 3]
Fraktion $\leq 8$ mm (m-%)	Wrh*	47,7 ( $\pm 9,3$ ) [n = 3]	34,6 ( $\pm 1,7$ ) [n = 3]
	Er*	28,0 ( $\pm 1,7$ ) [n = 3]	17,8 ( $\pm 2,3$ ) [n = 3]
Aschegehalt (m-%, wf.)	Wrh offen	5,5 ( $\pm 1,3$ ) [n = 12]	2,2 ( $\pm 0,3$ ) [n = 12]
	Wrh Vlies	6,7 ( $\pm 0,8$ ) [n = 12]	2,4 ( $\pm 0,2$ ) [n = 12]
	Er offen	1,0 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]	1,5 ( $\pm 0,2$ ) [n = 12]
	Er Vlies	0,8 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]	0,9 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]
Heizwert (MJ kg <sup>-1</sup> , wf.)	Wrh offen	18,5 ( $\pm 0,2$ ) [n = 12]	18,4 ( $\pm 0,0$ ) [n = 12]
	Wrh Vlies	18,3 ( $\pm 0,2$ ) [n = 12]	18,6 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]
	Er offen	18,9 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]	18,5 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]
	Er Vlies	18,9 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]	18,7 ( $\pm 0,1$ ) [n = 12]

\*Mischprobe offen/Vlies

wf. = wasserfrei

Interessanterweise überstieg der Aschegehalt der Wrh-HS im Winter deutlich den erwarteten Wert für Waldrestholz von ca. 3 m-% [61]. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass das Kronenmaterial während der Ernte und/oder dem Rücken durch Mineralboden kontaminiert worden war [37]. Der wasserfreie Heizwert lag im typischen Bereich für Fichtenholz [49] (Tabelle 7).

### **7.2.2 Wetterbedingungen während der Lagerung**

Wetter und Klima können in vielerlei Hinsicht die Lagerungsprozesse beeinflussen. Im Folgenden werden die in diesem Versuch relevantesten meteorologischen Parameter näher beleuchtet. Zu diesen gehören Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte, da sie einen direkten Einfluss auf Trocknung sowie Miettemperatur und somit auch auf die Zersetzungsprozesse hatten (vgl. Abschnitte 4.4.2.2 und 6.2).

Am Lagerplatz fielen während des Winterversuchs 234 mm Niederschlag. Die mittlere Lufttemperatur lag bei 1,8 °C, die relative Luftfeuchte bei 90,4 % (Abbildung 15). Die Niederschlagswaage der Klimastation war nicht beheizt, sodass Schneefall bei Tauwetter verzögert als Niederschlag registriert wurde. Die Wetterbedingungen entsprachen während des Winterversuchs an der nächstgelegenen und klimatisch vergleichbaren Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hinsichtlich des Niederschlags dem langjährigen Durchschnitt, wohingegen die Lufttemperatur um 1,0 °C höher lag [22].

Der Sommer 2015 war geprägt von einer überdurchschnittlich trockenen und warmen Witterung. An der Wetterstation des DWD fielen während des Sommersversuchs nur 59 % des langjährigen Niederschlags in diesem Zeitraum, und die mittlere Lufttemperatur lag um 1,1 °C über dem langjährigen Wert [22]. Am Lagerplatz kam es während des Sommersversuchs zu einer Regenmenge von 244 mm. Die mittlere Lufttemperatur lag bei 17,0 °C und die relative Luftfeuchte betrug im Mittel 68,7 % (Abbildung 16).

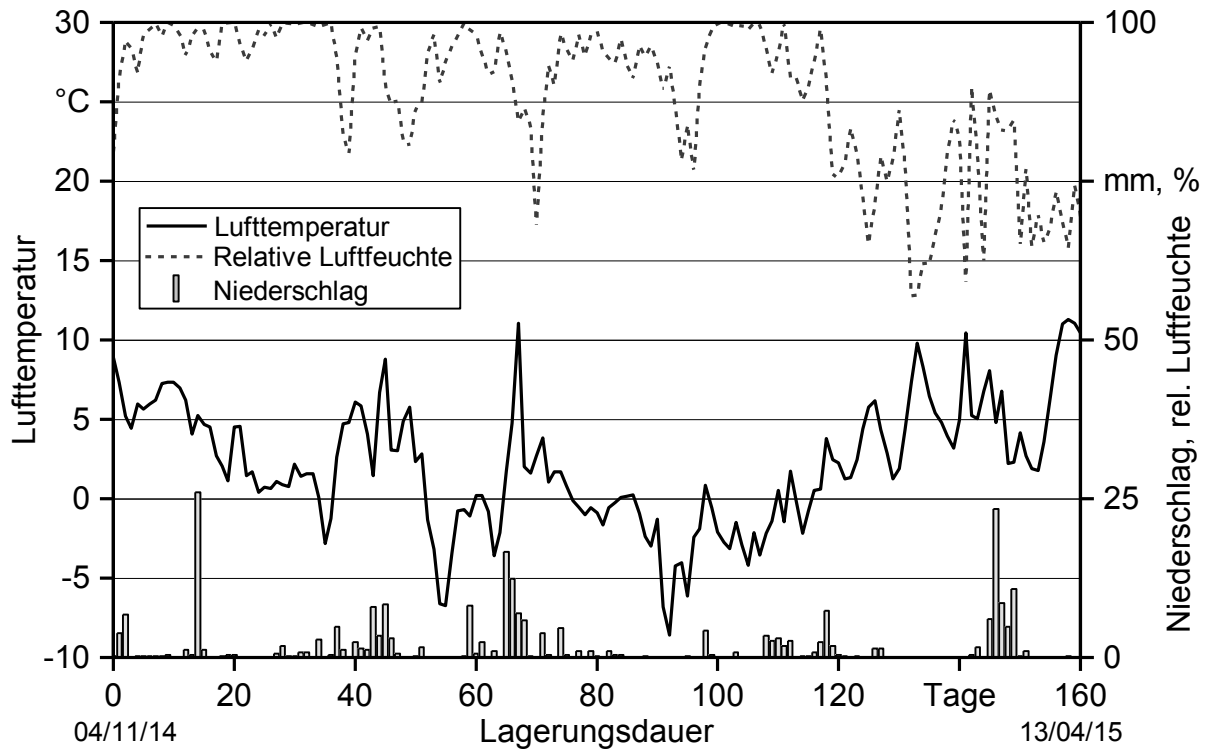


Abbildung 15: Niederschlag (Tagessummen), Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (Tagesmittelwerte) während des Winterversuchs

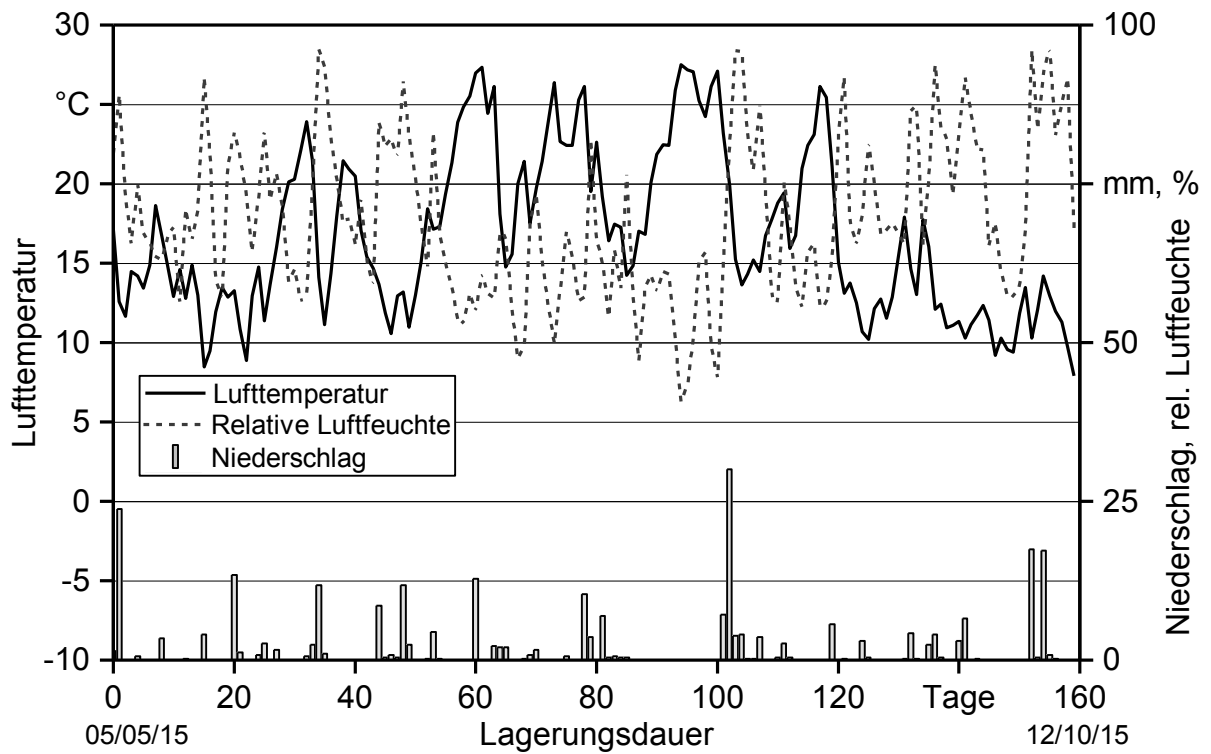


Abbildung 16: Niederschlag (Tagessummen), Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (Tagesmittelwerte) während des Sommersversuchs

### 7.2.3 Mietentemperatur

Der Verlauf der Mietentemperatur war in erster Linie vom Sortiment und von der Jahreszeit, der Lufttemperatur sowie zusätzlich von der Vliesabdeckung abhängig (Abbildung 17, Abbildung 18).

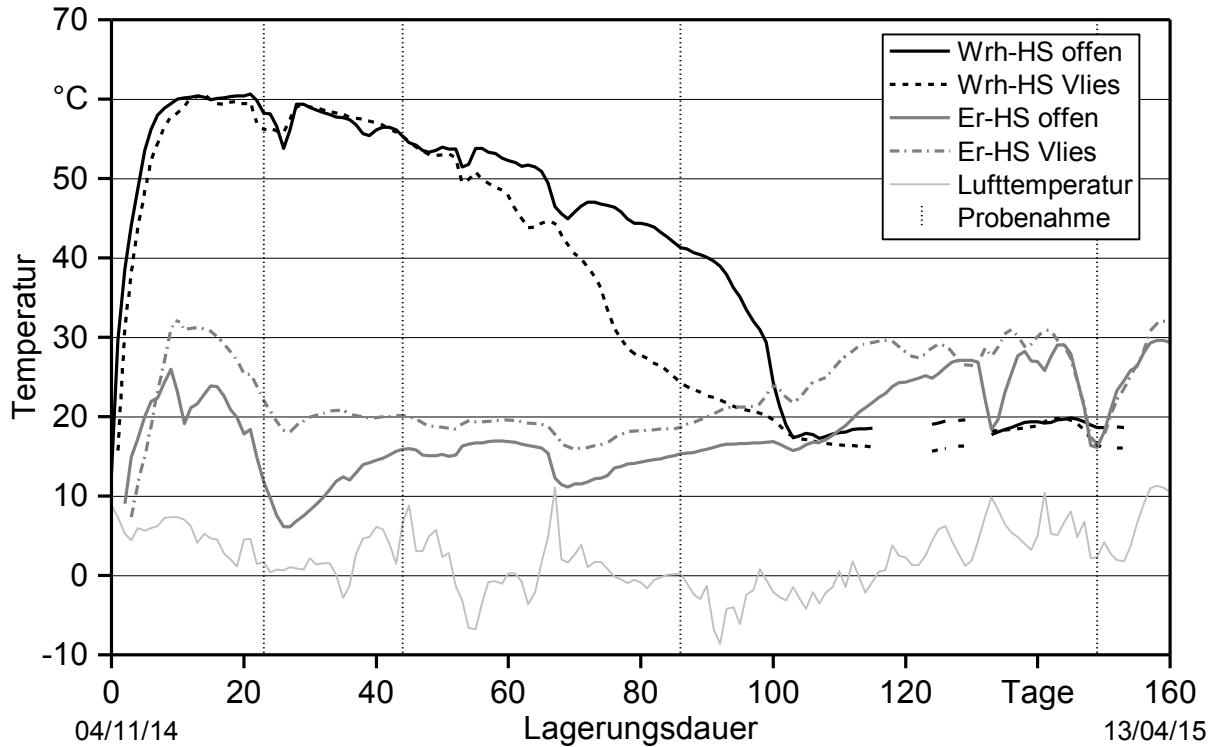


Abbildung 17: Mietentemperatur (Durchschnitt der Tagesmittelwerte aus 0,5; 1,5 und 2,5 m Messhöhe) und Lufttemperatur während des Winterversuchs

Die Waldrestholzhackschnitzel (Wrh-HS) erwärmten sich sowohl im Winter als auch im Sommer innerhalb weniger Tage auf ca. 60 °C mit Maximaltemperaturen von bis zu 64,5 °C. Während des Winterversuchs sank die Mietentemperatur bei den Wrh-HS nach 15 Wochen auf unter 20 °C. Die 20-Grad-Marke ist wichtig, da der optimale Wuchsbereich von holzzeretzenden Pilzen laut Literatur zwischen 20 und 50 °C liegt [14]. Im Sommer war die Temperaturabnahme stetiger und langsamer. Im Gegensatz zu den Waldrestholzhackschnitzeln erwärmten sich die Energierundholzhackschnitzel (Er-HS) deutlich schwächer. Im Winter kam es nach einem kurzen Anstieg auf ca. 33 °C (Maximaltemperatur 36,2 °C) zu einer 2-monatigen Phase mit Mietentemperaturen zwischen etwa 10 und 20 °C. Nach 10 Wochen begann ein konstanter Temperaturanstieg, sodass in den letzten Lagerungswochen die Temperaturen der Wrh-HS Miete übertroffen wurden. Im Sommer lagen die Temperaturen in den Er-HS Mieten über die gesamte Lagerdauer zwischen 20 und 40 °C (Maximaltemperatur 42,2 °C).



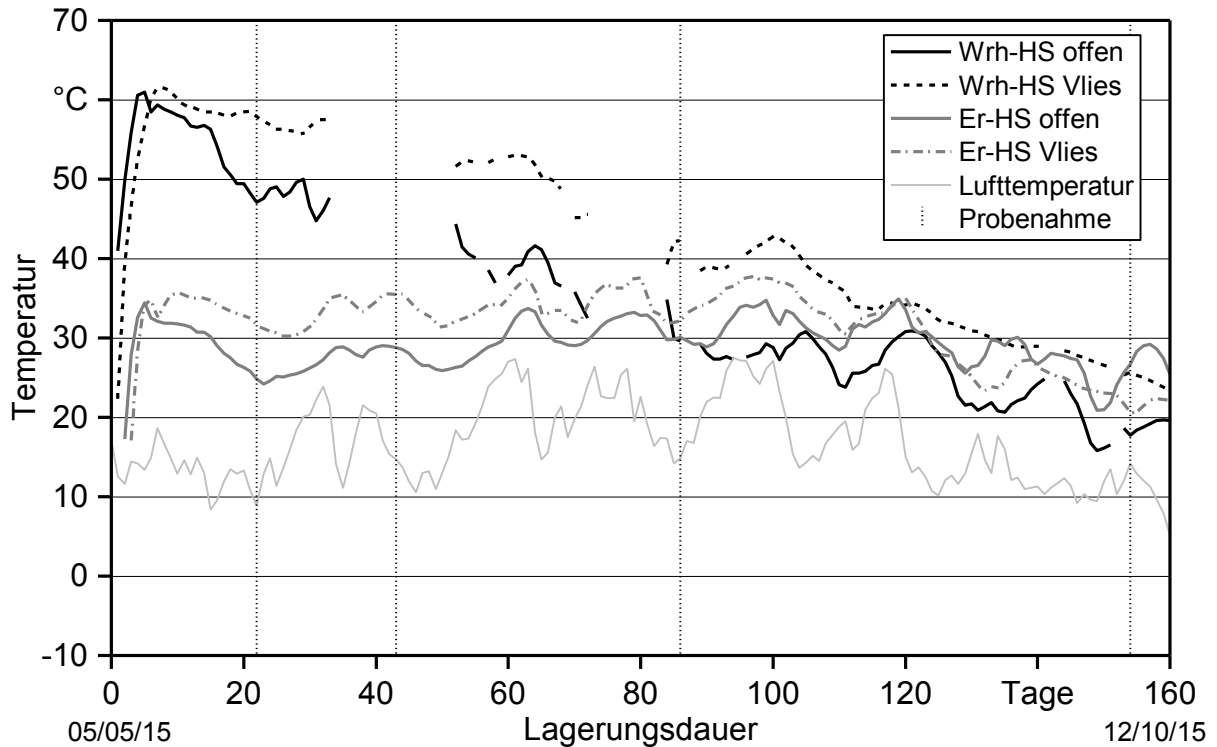


Abbildung 18: Mietentemperatur (Durchschnitt der Tagesmittelwerte aus 0,5; 1,5 und 2,5 m Messhöhe) und Lufttemperatur während des Sommersversuchs

Insgesamt ist ein Mietentemperaturanstieg ein Indikator für mikrobiologische Aktivität, kann aber auch durch chemische Reaktionen hervorgerufen werden [46]. Bei den Wrh-HS könnte ein hoher Nadel- und Feingehalt eine starke mikrobiologische Aktivität mit großer Wärmeentwicklung verursacht und gleichzeitig den Wärmeabfluss verringert haben. Nadeln enthalten viele leicht verfügbare Nährstoffe für mikrobielles Wachstum, und feine Partikel bieten eine große Oberfläche für die Zersetzung [14]. Die Wrh-HS hatten nicht nur einen etwa doppelt so hohen Feinanteil wie die Er-HS, der Anteil an Partikeln  $\leq 8$  mm Länge machte sogar fast die Hälfte der Gesamtmasse bei den Wrh-HS im Winterversuch aus (Tabelle 8).

In drei von vier Vergleichen verursachte das Vlies nahezu durchgehend höhere Mietentemperaturen, was einerseits auf Wärmestau und andererseits auf teilweise höhere Aktivität zurückzuführen sein könnte. In den abgedeckten Mieten lag die mittlere Mietentemperatur über den Gesamtversuch gesehen zwischen 2,8 und 8,3 °C höher als in den nicht abgedeckten Mieten (Tabelle 8). Lediglich in der abgedeckten Wrh-HS Miete im Winter führte das Vlies zu einem schnelleren Rückgang der Mietentemperatur im mittleren Temperaturbereich (30–50 °C), wodurch die mittlere Mietentemperatur um 4,1 °C unter dem der offenen Vergleichsmiete lag.

Insbesondere bei den Er-HS beeinflusste die Lufttemperatur die Mietentemperatur (Abbildung 18). Die Mietentemperatur folgte dort deutlich dem Trend der Lufttemperatur. Dies wurde möglicherweise durch den niedrigeren Feinanteil und das dadurch höhere Zwischenraumvolumen, welches in den Er-HS zu einer besseren Durchlüftung führte, hervorgerufen.

**Tabelle 8:** Durchschnittstemperatur (°C) der Hackschnitzelmieten (Mittelwerte der drei Sensoren je Miete)

	Wrh-HS offen	Wrh-HS Vlies	Er-HS offen	Er-HS Vlies
Winterversuch	40,1	36,0	17,8	22,8
Sommerversuch	36,0	44,3	29,3	32,1

#### 7.2.4 Wassergehaltsänderung

Die Sommerlagerung verursachte einen signifikanten Rückgang des Wassergehalts in allen Mieten. Der niedrigste Wassergehalt von 31,0 m-% (Tabelle 9) wurde in den abgedeckten Wrh-HS nach 5 Monaten Lagerdauer gemessen (Einlagerungswassergehalt: 55,1 m-%, Tabelle 7). Während der Winterlagerung verringerte sich dagegen nur in der abgedeckten Wrh-HS Miete der Wassergehalt deutlich.

**Tabelle 9:** Mittlerer Wassergehalt (m-%) nach 5 Monaten Lagerung (±Standardabweichung)

	Wrh-HS offen	Wrh-HS Vlies	Er-HS offen	Er-HS Vlies
Winterversuch	52,7 (±5,0)	36,9 (±0,8)	58,7 (±0,7)	52,8 (±0,5)
Sommerversuch	34,1 (±2,8)	34,2 (±0,8)	36,5 (±1,6)	31,0 (±0,5)

Dies bedeutet, dass die Hackschnitzel durch natürliche Trocknung im Sommer Wassergehalte erreichen können, die auch den Brennstoffanforderungen kleiner bis mittelgroßer Feuerungsanlagen (< 35 m-%) genügen können [42]. Allerdings erzielte trotz der im Sommer verhältnismäßig guten Bedingungen für die Freilandlagerung von Holzbrennstoffen und dem gemessenen starken Trocknungseffekt keine Miete einen lagerstabilen Wassergehaltsbereich. Der Höchstwert für Lagerstabilität liegt – je nach Literaturquelle – zwischen 15 und 30 m-% Wassergehalt [58] [70].

Der Wassergehalt der Hackschnitzelmieten war über den Gesamtversuch gesehen in abnehmender Effektstärke signifikant abhängig von der Jahreszeit, der Lagerdauer, dem Sortiment und der Vliesabdeckung (Tabelle 10):

- Im Sommer war die Trocknung stärker als im Winter,
- eine längere Lagerdauer führte zu einer stärkeren Trocknung,
- Wrh-HS trockneten stärker als Er-HS,
- mit Vliesabdeckung war die Trocknung stärker als ohne.

Zwischen den Faktoren traten zahlreiche Interaktionseffekte auf. Der Effekt der Lagerdauer wurde beispielsweise vom Effekt der Jahreszeit beeinflusst und umgekehrt, d. h., der Effekt der Lagerdauer war im Winter (unregelmäßige, schwache Trocknung) anders als im Sommer (kontinuierliche, starke Trocknung). Der Effekt des Vlieses interagiert mit dem Effekt der Lagerdauer: Der Trocknungseffekt des Vlieses verstärkte sich mit erhöhter Lagerdauer. Dies deutet darauf hin, dass es effizienter ist, ein Vlies für eine Langzeitlagerung als für eine Kurzzeitlagerung zu verwenden.

*Tabelle 10: Signifikante ( $p \leq 0,05$ ) Effekte der verschiedenen Faktoren (1–4) auf die Änderung des Wassergehalts während der Hackschnitzzellagerung (mehrfaktorielle ANOVA)*

Faktoren	Freiheitsgrade	MS	F	p	Partielles Eta-Quadrat*
Lagerdauer (1)	3	251,34	90,81	0,0000	0,81
Jahreszeit (2)	1	1432,76	517,67	0,0000	0,89
Sortiment (3)	1	555,73	200,79	0,0000	0,76
Vlies (4)	1	416,28	150,41	0,0000	0,70
(1)×(2)	3	225,19	81,36	0,0000	0,79
(1)×(3)	3	8,94	3,23	0,0281	0,13
(2)×(3)	1	25,17	9,10	0,0037	0,12
(1)×(4)	3	71,19	25,72	0,0000	0,55
(2)×(3)×(4)	1	88,60	32,01	0,0000	0,33
(1)×(2)×(3)×(4)	3	10,36	3,74	0,0153	0,15

\*Effektstärke

Die Effekte der Faktoren sind mit wenigen Ausnahmen auch auf die einzelnen Versuchsvarianten übertragbar. Im Winter war die Verdunstung durch die hohe relative Luftfeuchtigkeit und die niedrigen Lufttemperaturen eingeschränkt. Im Sommer führte dagegen das trocken-warme Wetter zu einem starken Rückgang des Wassergehalts (Abbildung 19). Die Waldrestholz hackschnitzeln trockneten aufgrund ihrer starken Eigenerwärmung teilweise auch im Winter. Bei der ungeschützten Miete wurde der Trocknungseffekt jedoch mit nachlassender Erwärmung durch Niederschläge wieder aufgehoben. Die ERHS-Mieten zeigten im Winter wegen ihrer nur sehr schwachen Eigenerwärmung und somit geringen Verdunstung keine Trocknung. Die Lagerdauer und die Abdeckung mit Vlies hatten daher bei diesen beiden Varianten im Winter kaum Auswirkungen. Im Sommer trockneten alle Mieten deutlich, wobei das Vlies die Wassergehaltsabnahme bei beiden Sortimenten durch Wärmestau und Regenschutz beschleunigte (Abbildung 20).

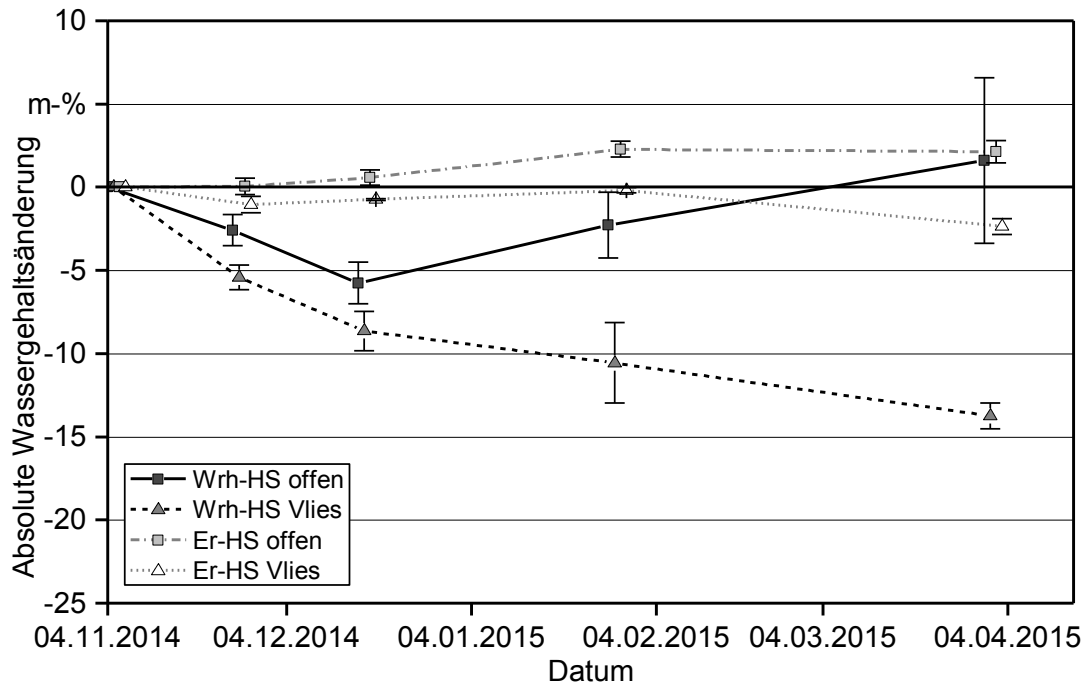


Abbildung 19: Mittlere absolute Änderung des Wassergehalts während des Winterversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel).

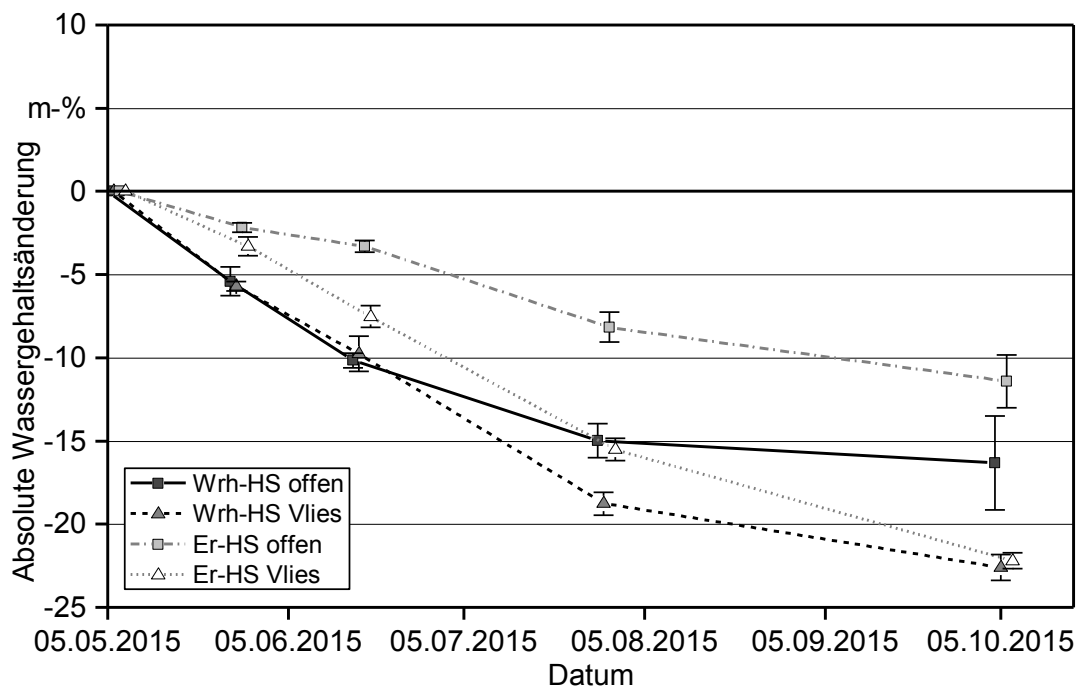


Abbildung 20: Mittlere absolute Änderung des Wassergehalts während des Sommerversuchs. Wrh-HS: Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS: Energierundholz hackschnitzel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel).

### 7.2.5 Trockenmasseverluste

Der höchste Trockenmasseverlust (bis zu 11,1 m-%) wurde in den Wrh-HS-Mieten festgestellt. Insgesamt hatten die Er-HS geringere Trockenmasseverluste (max. 6,9 m-%), zersetzten sich jedoch im Sommer ca. doppelt so stark wie im Winter (Tabelle 11).

*Tabelle 11: Durchschnittliche Trockenmasseverluste (m-%) nach 5 Monaten Lagerdauer ( $\pm$ Standardabweichung)*

	Wrh-HS offen	Wrh-HS Vlies	Er-HS offen	Er-HS Vlies
Winterversuch	7,8 ( $\pm$ 0,1)	8,0 ( $\pm$ 0,1)	3,4 ( $\pm$ 0,6)	4,2 ( $\pm$ 0,2)
Sommerversuch	7,0 ( $\pm$ 1,4)	11,1 ( $\pm$ 1,1)	6,8 ( $\pm$ 0,3)	6,9 ( $\pm$ 0,4)

Der Trockenmasseverlust der Hackschnitzelmieten war über den Gesamtversuch gesehen in abnehmender Effektstärke signifikant abhängig von der Lagerdauer, dem Sortiment, der Jahreszeit und der Vliesabdeckung (Tabelle 12):

- Längere Lagerdauer führte zu höheren Trockenmasseverlusten,
- Wrh-HS zersetzten sich stärker als Er-HS,
- im Sommer war der Trockenmasseverlust höher als im Winter,
- mit Vliesabdeckung war der Trockenmasseverlust höher als ohne.

Wie bei den Wassergehaltsänderungen traten auch bei den Trockenmasseverlusten Interaktionseffekte zwischen den Einflussfaktoren auf. Der Effekt der Jahreszeit interagierte beispielsweise mit dem Effekt des Vlieses, d. h., die Trockenmasseverluste erhöhten sich im Sommer stärker bei den Er-HS als bei den Wrh-HS.

*Tabelle 12: Signifikante ( $p \leq 0,05$ ) Effekte der verschiedenen Faktoren (1–4) auf die Trockenmasseverluste während der Hackschnitzellagerung (mehrfaktorielle ANOVA)*

Faktoren	Freiheitsgrade	MS	F	p	Partielles Eta-Quadrat*
Lagerdauer (1)	3	143,54	187,64	0,0000	0,90
Jahreszeit (2)	1	19,10	24,96	0,0000	0,28
Sortiment (3)	1	286,83	374,95	0,0000	0,85
Vlies (4)	1	8,18	10,69	0,0017	0,14
(1)×(2)	3	2,26	2,95	0,0391	0,12
(1)×(3)	3	5,34	6,99	0,0004	0,25
(2)×(3)	1	8,25	10,79	0,0017	0,14
(2)×(4)	1	4,07	5,32	0,0243	0,08
(2)×(3)×(4)	1	26,90	35,17	0,0000	0,35

\*Effektstärke

Die Abbaurate spiegelte sich in den durchschnittlichen Mietentemperaturen wider (Abbildung 21). Die Korrelation zwischen Trockenmasseverlust und Eigenerwärmung war bei den Wrh-HS Mieten stark, bei den Er-HS Mieten eher schwach ausgeprägt. Gründe hierfür könnten sein, dass die Er-HS Mieten einerseits durch ihre gröbere Partikelstruktur und dadurch höheres Zwischenraumvolumen mehr von der Umgebungstemperatur beeinflusst wurden und andererseits die Wertebereiche von Trockenmasseabbau und Mietentemperatur in diesen Mieten deutlich enger waren. Bei engen Wertebereichen führen Messschwankungen, z. B. durch heterogenes Ausgangsmaterial, zu einer deutlich stärkeren Abschwächung der Korrelation als bei breiten Wertebereichen.

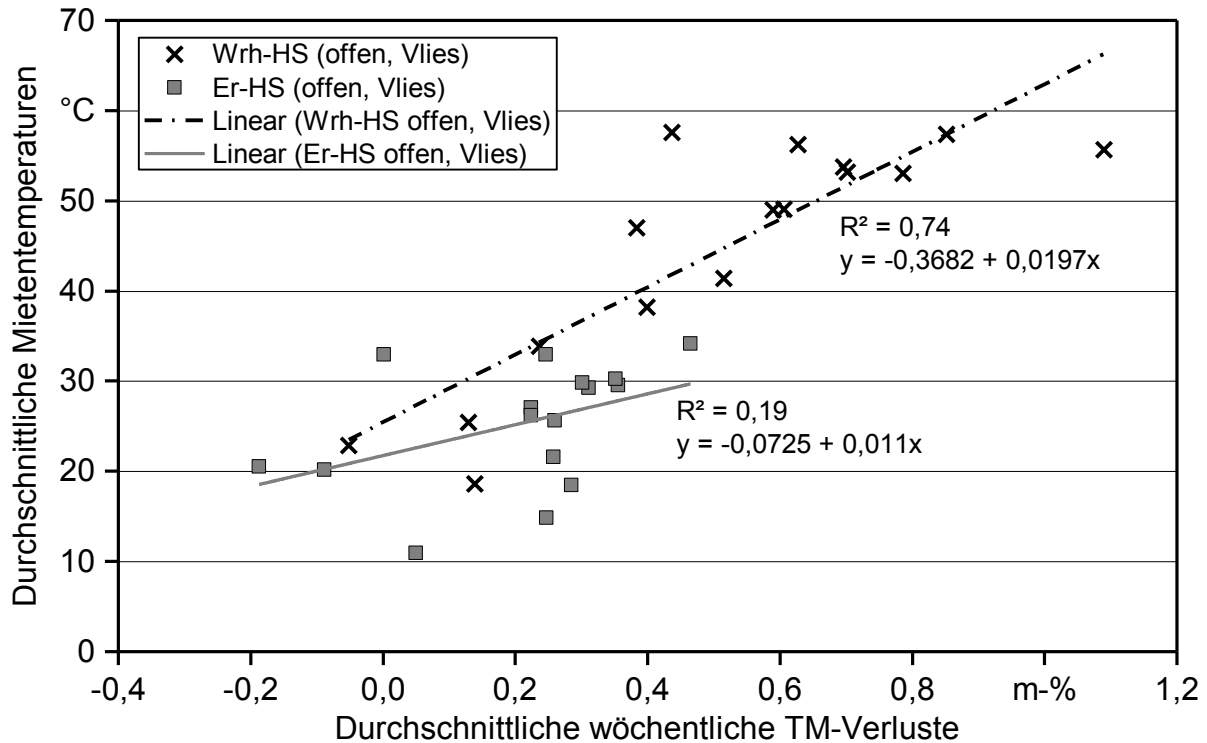


Abbildung 21: Lineare Regression (Energierundholzhackschnitzel, Er-HS:  $p = 0,09$ , Waldrestholzhackschnitzel, Wrh-HS:  $p < 0,001$ ) der Trockenmasseverluste und Mietentemperaturen während des Winter- und Sommerversuchs

Für die Trockenmasseverluste gelten ähnliche Gesetze wie für die Mietentemperatur. Ein hoher Grün- und Feinanteil bietet eine große Angriffsfläche sowie viele leicht verfügbare Nährstoffe für Mikroorganismen und schränkt gleichzeitig die Durchlüftung und damit den Wärmeabfluss ein. Dies kam insbesondere im Winter zum Tragen, als die Lufttemperatur bei den Er-HS ohne starke Eigenerwärmung nicht ausreichte, um optimale Temperaturbereiche für Mikroorganismen zu schaffen. Deshalb war der Trockenmasseverlust am Ende der Winterlagerung bei den Wrh-HS etwa doppelt so hoch (Faktor 2,1) wie bei den Er-HS (Abbildung 22).

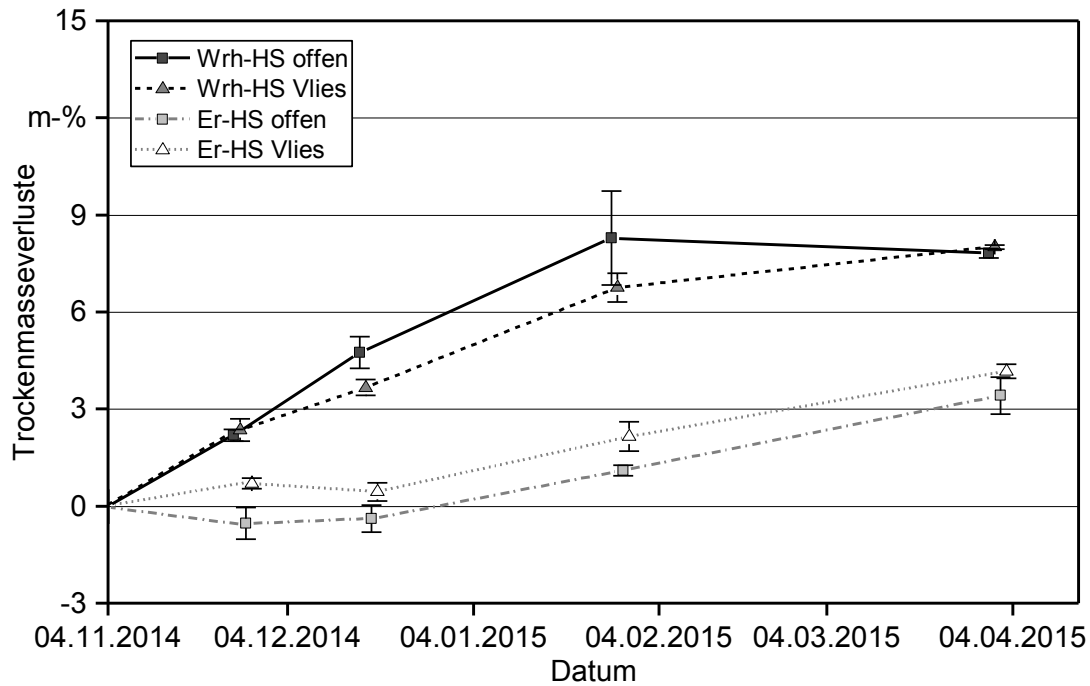


Abbildung 22: Mittlere Trockenmasseverluste während des Winterversuchs. Wrh-HS: Waldrestholzhackschnittel, Er-HS: Energierundholzhackschnittel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel).

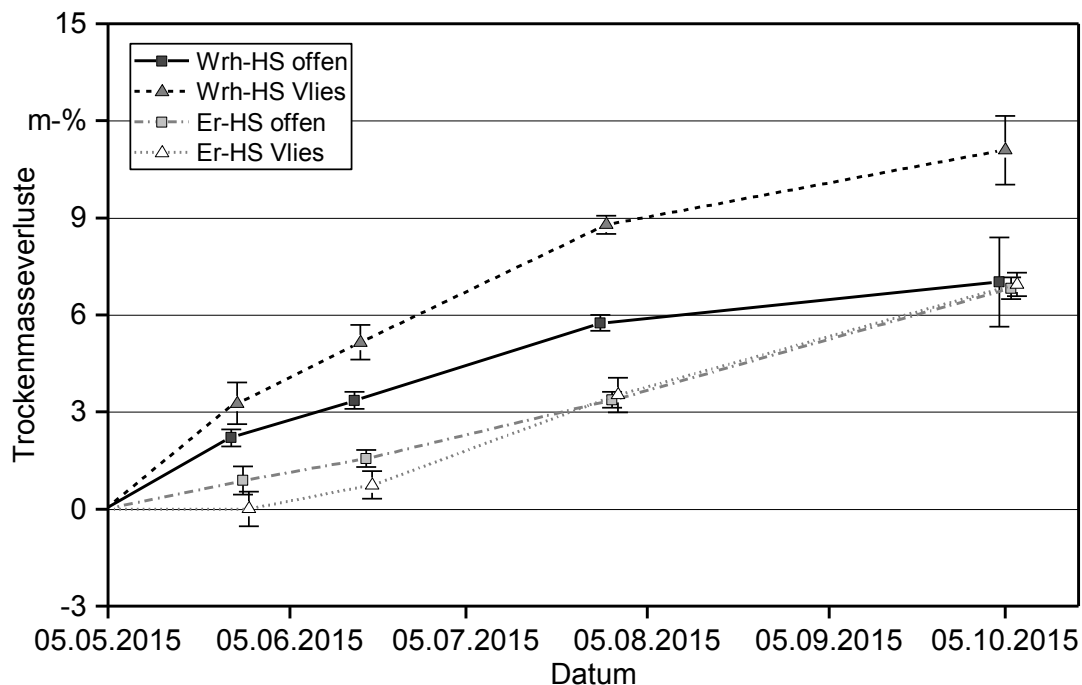


Abbildung 23: Mittlere Trockenmasseverluste während des Sommersversuchs. Wrh-HS: Waldrestholzhackschnittel, Er-HS: Energierundholzhackschnittel. Jeder Datenpunkt zeigt Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der 3 Mietenquerschnitte, jeder Querschnitt enthielt 12 Messwerte (Bilanzbeutel).



Die im Winter leicht höheren Trockenmasseverluste bei den abgedeckten Er-HS könnten durch einen Selbstverstärkungseffekt hervorgerufen worden sein, indem der Wärmestau zu etwas besseren Lebensbedingungen für Mikroorganismen geführt hat.

Im Sommer erreichten durch die hohe Lufttemperatur auch die Energierundholzhackschnitzel fast durchgehend Temperaturen von über 20 °C und somit einen Bereich, der für viele Pilzarten sehr gute Wachstumsbedingungen bedeutet (Abbildung 23). Das Resultat war ein mit den nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzeln vergleichbarer Trockenmasseverlust (-0,13 Prozentpunkte) am Ende des Sommersversuchs.

Das Vlies führte im Sommer bei den Wrh-HS zu einer höheren Durchschnittstemperatur und zu einem um 4,1 Prozentpunkte stärkeren Abbau als bei der nicht abgedeckten Vergleichsmiete. Bei den Er-HS kam es im Sommer trotz höherer Durchschnittstemperatur unter dem Vlies zu keiner erhöhten Zersetzung. Dies könnte daran liegen, dass hier zwar ein Wärmestau erfolgte, aber der sich selbst verstärkende Effekt ausblieb, da sich die vorhandenen Mikroorganismen in einem für sie ohnehin schon optimalen Temperaturbereich bewegten und deshalb nicht mit stärkerer Zersetzung reagierten.

Im Vergleich mit anderen Versuchen lagen die durchschnittlichen monatlichen Trockenmasseverluste mit 0,7–2,2 m-% eher im mittleren bis unteren Bereich (siehe Abschnitt 4.4.2: 0,4–5,5 m-%). Im Sommer wären jedoch bei ungünstigeren Wetterbedingungen, also bei niedrigeren Lufttemperaturen und/oder höheren Niederschlägen, höhere Abbauraten aufgrund geringerer Trocknung möglich gewesen.

### **7.2.6 Schichtbildung**

Sowohl während der Winter- als auch während der Sommerlagerung bildeten sich signifikant unterschiedliche Schichten in den Hackschnitzelmieten bezüglich des Wassergehalts (insgesamt in 23 von 32 Fällen) und des Trockenmasseverlusts aus (insgesamt in 21 von 32 Fällen) (Abbildung 24).

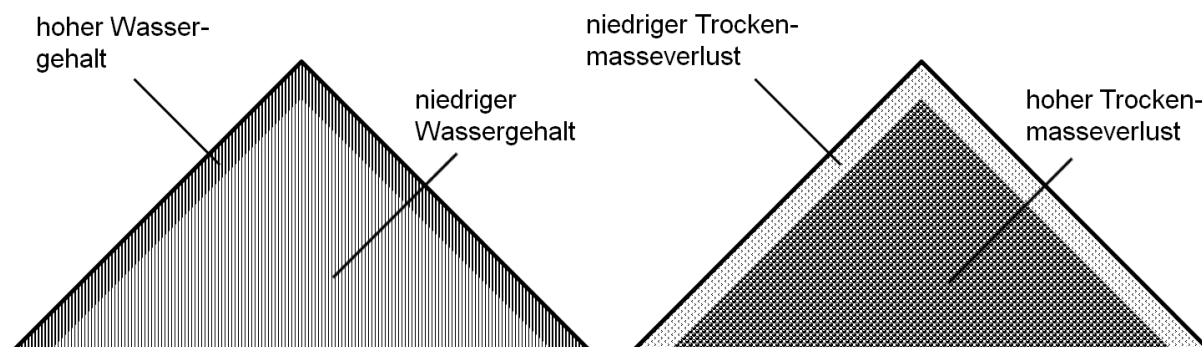


Abbildung 24: Bildung von signifikant ( $p \leq 0,05$ , Dunn's Test (WG, links) bzw. Scheffé-Test (TM-Verlust, rechts)) unterschiedlichen Schichten in den Hack-schnitzelmieten – am häufigsten eingetretene Fälle

In den meisten Fällen entstanden zwei Schichten. In zwei Mieten konnten jedoch während der Winterlagerung nach 21 Wochen Lagerdauer sogar drei Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht und Kernzone) hinsichtlich des Wassergehalts festgestellt werden. Ein Beispiel für die Schichtbildung zeigt Tabelle 13 (siehe auch Anhang B, Tabelle 40 bis Tabelle 54).

Tabelle 13: Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$  Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhack-schnitzelmiets während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	61,1 ( $\pm 3,9$ ) <sup>a</sup>	63,5 ( $\pm 3,3$ ) <sup>a</sup>	66,9 ( $\pm 1,1$ ) <sup>a</sup>	66,0 ( $\pm 1,9$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	43,2 ( $\pm 4,6$ ) <sup>b</sup>	38,0 ( $\pm 5,8$ ) <sup>b</sup>	48,0 ( $\pm 10,1$ ) <sup>b</sup>	55,4 ( $\pm 12,6$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	45,8 ( $\pm 3,5$ ) <sup>b</sup>	41,0 ( $\pm 6,6$ ) <sup>b</sup>	36,4 ( $\pm 10,0$ ) <sup>b</sup>	39,5 ( $\pm 11,9$ ) <sup>c</sup>

Beim Wassergehalt kam die feuchte Deckschicht durch Niederschlag (bei den offenen Mieten) und Kondensation zustande, was regelmäßig in Studien zur Hack-schnitzzellagerung beobachtet wird [77] [66] [14]. Der insgesamt höchste gemessene Wassergehalt betrug 71,5 m-% und fand sich ebenfalls in der Deckschicht (Mietenspitze). Dies bedeutete einen Anstieg des Wassergehalts um 14,9 Prozentpunkte im Vergleich zur Einlagerung. Während der Sommerlagerung trat die feuchte Deckschicht wegen der trockenwarmen Witterung wesentlich seltener auf als im Winter. Direkt unter dem Vlies trockneten die Hack-schnitzel im Sommer an den südexponierten Flanken sogar auf einen Wassergehalt von bis zu 7,4 m-%. Folglich ist der Wassergehalt in Lagermieten eher inhomogen. Da aber vor allem Kleinf Feuerungsanlagen einen homogenen Brennstoff und definierte Brennstoffqualitäten benötigen [42], sollte für diesen Einsatzbereich eine Homogenisierung der Hack-schnitzel in Betracht gezogen werden.

Die Trockenmasseverluste waren bei beiden Durchgängen meist in der Deckschicht am geringsten. Ursächlich hierfür könnte gewesen sein, dass im Winter dort – mit Ausnahme der Mietenspitze – die Temperaturen fast durchgehend unter 20 °C lagen (nach Zusatzmessungen, hier nicht dargestellt) und zudem im Sommer die Hackschnitzel meistens bereits nach sechs bis zwölf Wochen auf einen Wassergehalt von unter 30 m-% getrocknet waren, sodass sie schon relativ früh im Versuch Lagerstabilität erreicht haben könnten. HEINEK et al. [53] beobachteten drei Schichten mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen und folgerten daraus, dass dies zu abweichenden Trockenmasseverlusten in diesen Schichten führen könnte. Interessanterweise wurden in der vorliegenden Studie immer nur maximal zwei Schichten mit unterschiedlichen Trockenmasseverlusten festgestellt.

### 7.2.7 Aschegehalt

Nadeln, Rinde und kleine Äste beinhalten stoffwechselbedingt einen höheren Anteil an Makro- und Mikronährstoffen im Vergleich zu Holz und somit einen höheren Anteil an anorganischem Material [72] [37]. Folglich ist der Aschegehalt von Waldrestholz i. d. R. höher als der von Energierundholz. Typische Werte schwanken zwischen 1,5 und 4,0 m-% (wf) für Waldrestholz und zwischen 0,7 und 2,2 m-% (wf) für Energierundholz [49] [31] [61] [69] [72]. Aschegehalte von reinen Holzbrennstoffen liegen dabei selten über 1 m-%. Der Aschegehalt von reiner Fichtenrinde schwankt zwischen 2,5 und 5 m-% [49], Fichtennadeln liegen bei ca. 3 m-% [37]. Diese Tendenzen zeigen sich auch in den verwendeten Ausgangsmaterialien. Generell lag der Aschegehalt von Waldrestholz bei den Feldversuchen höher als der von Energierundholz (Abbildung 25, Abbildung 26).

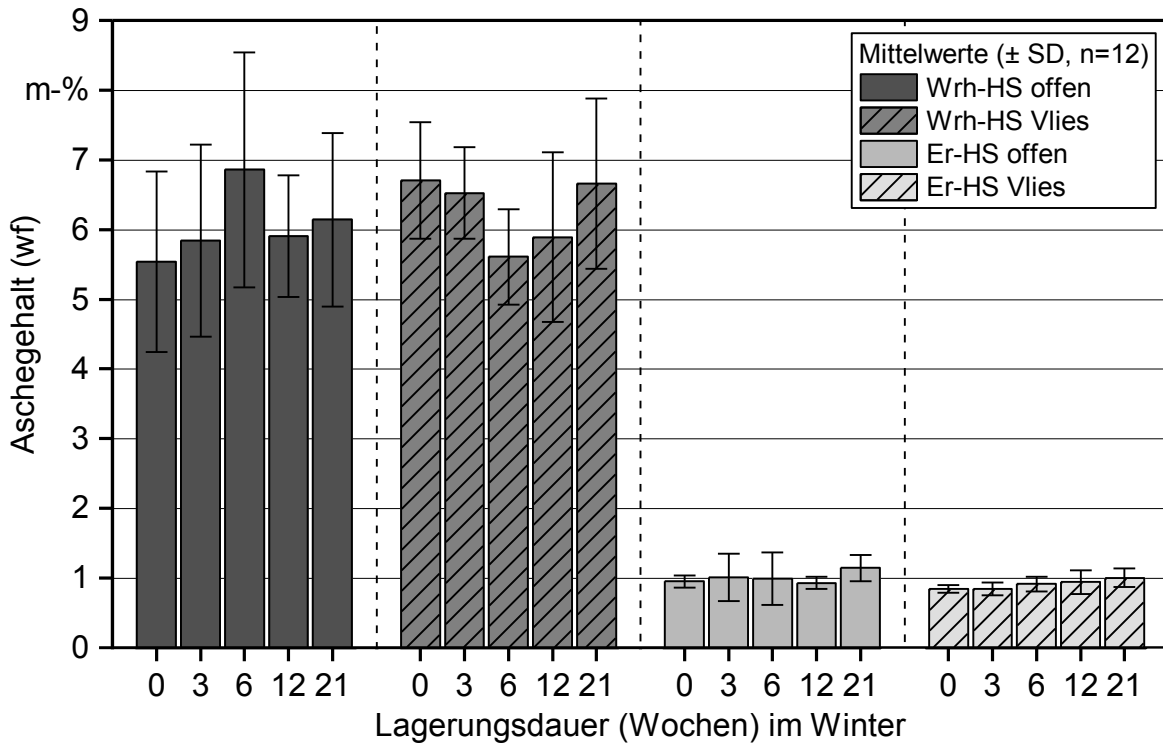


Abbildung 25: Mittlerer Aschegehalt (wf,  $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)

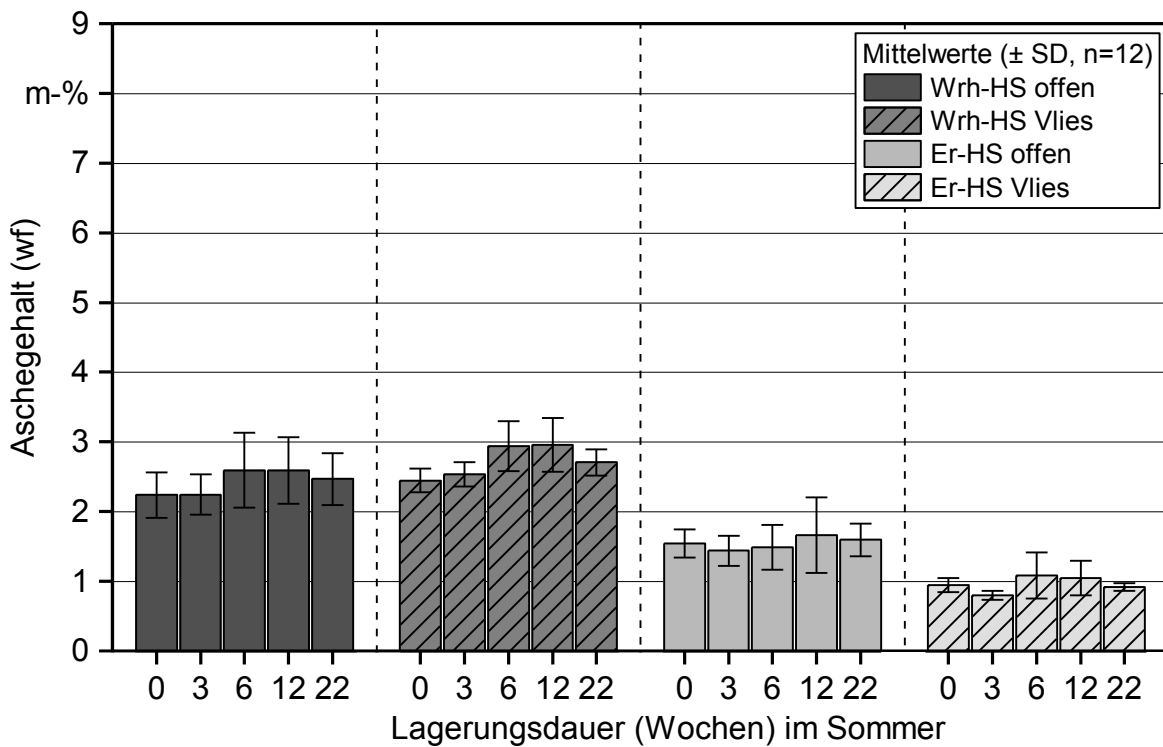


Abbildung 26: Mittlerer Aschegehalt (wf,  $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Sommerversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)

Im Winterversuch lag der Aschegehalt der Wrh-HS bei Einlagerung (d. h. nach 0 Wochen) ohne Abdeckung im Mittel sogar bei 5,5 m-% und bei der Miete mit Vlies bei 6,7 m-% (Abbildung 25). Die Werte überschritten den typischen Wertebereich für Waldrestholz und lassen vermuten, dass es bei der Hackschnitzelproduktion, z. B. bei der Holzernte, beim Rücken oder beim Hacken, zu einem Eintrag von Mineralboden in den Brennstoff gekommen war. Gleichzeitig streuten die gemessenen Aschegehalte der Waldrestholzhackschnitzel stark (min.: 3,8 m-%; max.: 7,8 m-%). Diese hohe Spannweite lässt auf sehr heterogene Brennstoffe, d. h. auf eine ungleiche Verteilung an Holz, Nadeln, kleinen Ästen, Rinde und Zapfen [15] [72], aber auch auf mögliche Verschmutzungen mit z. B. Mineralboden schließen. Laut DIETZ et al. [37] werden bei Waldhackschnitzeln Aschegehalte von über 3 m-% nicht mehr alleine durch die Biomasse erreicht, sondern lassen sich zumindest teilweise auf Verunreinigungen durch Bodenmaterial zurückführen.

Der Aschegehalt der Energierundholzhackschnitzel lag im Winter bei der Einlagerung durchschnittlich bei 0,8 m-% (offene Lagermiete) und 1,0 m-% (abgedeckte Lagerungsmiete). Diese Werte liegen im typischen Wertebereich von Energierundholz. Die Streuung der Werte ist deutlich geringer als bei den Waldrestholzhackschnitzeln und somit der Brennstoff insgesamt homogener.

Während der Winterlagerung zeigten alle Lagermieten eine steigende Tendenz im Aschegehalt. Allerdings wurden nur bei den beiden Mieten aus Energierundholzhackschnitzeln signifikant höhere Werte bei Auslagerung gemessen ( $p \leq 0,05$ ; t-Test), diese sind jedoch als geringfügig zu bewerten. Der Anstieg des Aschegehalts könnte durch biologische Abbauprozesse verursacht worden sein, wobei kohlenstoffhaltige Substanzen (z. B. Zellulose, Lignin) abgebaut werden, der anorganische Anteil jedoch im Brennstoff verbleibt. HEINEK et al. [53] verwenden in ihrer Studie den Aschegehalt sogar direkt als Indikator für den Verlust an organischem Material. Eine Berechnung der Trockenmasseverluste über den Aschegehalt ist jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden, da sich die Heterogenität von Hackschnitzeln hierbei besonders stark auf die Berechnung der Trockenmasse auswirkt [67] [53] [38]. Aufgrund der insgesamt nur geringen Veränderung des Aschegehalts, aber auch aufgrund der hohen Streuung der Werte konnte in der hier dargestellten Studie daher kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Veränderung des Aschegehalts und den gemessenen Trockenmasseverlusten festgestellt werden.

Im Sommer lag der wasserfreie Aschegehalt bei Einlagerung der Hackschnitzel im Mittel bei 2,2 m-% (offene Wrh-HS Miete, Abbildung 26), 2,4 m-% (abgedeckte Wrh-HS Miete), 1,5 m-% (offene Er-HS Miete) und 0,9 m-% (abgedeckte Er-HS Miete). Alle gemessenen Werte lagen somit in einem typischen Bereich für Waldrestholz und Energierundholz [61] [72] [49] [31] [69] [37]. Im Sommersversuch war der Aschegehalt der Waldrestholzhackschnitzel somit deutlich niedriger als im Winterversuch.

Auch während der Sommerlagerung waren die Veränderungen im Aschegehalt gering. Signifikante Unterschiede zwischen Einlagerung und Auslagerung konnten nur bei der abgedeckten Wrh-HS Miete festgestellt werden ( $p \leq 0,05$ ; t-Test nach Student). Diese

Miete hatte nach 23 Wochen nicht nur einen signifikant höheren Aschegehalt, sondern gleichzeitig auch die höchsten Trockenmasseverluste (siehe Abschnitt 7.2.3). Jedoch konnte auch in diesem Fall kein signifikanter Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Trockenmasseverlust festgestellt werden.

Insgesamt ist die Änderung des Aschegehalts während der Lagerung von Hackschnitzeln als minimal bzw. als nahezu vernachlässigbar anzusehen. Mögliche Änderungen werden zudem häufig von der hohen Streuung der Werte, z. B. durch ungleiche Verteilung unterschiedlicher Baumkomponenten (Nadeln, Rinde, Holz) und Verschmutzungen überdeckt.

### **7.2.8 Heizwert, Schüttdichte und Energiedichte**

Typische Werte für den Heizwert auf wasserfreier Bezugsbasis werden in der Literatur mit  $19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  für Waldrestholz aus Nadelholz [31] und mit  $18,8\text{--}18,9 \text{ MJ kg}^{-1}$  für Energierundholz [49] angegeben. Rinde und Nadeln von Koniferen besitzen aufgrund höherer Lignin- und Harzgehalte einen höheren Heizwert (Rinde ca.  $19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ , Nadeln ca.  $20,0 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) als z. B. reines Holz (ca.  $18,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) [49] [37]. Hohe Heizwerte werden daher hauptsächlich durch einen hohen Rinden- und Nadelanteil verursacht. Niedrige Heizwerte können allerdings auch durch einen hohen Anteil an anorganischen Sekundärverunreinigungen bzw. nicht brennbarem Material verursacht werden [37] [49]. In der hier dargestellten Untersuchung konnte ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Heizwert festgestellt werden (Abbildung 27). Ein hoher Anteil an nicht holzartiger Biomasse und Verschmutzungen mit z. B. Mineralboden haben hier vermutlich zu den höheren Aschegehalten ( $> 3 \text{ m-\%}$ ) geführt, wodurch gleichzeitig der Heizwert dieser Proben sank.

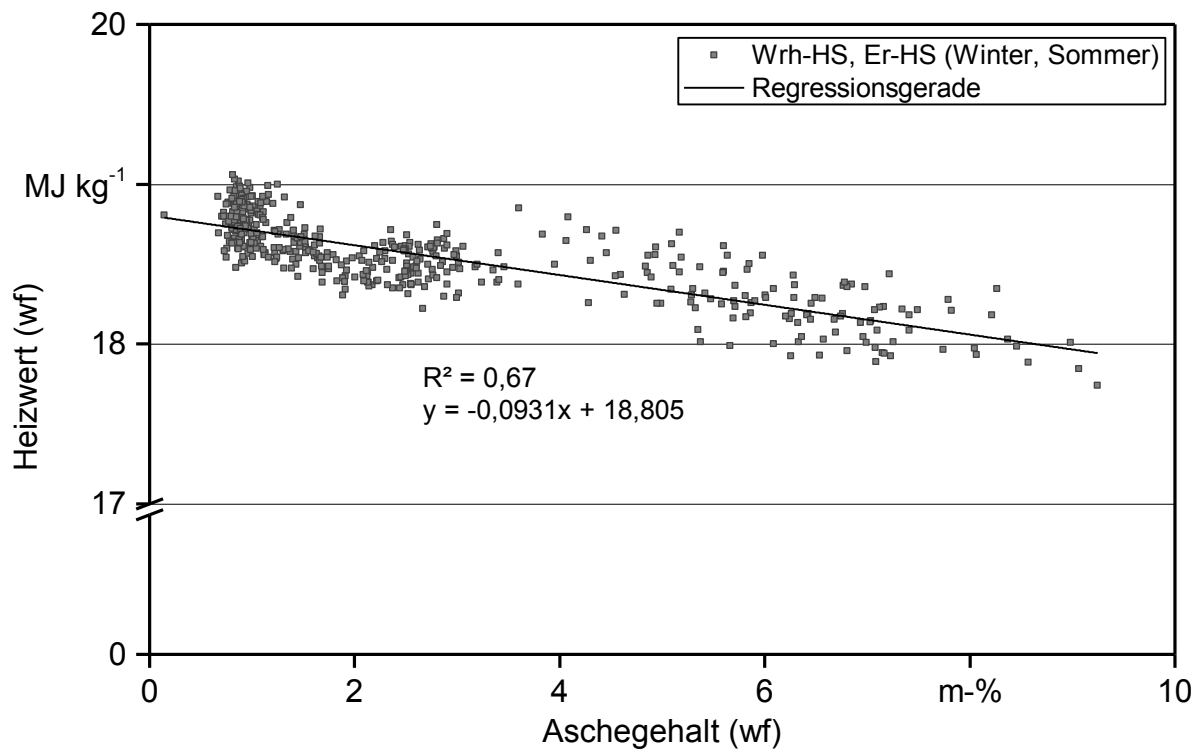


Abbildung 27: Lineare Regression (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel;  $p \leq 0,05$ ) der Aschegehalte und Heizwerte während des Winter- und Sommersversuchs

Bei der Einlagerung im Winter lagen die mittleren Heizwerte der Wrh-HS Mieten bei 18,5 und 18,3  $\text{MJ kg}^{-1}$ . Bei den Mieten aus Energierundholz hackschnitzeln lag der Heizwert im Mittel um ca. 3 % darüber, bei 18,9  $\text{MJ kg}^{-1}$  (Abbildung 28). Während der Winterlagerung wurde die größte Abnahme von 0,4  $\text{MJ kg}^{-1}$  bei den Wrh-HS ohne Abdeckung festgestellt. Diese Abnahme war signifikant bei beiden Wrh-HS Mieten und bei der abgedeckten Er-HS Miete (t-Test, Mann-Whitney U-Test). Gleichzeitig gab es zwischen den Werten einen signifikanten Zusammenhang mit den gemessenen Aschegehalten ( $p \leq 0,05$ , Abbildung 27). Die niedrigen Heizwerte der Wrh-HS wurden daher aufgrund der sehr hohen Aschegehalte, d. h. aufgrund eines höheren Anteils mineralischer, nicht-brennbarer Substanz verursacht. Im Gegensatz dazu konnten während der Winterlagerung keine signifikanten Veränderungen im Heizwert für die offene Er-HS Miete festgestellt werden. Die gemessenen Heizwerte korrelierten weder mit den Trockenmasseverlusten noch mit den Aschegehalten. Dies liegt vermutlich an den nur geringen Trockenmasseverlusten und den ebenfalls geringen Aschegehalt- bzw. Heizwertänderungen dieser Lagermiete.

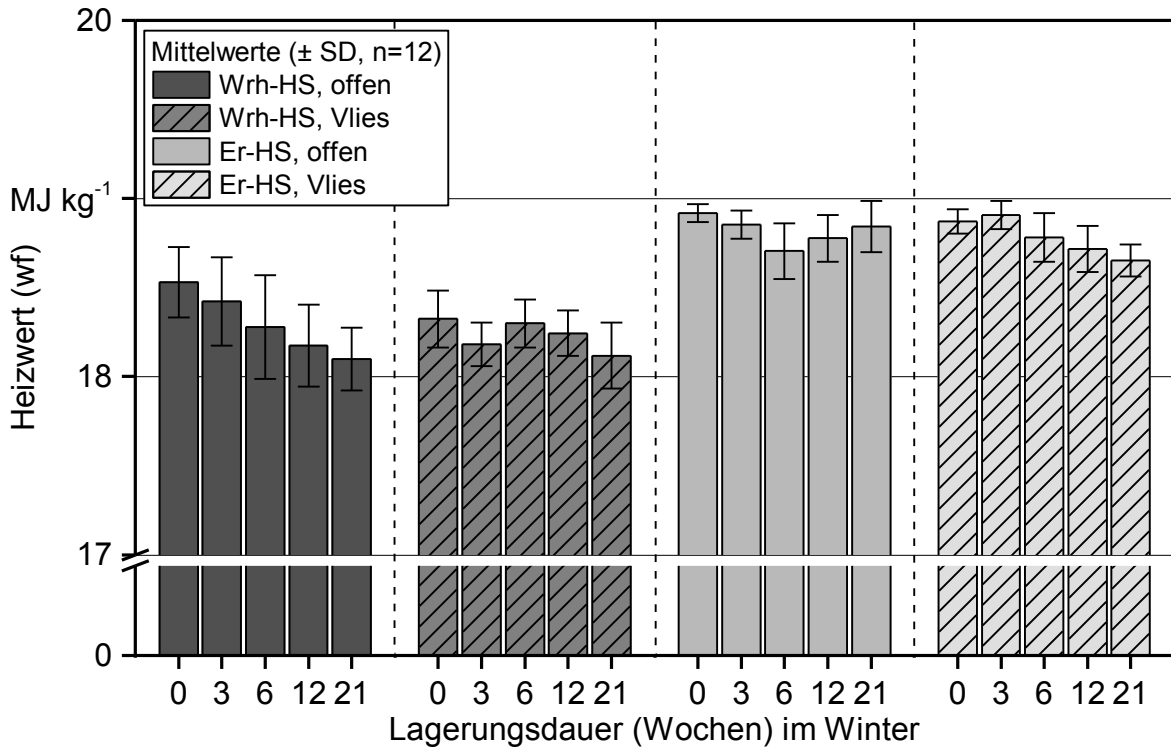


Abbildung 28: Mittlere Heizwerte (wf, ±Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)

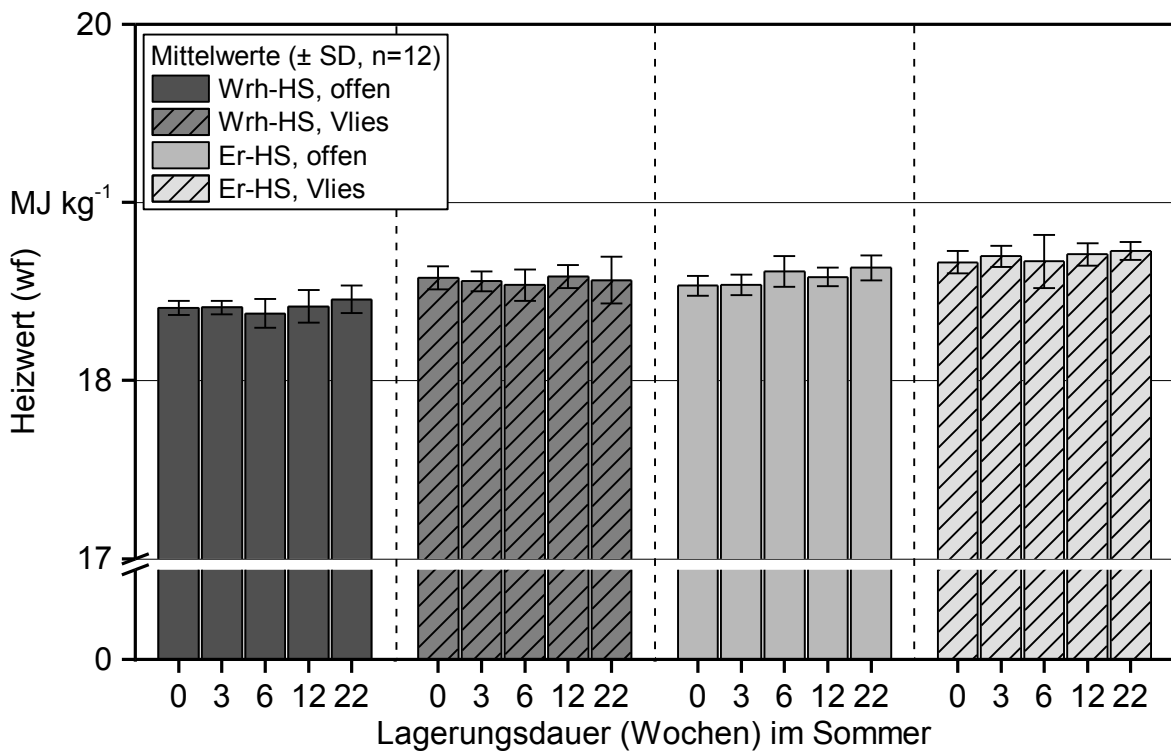


Abbildung 29: Mittlere Heizwerte (wf, ±Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten während des Sommersversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)



Während der Sommerlagerung waren die Veränderungen des Heizwerts auf wasserfreier Bezugsbasis minimal [72]. Lignin hat aufgrund eines höheren Kohlenstoffanteils z. B. einen deutlich höheren Heizwert als Zellulose [49] [68]. Somit kann es bei der Lagerung bei einem höheren Zelluloseabbau sogar zu einem Anstieg im Heizwert kommen. Dieser Effekt wurde während der Sommerlagerung beobachtet, wobei der Heizwert im Mittel um  $0,05 \text{ MJ kg}^{-1}$  anstieg. Der höchste Heizwert nach der Lagerung im Sommer wurde mit  $18,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  für die abgedeckte Er-HS Lagermiete festgestellt und der niedrigste mit  $18,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  für die offene Wrh-HS Miete (Abbildung 29).

Die Schüttdichte der Hackschnitzel lag bei Einlagerung zwischen  $272 \text{ kg m}^{-3}$  (offene Er-HS Miete im Sommer) und  $371 \text{ kg m}^{-3}$  (offene Wrh-HS Miete im Winter). Der Wassergehalt korrelierte dabei signifikant mit der gemessenen Schüttdichte ( $p \leq 0,05$ ; Pearson Korrelation). Während der Lagerung im Winter konnte aufgrund der geringen Trocknung nur bei den abgedeckten Wrh-HS eine deutliche Verringerung der Schüttdichte ( $-75 \text{ kg m}^{-3}$ ) festgestellt werden. Während des Sommers trockneten alle HS-Mieten, daher sank auch die Schüttdichte deutlich. Die Verringerung der Schüttdichte kann dabei wesentliche Vorteile beim Transport bewirken. KUPTZ et al. [61] beschreiben eine Verringerung des Transportgewichts von Waldhackschnitzeln in einem Container durch eine Trocknung von 50 auf 35 m-% um  $3,1^{\circ}\text{t}$ .

Aus dem Heizwert und der Schüttdichte im Anlieferungszustand errechnet sich die Energiedichte. Je höher die Energiedichte, desto höher ist die Energieausbeute pro Kubikmeter. Sie wird häufig zum Vergleich unterschiedlicher Brennstoffe herangezogen. Im Winter wurde bei allen Lagermieten, abgesehen von der Wrh-HS Miete mit Vliesabdeckung, ein Absinken der Energiedichte festgestellt (Tabelle 14). Während der Sommerlagerung hingegen konnte aufgrund der starken Trocknung ein Anstieg in der Energiedichte festgestellt werden. Die größte Zunahme (+11,2 %) wurde für die Er-HS Miete mit Vliesabdeckung berechnet.

*Tabelle 14: Heizwert, Schüttdichte, Energiedichte und Energieinhalt der Lagermieten nach fünf Monaten Lagerung (absolute Veränderung im Vergleich zur Einlagerung; ar: "as received", d. h. im Anlieferungszustand)*

Saison	Sortiment	Heizwert (ar), $\text{MJ kg}^{-1}$ ( $\Delta_{\text{abs}}$ )	Schüttdichte (ar), $\text{kg m}^{-3}$ ( $\Delta_{\text{abs}}$ )	Energiedichte, $\text{MJ m}^{-3}$ ( $\Delta_{\text{abs}}$ )	Energieinhalt, % ( $\Delta_{\text{abs}}$ )
Winter	Wrh-HS offen	7,3 (-0,8)	369 (-2)	2684 (-215)	88,7 (-11,3)
	Wrh-HS Vlies	10,5 (+2,4)	275 (-75)	2898 (+159)	97,1 (-2,9)
	Er-HS offen	8,5 (+1,3)	360 (15)	2285 (-77)	94,3 (-5,7)
	Er-HS Vlies	7,5 (-0,5)	329 (-8)	2472 (-80)	96,1 (-3,9)
Sommer	Wrh-HS offen	11,3 (+3,5)	235 (-88)	2664 (+112)	100,4 (+0,4)
	Wrh-HS Vlies	11,4 (+4,2)	230 (-129)	2611 (+231)	100,1 (+0,1)
	Er-HS offen	10,9 (+3,0)	230 (-42)	2517 (+209)	98,6 (-1,4)
	Er-HS Vlies	12,2 (+3,9)	212 (-100)	2582 (+261)	103,3 (+3,3)

### 7.2.9 Nutzbarer Energieinhalt

Die tatsächliche Energiemenge, die während der Lagerung und am Ende bei allen Mieten zur Verfügung stand, wird in Abbildung 30 und Abbildung 31 sowie in Tabelle 14 dargestellt. Sie errechnet sich aus dem tatsächlichen Heizwert ( $a_r$ ) und den Trockenmasseverlusten. Der Energieinhalt bei Einlagerung stellt dabei 100 % dar.

Der Heizwert im Anlieferungszustand ( $a_r$ ) wird primär vom Wassergehalt des Brennstoffes beeinflusst (siehe Abschnitt 4.2). Daher wird er, um den Einfluss einer Veränderung des Sortiments feststellen zu können, häufig auf wasserfreier Bezugsbasis ( $w_f$ ) dargestellt. Da die Veränderungen des Heizwertes auf wasserfreier Bezugsbasis jedoch gering waren (siehe Abschnitt 7.2.8), wurde der nutzbare Energieinhalt primär durch die Veränderung des Wassergehalts und durch die Trockenmasseverluste beeinflusst.

Während der Winterlagerung trat bei den Waldrestholz hackschnitzeln ohne Abdeckung der größte Verlust an nutzbarer Energie auf, da es zu hohen Trockenmasseverlusten, jedoch nicht zu einer Trocknung kam (Abbildung 30). Nach 21 Lagerwochen war bei dieser Miete der nutzbare Energieinhalt um 11,3 % gegenüber der Einlagerung gesunken. Bei der Wrh-HS Miete mit Vlies konnten die ebenfalls hohen Trockenmasseverluste durch die Trocknung größtenteils kompensiert werden, weshalb der nutzbare Energieinhalt kaum abnahm. Die Er-HS Mieten trockneten im Winter zwar nicht, dafür hatten sie aber auch deutlich geringere Trockenmasseverluste als die Wrh-HS Mieten. Daher trat bei den Er-Hackschnitzeln im Winter insgesamt nur ein geringer Verlust an nutzbarer Energie auf.

Während der Sommerlagerung zersetzten sich die Hackschnitzel in allen Mieten stark, trockneten aber gleichzeitig auch erheblich. Deshalb konnten die TM-Verluste größtenteils kompensiert werden und es kam sogar überwiegend zu einem leichten Anstieg des nutzbaren Energieinhalts (Abbildung 31). Die größte Zunahme mit 4,7 % wurde bei der mit Vlies abgedeckten Er-HS Miete nach 12 Lagerwochen erreicht.

Die Entwicklung des nutzbaren Energieinhalts kann, besonders im Sommersversuch, als positiv bewertet werden. Allerdings war die betrachtete Sommerperiode auch außergewöhnlich trocken; höhere Niederschläge und auch niedrigere Lufttemperaturen hätten zu einem weniger positiven Ergebnis geführt. Auch andere Studien [4] [66] [77] zeigen, dass ein Anstieg der nutzbaren Energie bei der Freilandlagerung selten der Fall ist. Die Energieverluste, die in den genannten Studien festgestellt worden waren, bewegen sich im selben Bereich oder sind sogar höher als während des Winterversuchs der vorliegenden Studie.

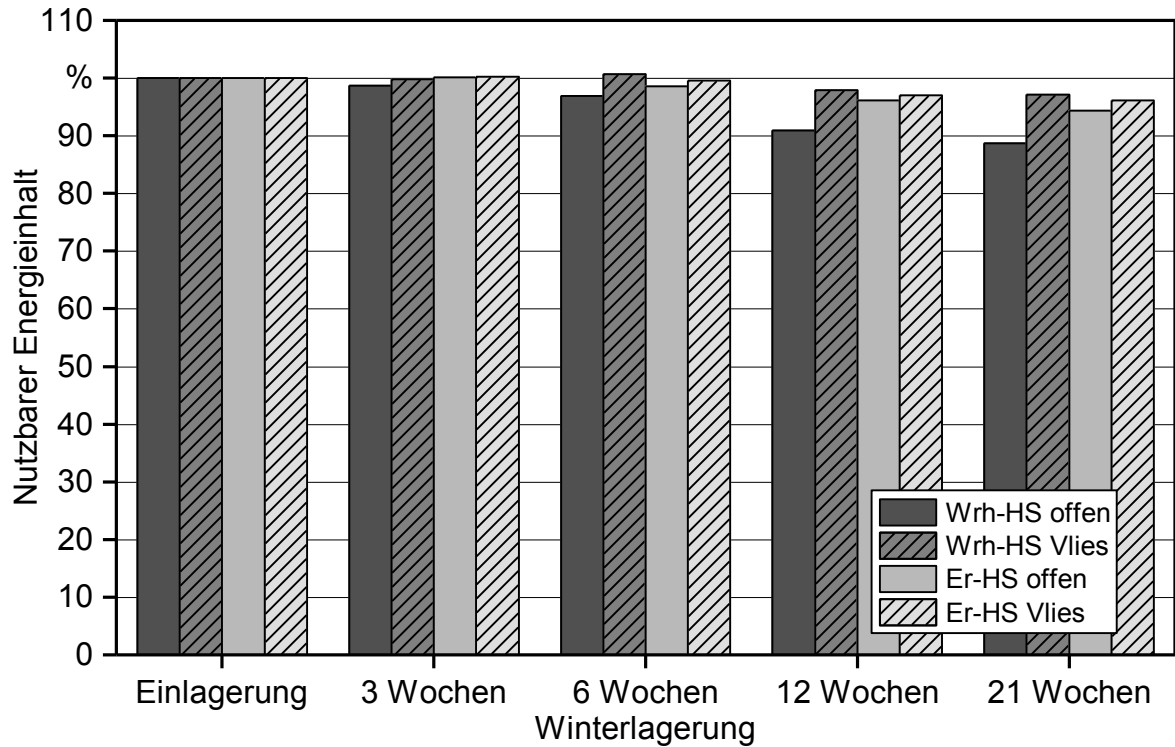


Abbildung 30: Veränderung des nutzbaren Energieinhalts (Einlagerung = 100 %) während des Winterversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)

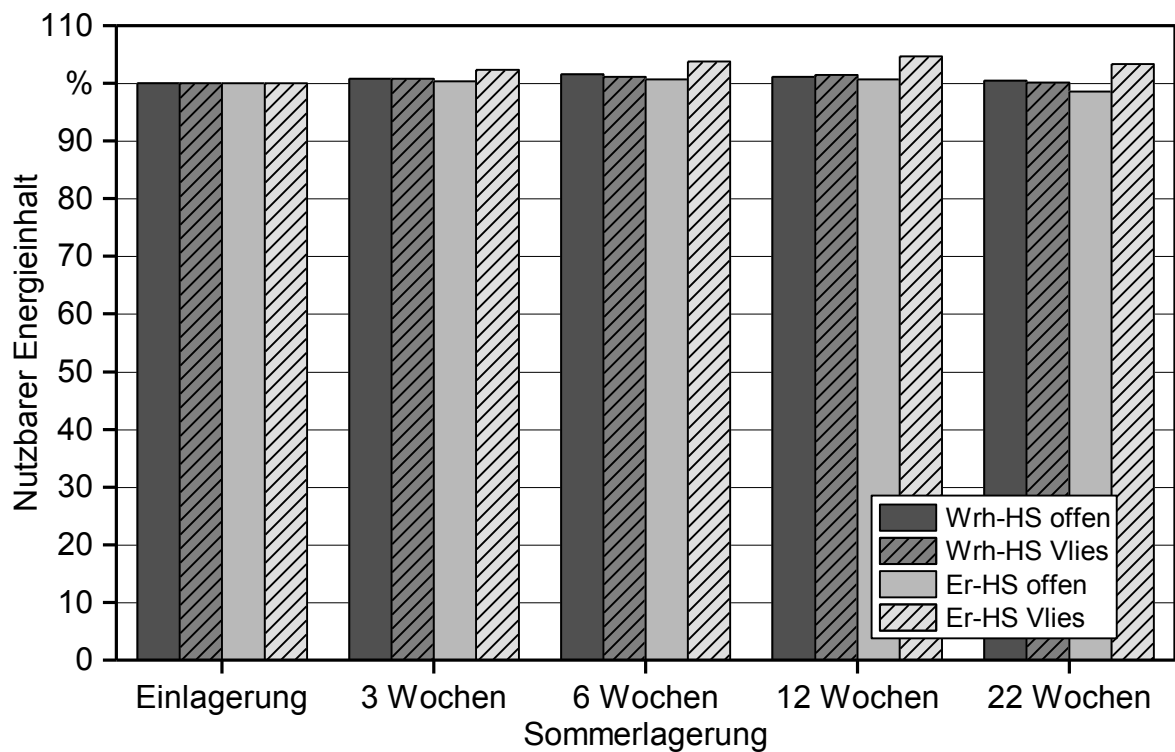


Abbildung 31: Veränderung des nutzbaren Energieinhalts (Einlagerung = 100 %) während der Sommersversuchs (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel)

### 7.2.10 Partikelgrößenverteilung und Partikelform

Die Partikelgröße von Holzhackschnitzeln hängt vom gewählten Herstellungsprozess und von der Rohstoffart ab [61]. Zu den herstellungsbedingten Einflüssen zählen unter anderem das Schneidaggregat des Hackers und dessen Drehzahl, die Messerschärfe, die Einzugsgeschwindigkeit und die Siebkorböffnung [41] [59]. Als rohstoffbedingte Einflüsse werden die Baumart und deren Standort, das verwendete Sortiment, der Trocknungszustand und mögliche Verschmutzung beschrieben [61] [59]. Bei den Freilandversuchen sind die herstellungsbedingten Einflüsse der jeweiligen Sortimente gering. Das Energierundholz und das Waldrestholz wurden im Sommer und im Winter jeweils mit denselben Hackereinstellungen und denselben Siebkorbeinsätzen hergestellt (Heizohack HM 14-800 KL, 40 mm × 40 mm Siebkorb bei Er-HS, 80 mm × 80 mm Siebkorb bei Wrh-HS; siehe Abschnitt 7.1.1).

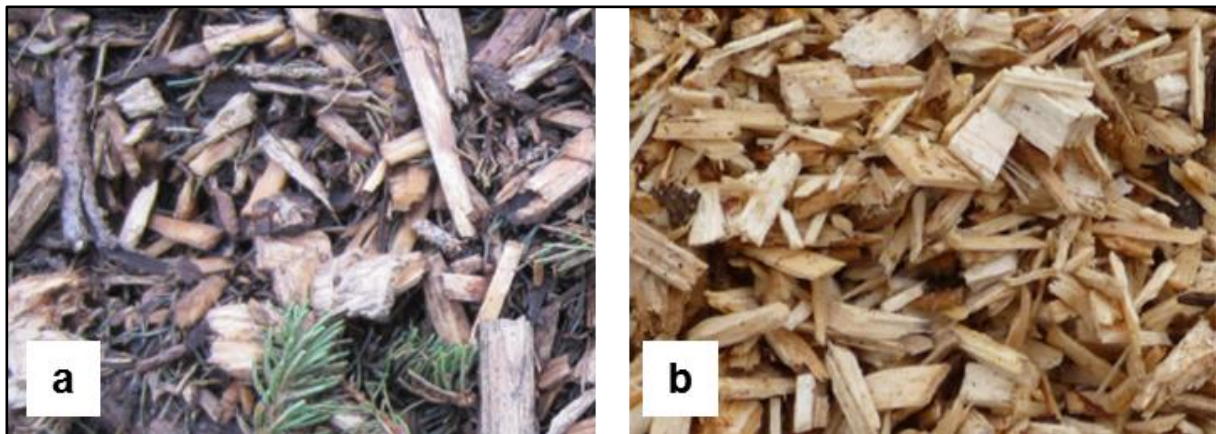


Abbildung 32: Waldrestholzhackschnitzel (a) und Energierundholzhackschnitzel (b)

Die rohstoffbedingten Einflüsse waren besonders beim Vergleich von Energierundholz mit Waldrestholz erkennbar. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Sortimenten liegt primär im höheren Anteil an Nadeln und kleinen Ästen von Wrh-HS im Vergleich zu den Er-HS (Abbildung 32). Diese Unterschiede wirkten sich vor allem beim Feinanteil aus (d. h. Partikel  $\leq 3,15$  mm Durchmesser), der bei den Wrh-HS bei 15–20 m-% und bei den Er-HS unter 12 m-% lag. Noch stärker war dieser Unterschied bei der Partikelfraktion  $\leq 8$  mm. Der Anteil der Partikel  $\leq 8$  mm betrug bei der Er-HS im Sommerversuch weniger als 20 m-%, wohingegen der Anteil an dieser Fraktion bei den Wrh-HS im Winterversuch schon knapp 50 m-% ausmachte. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung betrug bei den Hackschnitzeln aus dem Winterversuch 8,6 mm (Wrh-HS) und 11,1 mm (Er-HS). Im Sommerversuch war der Medianwert für beide Sortimente höher (Wrh-HS: 11,8 mm, Er-HS: 20,7 mm). Als mögliche Ursachen für diese Unterschiede können die Länge der Zwischenlagerung und eine unterschiedliche Messerschärfe ausgeschlossen werden. Auch eine Verschmutzung in den Arbeitsschritten ab der Lieferung an den Lagerplatz konnte ausgeschlossen werden (siehe Abschnitt 7.1.1). Verunreinigungen könnten aber während der Produktionsschritte vor der Lieferung z. B. beim Fällen und Rük-

cken möglich gewesen sein und witterungsbedingte Unterschiede aufgrund der verschiedenen Lagersaisons könnten einen Einfluss auf das Material gehabt haben (siehe Abschnitt 7.2.8).

Die Ergebnisse der Siebanalyse zeigten, dass die Hauptfraktion ( $> 60$  m-%) der Partikel eine Größe zwischen 3,15 mm und 31,5 mm vor und nach der Winter- und der Sommerlagerung aufwies (Abbildung 33, Abbildung 34). Daher konnten alle Hackschnitzelsortimente nach DIN EN ISO 17225-1 mindestens in die Klasse P31 eingeteilt werden. Aufgrund des hohen Anteils an Feinmaterial ( $\geq 15$  m-%), aber auch aufgrund einer großen maximalen Länge konnten die Wrh-HS nicht nach DIN EN ISO 17225-4 eingeteilt werden, weder bei Ein- noch bei Auslagerung. Kleinf Feuerungsanlagen haben generell Förderschnecken mit geringem Schneckendurchmesser und sind auf eine gleichförmige Ausformung des Glutbettes angewiesen. Deshalb sind diese Hackschnitzel weniger geeignet für die Verfeuerung im kleinen Leistungsbereich ( $< 100$  kW).

Die Energierundholzhackschnitzel hatten geringere Feingehalte (i. d. R.  $\leq 10$  m-%). Daher konnten alle Er-HS, mit Ausnahme der offenen Er-HS-Miete im Sommer, als P31S nach DIN EN ISO 17225-4 bei Auslagerung klassifiziert werden. In diesem Fall wurde eine Zunahme des Feingehalts auf 12,3 m-% festgestellt. Dieser Unterschied könnte aber auch auf die Messunsicherheit des Siebverfahrens zurückzuführen sein. Insgesamt ist die Partikelgrößenverteilung der Er-HS als deutlich geeigneter für die Nutzung in kleinen Biomassefeuerungen zu bewerten.

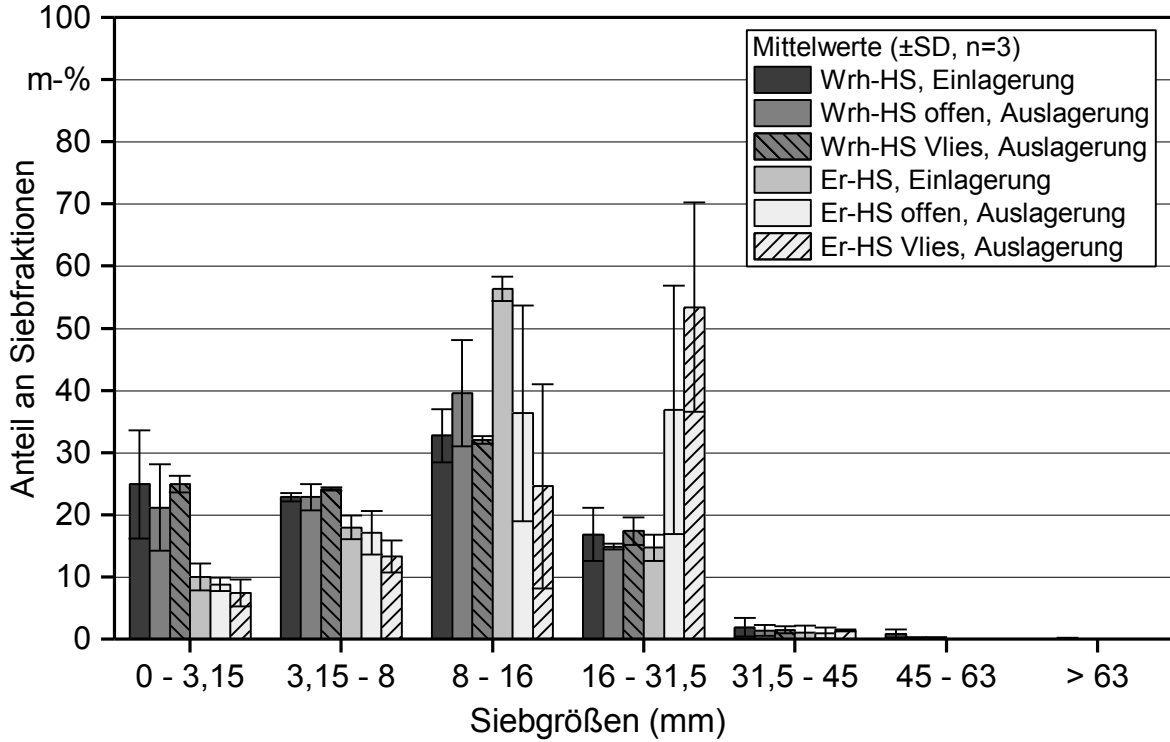


Abbildung 33: Veränderung des Anteils an den Siebfractionen im Winterversuch (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel, SD = Standardabweichung)

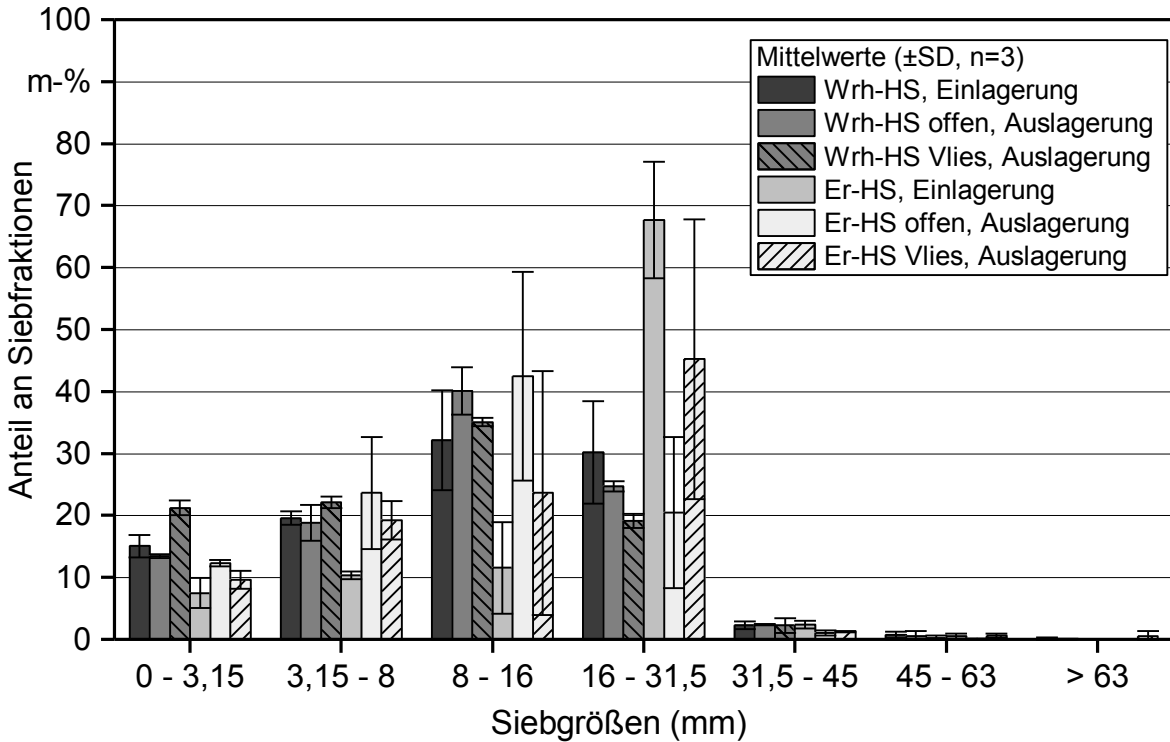


Abbildung 34: Veränderung des Anteils an den Siebfractionen im Sommerversuch (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel, SD = Standardabweichung)

Neben der Siebanalyse wurde eine Reihe unterschiedlicher Längen- und Formparameter über das Bildanalyseverfahren gemessen (siehe Abschnitt 7.1.3.3). Tabelle 15 zeigt den Kornformfaktor und die Rauigkeit der Hackschnitzel bei der Auslagerung und deren Veränderung im Vergleich zur Einlagerung ( $\Delta$ ).

*Tabelle 15: Formparameter Kornformfaktor (KFF) und Rauigkeit (RAU) der Hackschnitzel (Wrh-HS = Waldrestholz hackschnitzel, Er-HS = Energierundholz hackschnitzel) bei Auslagerung und ihre Veränderungen im Vergleich zur Einlagerung ( $\Delta$ )*

Saison	Sortiment	KFF Auslagerung ( $\Delta$ )	RAU Auslagerung ( $\Delta$ )
Winter	Wrh-HS offen	2,1 (+0,4)	0,6 (0,0)
	Wrh-HS Vlies	2,1 (+0,4)	0,6 (-0,1)
	Er-HS offen	1,8 (+0,3)	0,6 (-0,1)
	Er-HS Vlies	1,8 (+0,3)	0,6 (-0,1)
Sommer	Wrh-HS offen	2,2 (0,0)	0,6 (0,0)
	Wrh-HS Vlies	2,2 (-0,1)	0,6 (0,0)
	Er-HS offen	1,8 (-0,1)	0,6 (0,0)
	Er-HS Vlies	1,9 (-0,1)	0,6 (0,0)

Die Energierundholz hackschnitzel hatten mit einem Kornformfaktor von 1,5 bis 1,9 sowohl im Winter als auch im Sommer niedrigere Werte als Waldrestholz hackschnitzel (KFF: 1,7 bis 2,3). Die gleiche Tendenz zwischen Hackschnitzeln aus Waldrestholz und Energierundholz zeigte sich im Vorgängerprojekt „Optimale Bereitstellungsverfahren für Holz hackschnitzel“ [61]. Die Rundheit nimmt dabei sowohl durch ein hohes Längen-zu-Breitenverhältnis bei überlangen Partikeln als auch aufgrund einer zerfaserten Oberfläche ab. Bei ähnlichem Rohmaterial wurde z. B. in vorangegangenen Untersuchungen am TFZ für feines Hackgut ein KFF von 1,5, für grobes Hackgut ein KFF von 1,7 und für Schredderholz ein KFF von 3,3 gemessen [54]. Je niedriger der KFF, desto runder und homogener sind die Partikel und desto geringer sind die zu erwartenden Störungen in Fördersystemen oder die Neigung zu einer Brückenbildung im Lager [54] [61]. Daher sind die Energierundholz hackschnitzel in Bezug auf den KFF und damit auf das Fließverhalten der Brennstoffe als qualitativ hochwertiger einzustufen.

Im Sommer war hinsichtlich der Formparameter kaum eine Veränderung über die Lagerungsdauer festzustellen. Im Winter nahm der KFF allerdings bei allen Lagermieten zu. Folglich nahm die Rundheit der Hackschnitzel ab. Da die Rundheit der Partikel sowohl über das Verhältnis von Länge zu Breite als auch über die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst wird, wurde neben dem KFF die ebenfalls dimensionslose Rauigkeit (RAU) berechnet. Hierbei wird der KFF durch das Verhältnis von Länge zu Breite geteilt. Die Rauigkeit steigt somit vor allem dann an, wenn die Partikeloberfläche stärker zerfasert, wie es bei einer Zersetzung auftreten könnte. Der vermutete Anstieg in der Rauigkeit der

Hackschnitzel während der Lagerung konnte jedoch nicht bestätigt werden. Insgesamt waren die Veränderungen in der Rauigkeit während der Lagerung nur gering, weshalb sich trotz Zersetzung von Trockenmasse die Partikeloberfläche nicht nennenswert verändert hat (Tabelle 15).

### 7.2.11 Vergleich mit der Lagerung ungehackt in Poltern

Die Lagerung von ungehacktem Hackholz ohne Regenschutz in Poltern führte zu anderen Ergebnissen als die Lagerung von Hackschnitzeln in Mieten (Tabelle 16). Die Trocknung der ungehackten Waldrestholzpolter war im Winter ähnlich wie bei den offen gelagerten Wrh-HS, aber im Sommer geringer. Die Trockenmasseverluste waren in den Wrh-Poltern vergleichbar mit denen in den Wrh-HS-Mieten. Allerdings wurde ein großer Teil der Trockenmasseverluste bei der Polterlagerung nicht durch Zersetzungsprozesse verursacht, sondern durch das Abrieseln von Biomasse (Nadeln, Feinreisig, Rinde).

*Tabelle 16: Brennstoffqualität zum Zeitpunkt der Auslagerung und Qualitätsveränderungen ( $\Delta$ ) der ungehackten Polter (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, x = aufgrund von Messfehlern zu verwerfende Werte, Angabe erfolgt nur zur Vollständigkeit)*

Eigenschaft	Wrh Winter ( $\Delta$ )	Er Winter ( $\Delta$ )	Wrh Sommer ( $\Delta$ )	Er Sommer ( $\Delta$ )
Wassergehalt m-%	48,7 (-0,5)	47,2 (-5,5)	39,5 (-13,0)	24,2 (x)
Aschegehalt (wf) m-%	3,6 (-2,5)	0,6 (-0,3)	1,9 (-0,5)	0,6 (x)
Partikelgröße	P31	P31S	P31	P31S
Feingehalt, m-%	20 (-5)	10 (-2)	12 (-8)	10 (x)
TM-Verluste, Zersetzung, m-%	2,5	0,1	6,6	-
TM-Verluste, Abrieseln, m-%	4,6	0,2	5,2	-
Gesamtverluste m-%	7,1	0,3	11,8	-
Heizwert (wf) MJ kg <sup>-1</sup>	18,4 (0,0)	18,8 (-0,1)	18,5 (0,0)	18,8 (x)
Energieinhalt %	93	103	94	-

Die hohen Aschegehalte beim Waldrestholz im Winter weisen auf eine Verschmutzung des Hackholzes durch Mineralboden innerhalb der Bereitstellungskette hin (Tabelle 7 in Abschnitt 7.2.1). Der starke Rückgang des Aschegehalts beim Wrh-Polter im Winter



könnte somit neben einem Verlust an Nadeln und Rinde zumindest in gewissem Maße auch von einer Abwaschung des Mineralbodens durch Regen kommen.

Während des Winters lag der Verlust an nutzbarer Energie beim Wrh-Polter zwischen dem der offenen und der abgedeckten Wrh-HS-Miete. Im Sommer war der Verlust an nutzbarer Energie beim Wrh-Polter höher (6,1 %) als bei den Wrh-HS-Mieten, da der Polter weniger trocknete. In einer schwedischen Studie wird von einer Zunahme des nutzbaren Energieinhalts um 4 % nach neunmonatiger Lagerung eines vergleichbar großen Polters berichtet und bei einem wesentlich größeren Polter von einer Abnahme um 3 % nach sechs Monaten [77]. Im Vergleich dazu ist der in der vorliegenden Studie beim Wrh-Polter gemessene Verlust an nutzbarer Energie eher hoch. Auf der anderen Seite waren die Trockenmasseverluste und Wassergehaltsänderungen während des Winters im Wrh-Polter vergleichbar mit denen, die in einer finnischen Studie bei einem offen gelagerten Wrh-Polter beobachtet wurden [73].

Ähnlich wie die abgedeckte Er-HS-Miete trocknete der Er-Polter während des Winters nur gering, erreichte aber immerhin etwas niedrigere Wassergehalte als die offene Er-HS-Miete. Gleichzeitig lagen die Trockenmasseverluste um 3,1 bzw. 3,9 Prozentpunkte unter denen in den Mieten. Da das Energierundholz kaum Feinreisig und Nadeln besaß, kam es auch nur zu sehr geringen Verlusten durch Abrieseln von Biomasse. Dadurch erhöhte sich während des Winters im Er-Polter der nutzbare Energieinhalt um 2,6 % und entwickelte sich somit positiv im Vergleich zu beiden Er-HS-Mieten. Bei einem vergleichbaren, 14-monatigen Lagerungsversuch mit ungehacktem Energierundholz aus Kiefer trat im Winter auch nur eine sehr geringe Trocknung auf, während im Sommer eine monatliche Trocknungsrate von 1,9–4,5 m-% gemessen wurde. Die Trockenmasseverluste lagen mit 0,35 m-% pro Monat deutlich höher als in der vorliegenden Studie [39]. Allerdings ist zu beachten, dass Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Studien viele Ursachen, z. B. Ausgestaltung des Lagerplatzes, Klimabedingungen oder Stammdurchmesser des gelagerten Holzes, haben können.

Die Ergebnisse der Sommerlagerung des ungehackten Energierundholzes wurden verworfen, da sie nicht plausibel waren. Die gemessene Trockenmassezunahme um 15,6 m-% kann nur auf eine Abweichung zwischen dem tatsächlichen Wassergehalt des Er-Polters bei Einlagerung und dem Einlagerungswassergehalt der Er-HS-Mieten, welche als Referenz dienten, zurückgeführt werden.

Der Aschegehalt verringerte sich sowohl während der Winter- als auch während der Sommerlagerung bei den Wrh-Poltern signifikant, hauptsächlich durch das Abrieseln von Feinreisig und Nadeln mit hohen spezifischen Aschegehalten (Tabelle 16). Dies führte v. a. im Winter zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung im Vergleich zur Hackschnitzzellagerung (siehe Abschnitt 7.2.7). Auch beim Er-Polter verringerte sich der Aschegehalt im Winter signifikant, während er gleichzeitig in den Er-HS-Mieten signifikant anstieg. Allerdings waren bei diesem Sortiment die Änderungen im Aschegehalt sowohl bei der Hackschnitzzellagerung als auch bei der ungehackten Lagerung trotz Signifikanz sehr gering und somit in Bezug auf die Brennstoffqualität vernachlässigbar.

Bei einem skandinavischen Versuch wurde eine Verringerung des Aschegehalts um 0,4 Prozentpunkte während sechsmonatiger Lagerung von ungehacktem Wrh gemessen, was vergleichbar mit dem Sommersversuch der vorliegenden Studie ist [65].

Somit war die Polterlagerung hinsichtlich einer Reduktion des Aschegehalts bei beiden Sortimenten günstiger als die Hackschnitzellagerung. Gleichzeitig verringerte sich der Feinanteil, was bei den HS-Mieten nicht der Fall war (siehe Abschnitt 7.2.10). Bezüglich der anderen Qualitätsparameter (v. a. Wassergehalt) führte jedoch nur die Lagerung von ungehacktem Energierundholz zu besseren Ergebnissen als die Hackschnitzellagerung. Der Einfluss eines Regenschutzes auf die Polter unter mitteleuropäischen Klimabedingungen wäre eine weitere, interessante Fragestellung. Ein Modell zur Wassergehaltsänderung von Rundholzpoltern, das von ERBER et al. entwickelt wurde, sagt eine deutlich erhöhte Trocknung mit Regenschutz voraus [39].

In der vorliegenden Untersuchung betrug die Lagerdauer fünf Monate. Bei längerer Lagerdauer könnte die ungehackte Lagerung geeigneter als die Hackschnitzellagerung sein, da Trockenmasseverluste bei der Polterlagerung, insbesondere beim Waldrestholz, zu einem großen Teil durch abrieselnde Nadeln und anderes Feinmaterial verursacht werden. Das Verhältnis von Trocknung zu Trockenmasseverlust könnte dadurch mit längerer Lagerdauer weiter ansteigen. Folglich, auch wegen der genannten Verbesserungen im Aschegehalt, könnte diese Lagerungsmethode insbesondere für Betreiber von Kleinf Feuerungsanlagen, die Hackschnitzel für den Eigenverbrauch produzieren, zweckmäßig sein. Allerdings wurden solch lange Lagerungszeiten nicht untersucht. Es besteht grundsätzlich die Gefahr der Wiederbefeuchtung durch Niederschlag. Gerade bei dicht gepackten Waldrestholzpoltern mit hohem Grünanteil ist zudem ungewiss, wie die Abbauprozesse weiterlaufen würden.

## **7.3 Zusammenfassung**

### **7.3.1 Trockenmasseverluste, Energieänderungen und Schichtbildung**

Die Untersuchungen in dieser Studie haben gezeigt, dass bei Waldhackschnitzeln, welche unter bayerischen Praxisbedingungen gelagert werden, die Änderung des Wassergehalts und der Trockenmasseverlust signifikant von der Lagerdauer, der Jahreszeit, dem Sortiment und dem Regenschutz (Vlies) abhängen. Die Entwicklung des nutzbaren Energieinhalts wird hauptsächlich von den Wassergehaltsänderungen und den Trockenmasseverlusten beeinflusst. Während des Winters kommt es nur zu geringen Energieverlusten, mit Ausnahme der offen gelagerten Waldrestholzhackschnitzel. Diese hatten einen hohen Trockenmasseverlust, trockneten aber nicht. In einem trocken-warmen Sommer ist sogar eine leichte Zunahme des nutzbaren Energieinhalts möglich. Die Mientemperatur ist bei den Waldrestholzhackschnitzeln ein guter Indikator für die Zersetzungsrate, bei den Energierundholzhackschnitzeln eher nicht. Während der Lagerung kommt es häufig zu einer Schichtbildung innerhalb der Mieten. Signifikant unterschiedliche Schichten bildeten sich sowohl hinsichtlich des Wassergehalts als auch hinsichtlich

der Trockenmasseverluste. Die Polterlagerung von ungehacktem Holz ist bezüglich des nutzbaren Energieinhalts hauptsächlich bei Energierundholz vorteilhaft.

### 7.3.2 Qualitätsveränderungen

Der Wassergehalt ist der wichtigste Qualitätsparameter von Holzhackschnitzeln zur energetischen Verwendung. Im Sommersversuch führte eine starke Trocknung somit zu einer deutlichen Verbesserung der Hackschnitzelqualität in allen Mieten, wohingegen sich im Winterversuch kein nennenswerter Trocknungseffekt gezeigt hat, mit Ausnahme der abgedeckt gelagerten Waldrestholzhackschnitzel. Die Veränderungen weiterer Qualitätsparameter waren während des Winter- und Sommersversuchs nur gering. Bei der Lagerung in Poltern wurde jedoch neben der Trocknung eine weitere deutliche Qualitätsverbesserung der Brennstoffe festgestellt. Durch das Abrieseln von Nadeln, kleinen Rindenstücken und evtl. auch durch das Abwaschen von Verschmutzungen durch Niederschlagswasser konnte besonders beim Waldrestholz im Winter und Sommer sowohl der Aschegehalt als auch der Anteil an Feinmaterial während der Lagerung deutlich verringert werden.

Tabelle 17: *Klassifizierung der Sortimente nach DIN EN ISO 17225–4 bei Ein- und Auslagerung (n. k. = nicht klassifizierbar)*

Saison	Sortiment	Lagerungstechnik	Einlagerung	Auslagerung
Winter	Waldrestholz	gehackt, offen	n. k.	n. k.
		gehackt, Vlies	n. k.	n. k.
		ungehackt	n. k.	n. k.
	Energierundholz	gehackt, offen	n. k.	B1, P31S
		gehackt, Vlies	n. k.	B1, P31S
		ungehackt	n. k.	B1, P31S
Sommer	Waldrestholz	gehackt, offen	n. k.	n. k.
		gehackt, Vlies	n. k.	n. k.
		ungehackt	n. k.	n. k.
	Energierundholz	gehackt, offen	B1, P31S	n. k.
		gehackt, Vlies	B1, P31S	A2, P31S
		ungehackt	B1, P31S	A2, P31S

Eine Verbesserung bei der Qualitätseinstufung nach den Spezifikationen der DIN EN ISO 17225-4 konnte bei keiner der Wrh-HS-Mieten und Wrh-Polter festgestellt werden (siehe Tabelle 17). Grund hierfür waren primär der hohe Feinanteil und die maximale Partikellänge, im Winterversuch aber auch der hohe Aschegehalt. Die Hackschnitzel konnten somit weder vor noch nach der Lagerung den Spezifikationen A1 bis

B2 zugeordnet werden und sind für den Einsatz in kleinen Biomassefeuerungen nur eingeschränkt zu empfehlen.

Bei den Energierundholzhackschnitzeln wurde im Sommersversuch eine starke Trocknung festgestellt. Nach der Lagerung waren die Hackschnitzel somit bezüglich des Wassergehalts und mit einer Ausnahme auch bezüglich der Partikelgrößenverteilung für kleine Biomassekessel, die mit einem Wassergehalt  $< 35$  m-% zurechtkommen, geeignet. Deutlich geringere Wassergehalte (z. B.  $< 10$  m-% oder  $< 25$  m-%, Spezifikation A1 nach DIN EN ISO 17225-4) waren durch natürliche Trocknung in Lagermieten nicht zu erreichen. Hierfür wären technische Trocknungsverfahren, z. B. die Nutzung von Biogasabwärme in Satz-, Trommel- oder Bandtrocknern, notwendig [44].

Beim Waldrestholz könnte mit einer maschinellen Siebung eine Verringerung des Aschegehalts und Feingehalts erzielt und somit eine bessere Qualität nach DIN EN ISO 17225-4 erreicht werden. Im Gegensatz hierzu hatte das hier verwendete Energierundholz hinsichtlich Aschegehalt und Partikelgrößenverteilung in der Regel schon eine sehr hohe Qualität, weshalb hier nur ein geringer Effekt durch eine Siebung der Hackschnitzel erwartet wird und nur die Trocknung für eine Qualitätsveränderung maßgeblich ausschlaggebend sein sollte.

### 7.3.3 Methodendiskussion

Bei den Ergebnissen wird vorausgesetzt, dass die Bilanzbeutelergebnisse repräsentativ für die Hackschnitzel der gesamten Miete sind. An keinem der Probenahmetermine konnten zwischen den drei Messwiederholungen innerhalb jeder Miete signifikante Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) festgestellt werden, weder beim Wassergehalt (Kruskal-Wallis-Test) noch bei den Trockenmasseverlusten (ANOVA). Das heißt, dass die Unterschiede in den Prozessen entlang ein und derselben Miete nur gering waren. Die Beutel innerhalb eines Mietenquerschnitts wurden möglichst gleichmäßig und nach den Erfahrungen, die während der umfangreichen Methodenentwicklungsphase (siehe Kapitel 6) gesammelt wurden, angeordnet. Rein rechnerisch repräsentieren sie den Querschnitt sehr gut, was auch beim Abbau der Mieten in einem Versuch bestätigt wurde (siehe Abbildung 50 im Anhang).

Die Messung der Qualitätsparameter und des Trockenmasseverlusts über die Bilanzbeutel kann, auch aufgrund von ausführlichen Zusatzversuchen (siehe Abschnitt 7.1.2), insgesamt als sehr genau bewertet werden. Dennoch kam es bei den Er-HS zu Beginn des Winterversuchs zu einer unrealistischen, durchschnittlichen Trockenmassezunahme um 0,5 m-%. Diese war wahrscheinlich in der Messunsicherheit des Einlagerungswassergehalts begründet, welcher besonders dann große relative Auswirkungen hat, wenn kaum Trockenmasseverluste auftreten. Die Schwankungen sind jedoch im Vergleich zu vielen anderen Studien sehr gering.

Es muss erwähnt werden, dass die Beprobung von ungehacktem Holz methodenbedingt mit höheren Unsicherheiten behaftet ist als Messungen in Hackschnitzelmieten. Deshalb sollten die Ergebnisse der Polterlagerung vorsichtiger interpretiert werden.

### 7.3.4 Schlussfolgerungen und abschließende Bewertung

Die Abdeckung von Hackschnitzeln aus Waldrestholz mit einem diffusionsoffenen Vlies im Winter und von Energierundholzhackschnitzeln im Sommer kann die Menge an nutzbarer Energie erhalten oder sogar steigern. Im Gegensatz dazu ist nach den Ergebnissen dieser Fallstudien das Abdecken von Hackschnitzeln aus Energierundholz während des Winters überflüssig, da aufgrund der geringen Eigenerwärmung kaum ein Trocknungseffekt eintritt. Wassergehaltsbereiche, die ausreichend für die Brennstoffanforderungen von vielen Kleinf Feuerungsanlagen sind (30 m-%), können während eines trockenwarmen Sommers erreicht werden. Im Winter ist dies nur bei abgedeckt gelagerten Waldrestholzhackschnitzeln möglich. Weitere für diesen Einsatzzweck relevante Qualitätsparameter, z. B. der Feinanteil, werden jedoch bei der Mietenlagerung nicht merklich verbessert. Der Wassergehalt entwickelt sich während der Lagerung innerhalb der Mieten oftmals sehr unterschiedlich, weshalb vor der Verbrennung das mehrfache Umladen bzw. ein direktes Mischen der Hackschnitzelmieten mit einem Radlader eine Möglichkeit darstellen könnte, um einen ausreichend homogenen Brennstoff zu erhalten.

Die Lagerung von ungehacktem Energierundholz sollte der Hackschnitzellagerung hinsichtlich Trocknung, Trockenmasseverlusten und Energieinhalt vorgezogen werden. Besonders bei Waldrestholz kann die ungehackte Lagerung die Brennstoffqualität bezüglich Asche- und Feinanteil verbessern.

Tabelle 19 zeigt eine zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse aus den Freilandversuchen. Hier werden die Veränderungen während einer 5-monatigen Lagerung hinsichtlich Trockenmasse, Wassergehalt und dem daraus resultierenden nutzbaren Energieinhalt relativ zueinander bewertet. Ebenfalls finden sich Anmerkungen zu Änderungen weiterer Qualitätsparameter und ggf. Bemerkungen zur Umsetzung der Lagervarianten. Für die Einstufung der Änderungen wurden die in Tabelle 18 aufgeführten Wertebereiche verwendet.

*Tabelle 18: Bewertung der in den Freilandversuchen für die Parameter Trockenmasse, Wassergehalt und nutzbarer Energieinhalt ermittelten Änderungen*

Parameter	Stufen			
<b>Trockenmasse</b>	Bis 3 m-%	3,1–6 m-%	6,1–9 m-%	> 9 m-%
<i>Bewertung</i>	Geringe Abnahme	Mäßige Abnahme	Starke Abnahme	Sehr starke Abnahme
<b>Wassergehalt</b>	Trocknung > 15 m-%	Trocknung 10–14,9 m-%	Trocknung 5–9,9 m-%	Zunahme oder Trocknung < 5 m-%
<i>Bewertung</i>	Sehr starke Trocknung	Starke Trocknung	Mäßige Trocknung	Geringe Änderung
<b>Nutzbarer Energieinhalt</b>	Zunahme	Abnahme bis 4 %	Abnahme 4,1–8 %	Abnahme > 8 %
<i>Bewertung</i>	Energiegewinn	Geringer Verlust	Hoher Verlust	Sehr hoher Verlust

**Tabelle 19:** Zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse aus den Freilandversuchen

Lagerungsperiode	Parameter	Waldrestholz			Energierundholz		
		Hackschnitzel ohne Abdeckung	Hackschnitzel mit Vlies	Ungehackt im Polter	Hackschnitzel ohne Abdeckung	Hackschnitzel mit Vlies	Ungehackt im Polter
Winterlagerung	Trockenmasse	Starke Abnahme	Starke Abnahme	Starke Abnahme	Mäßige Abnahme	Mäßige Abnahme	Geringe Abnahme
	Wassergehalt	Geringe Änderung	Starke Trocknung	Geringe Änderung	Geringe Änderung	Geringe Änderung	Mäßige Trocknung
	Nutzbarer Energieinhalt	Sehr hoher Verlust	Geringer Verlust	Hoher Verlust	Hoher Verlust	Geringer Verlust	Energiegewinn
	Brennstoffqualität			Reduktion Aschegehalt und Feinanteil			
	Sonstiges						
Sommerlagerung	Trockenmasse	Starke Abnahme	Sehr starke Abnahme	Sehr starke Abnahme	Starke Abnahme	Starke Abnahme	Keine Daten
	Wassergehalt	Sehr starke Trocknung	Sehr starke Trocknung	Starke Trocknung	Starke Trocknung	Sehr starke Trocknung	
	Nutzbarer Energieinhalt	Energiegewinn	Energiegewinn	Hoher Verlust	Geringer Verlust	Energiegewinn	
	Brennstoffqualität			Reduktion Aschegehalt und Feinanteil			
	Sonstiges	Witterungsverlauf während Versuchsreihe ungewöhnlich trocken		Waldschutzsituation beachten	Witterungsverlauf während Versuchsreihe ungewöhnlich trocken		

## 8 Behälterversuche

Ergänzend zu den Freilandversuchen aus Kapitel 7 fanden im Sommer 2015 Behälterversuche am TFZ (48.885° N, 12.585° O) statt. Hierbei sollte unter kontrollierten Lagerungsbedingungen das Lagerungsverhalten unterschiedlicher Rohmaterialien analysiert werden. Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen in Abschnitt 6.3 wurden in den Versuchsaufbau der Behälterversuche mit aufgenommen.

Bei den Versuchen wurde im Speziellen der Einfluss des Feingehalts auf die Trockenmasseverluste und die Trocknungseffekte untersucht. Wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, können während der Lagerung von frischen Hackschnitzeln große Verluste durch mikrobielle Abbauprozesse auftreten. Ein hoher Anteil an Feinmaterial bietet eine große Angriffsfläche für Mikroorganismen. Zugleich finden sich leicht verfügbare Mikro- und Makronährstoffe, die für mikrobielles Wachstum benötigt werden, in Blättern, Nadeln und in der Rinde [68]. Auch bedingt ein hoher Feinanteil eine schlechtere Belüftung und somit eine schlechtere Wärmeabfuhr aus den Mieten, wodurch sich ein besseres Mikroklima für Bakterien und Pilze aufbauen könnte. Aufgrund der genannten Eigenschaften würde ein höherer Feingehalt höhere Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln bedeuten.

Bisherige Studien [71] [56] zeigten zwar den Einfluss der Partikelgröße auf die Lagerung, jedoch stellten diese Lagermieten keine systematische Betrachtung dar. Zudem kann über diese Ergebnisse, die bislang ausschließlich mit Hackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb erarbeitet wurden, keine generelle Übertragbarkeit auf andere relevante Sortimenten gewährleistet werden. Daher war das Ziel der hier dargestellten Behälterversuche, den Einfluss des Feingehalts auf das Lagerungsverhalten in Bezug auf Trockenmasseverluste und Trocknungseffekte typischer bayerischer Hackschnitzelsortimente zu ermitteln. Daneben wurde die Übertragbarkeit klein angelegter Behälterversuche auf praxisnahe Freilandversuche (siehe Kapitel 7) untersucht.

### 8.1 Material und Methoden

Als Behälter wurden Lagerkisten mit 0,6 m<sup>3</sup> Füllvolumen verwendet (Abbildung 35). In die Kistenböden wurden Löcher gebohrt und diese mit einem luftdurchlässigen Netz ausgelegt (siehe Abschnitt 6.3). Auf diese Weise wurde ein möglichst natürlicher Luftaustausch im Behälter ermöglicht. Die Seitenwände der Kisten wurden isoliert, um möglichst geringe Temperaturunterschiede innerhalb der Kiste zu gewährleisten. Jede Kiste wurde mit einem Temperatursensor (Datalogger testo 175-H1, Testo AG) ausgestattet, welcher mittig in der jeweiligen Hackschnitzelcharge im Behälter platziert wurde. So konnte die Temperatur der eingelagerten Hackschnitzel kontinuierlich aufgezeichnet werden. Gleichzeitig wurden im 30-Minuten-Intervall die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte am Lagerungsort mit einem weiteren Logger erfasst. Die Lagerung der Hackschnitzel fand in einem wind- und regengeschützten Unterstand statt und erfolgte

zeitgleich zu den Sommer-Freilandversuchen für einen Lagerungszeitraum von fünf Monaten (bzw. 23 Wochen oder 161 Tage) von Mai bis Oktober 2015.



Abbildung 35: Behälterversuche – Aufbau der Lagerbehälter

### 8.1.1 Verwendete Hackschnitzelsortimente

Um eine möglichst große Bandbreite an unterschiedlichen Rohmaterialien zu bewerten, wurden fünf typische Hackschnitzelsortimente gewählt: Energierundholz (Er) aus Fichte und Buche, Waldrestholz (Wrh) aus Nadel- und Laubholz sowie Pappelholz aus dem Kurzumtrieb (KUP) (Abbildung 36).



Abbildung 36: Untersuchte Hackschnitzelsortimente: Energierundholz aus Fichte (1) und Buche (2), Waldrestholz aus Nadel- (3) und Laubholz (4) und Pappelholz aus dem Kurzumtrieb (5)

Die fünf Sortimente wurden im erntefrischen Zustand eingelagert und Proben zur Analyse vorbereitet. Das Waldrestholz aus Nadelholz und das Energierundholz aus Fichte



entstammten den Freilandversuchen (siehe Abschnitt 7.1.1). Hierfür wurden je 2 m<sup>3</sup> bei der Sortimente bei Einlagerung der Lagermieten zum TFZ transportiert, um gleichzeitig eine Übertragbarkeit von Behälterversuchen auf Freilandversuche zu prüfen.

### 8.1.2 Versuchsdesign und Probenvorbereitung

Jedes Sortiment wurde in zwei Varianten eingelagert: Gesiebt (Partikellänge > 8 mm) und ungesiebt (Zustand bei Anlieferung). Die Siebung erfolgte mit einem selbstkonstruierten Trommelsieb mit einer Lochweite von 8 mm (Abbildung 37, a).



Abbildung 37: Siebung (a) und Homogenisierung (b) der Hackschnitzelsortimente

Vor der Einlagerung in den Behältern wurde das Material homogenisiert und es wurden Proben zur Analyse des Ausgangszustandes der Hackschnitzel genommen. Die Homogenisierung erfolgte mittels eines umfunktionierten Getreidemischers. Die Behälter konnten nach dem Homogenisierungsvorgang direkt über den Auslauf des Mixers in die Container verlustfrei und ohne möglichen Eintrag von Fremdmaterial befüllt werden (Abbildung 37, b).

### 8.1.3 Kontinuierliche Messungen während der Lagerung

Während des gesamten Lagerzeitraums wurde die Temperatur in den Hackschnitzeln (in °C), sowie die Lufttemperatur (in °C) und die relative Luftfeuchte (in %) im Lager aufgezeichnet. Die Messungen wurden jeweils mit einem Temperaturdatenlogger (Datalogger testo 175-H1, Testo AG) im 30-Minuten-Takt gemittelt und gespeichert. Aus den gemessenen Werten wurde das Sättigungsdefizit der Luft berechnet (siehe Anhang 13.3). Dies ist die Differenz aus dem Sättigungsdampfdruck und dem Dampfdruck der Luft und gibt an, wie viel Wasserdampf die Luft bis zu ihrer Sättigung noch aufnehmen kann.

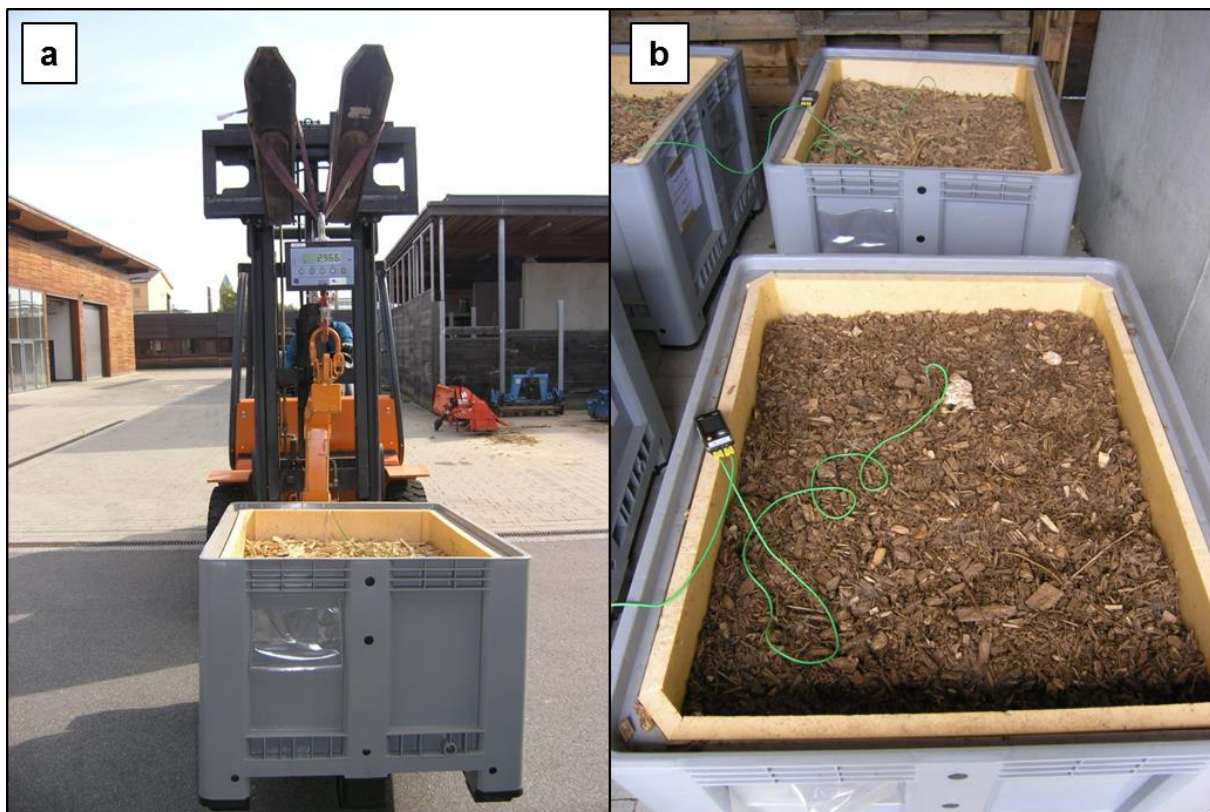


Abbildung 38: Kontinuierliche Messungen (a: Wiegen der Behälter; b: Temperaturmessungen in den Behältern)

Um den Trocknungsvorgang der Hackschnitzel zu überprüfen, wurde das Hackschnitzelgewicht (in kg) alle drei Wochen mittels einer an einem Radlader befestigten Kranwaage (DINI ARGEO MCW1500, AS-Wägetechnik GmbH, Messgenauigkeit  $\pm 0,45$  kg) bestimmt.

### 8.1.4 Messungen bei der Ein- und Auslagerung der Hackschnitzel

Am Tag der Einlagerung wurden bei dem Befüllvorgang der einzelnen Behälter aus dem fließenden Gutstrom jeweils sechs Proben zur Bestimmung des Wassergehalts (in m-%) nach DIN EN 14774-2 [24] und drei Proben zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung



lung nach DIN EN 15149-1 [29] genommen. Die Methoden zur Brennstoffanalyse sind in Abschnitt 7.1.3 beschrieben.



Abbildung 39: Entleeren des Behältermaterials (a) und anschließende Homogenisierung und Probenteilung (b, c) der Hackschnitzel nach der Lagerung

Um die Prozesse während der Lagerung in den Hackschnitzeln nicht zu stören, konnte der Wassergehalt nur bei Einlagerung und nach 23 Wochen bei Auslagerung ermittelt werden. Nach der Lagerung wurden die Hackschnitzel aus den Behältern geschüttet und in Anlehnung an DIN EN 14780 [30] durch dreimaliges Umschütten mit der Schaufel homogenisiert. Proben zur Bestimmung des Wassergehalts und der Partikelgrößenverteilung wurden bei der Auslagerung durch Teilen der gesamten Charge nach DIN EN 14780 [30] mittels Vierteilung und mittels eines selbstgebauten Probenteilers gezogen (Abbildung 39). Die Trockenmasseverluste (in m-%) wurden über den Wassergehalt und das Hackschnitzelgewicht bei Ein- und Auslagerung bilanziert (siehe Abschnitt 7.1.2).

### 8.1.5 Statistische Auswertung

Die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse erfolgte mithilfe des Software-Programms OriginPro2015. Zum Vergleich der Veränderung bei Ein- und Auslagerung wurde der t-Test nach Student angewendet. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf 5 % festgelegt ( $p \leq 0,05$ ). Um die Stärke und Richtung des Zusammenhangs zweier Variablen zu untersuchen, wurden Korrelationsanalysen nach Pearson verwendet (ausführliche Beschreibung der Auswertungen sind in Abschnitt 7.1.4 aufgeführt).

## 8.2 Ergebnisse und Diskussion

### 8.2.1 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Bei Einlagerung lag der Wassergehalt aller untersuchten Sortimente und Varianten zwischen 32,7 und 68,9 m-% (siehe Tabelle 20). Die Werte zeigen, dass die Hackschnitzel Wrh Laub und Er Buche nicht mehr als „erntefrisch“ bezeichnet werden können, d. h., dass es in diesem Fall schon zu einer Trocknung vor Versuchsbeginn gekommen war. Der Wassergehalt der KUP-Hackschnitzel lag dagegen sehr hoch, weshalb hier davon ausgegangen werden muss, dass der Wassergehalt durch Niederschlag vor dem Versuch angestiegen ist. In den meisten Fällen lag der Wassergehalt der gesiebten Hackschnitzel bei Einlagerung etwas niedriger als bei den ungesiebten Varianten. Durch den Siebvorgang, d. h. durch die Bewegung der Hackschnitzel und damit durch die Berührung der kompletten Charge mit Außenluft, kann es eventuell zu einer leichten Trocknung der Hackschnitzel gekommen sein.

*Tabelle 20: Charakterisierung des Ausgangsmaterials der Behälterversuche (Mittelwerte,  $\pm$ Standardabweichung,  $n = 3$ ; n. k. = nicht klassifizierbar)*

Hackschnitzelsortiment (ungesiebt/gesiebt)	Wassergehalt Einlagerung, m-%	Partikelklasse nach [31]/[32]	Feinanteil (Partikel $\leq 3,15$ mm), m-%	Anteil an Partikeln $\leq 8$ mm, m-%
Er Fichte (ungesiebt)	51,2 ( $\pm 0,6$ )	P31/P31S	7,5 ( $\pm 2,4$ )	17,8 ( $\pm 3,0$ )
Er Fichte (gesiebt)	51,7 ( $\pm 0,4$ )	P31/P31S	0,2 ( $\pm 0,2$ )	6,5 ( $\pm 3,9$ )
Er Buche (ungesiebt)	39,4 ( $\pm 0,2$ )	P31/n.k.	14,5 ( $\pm 1,9$ )	30,5 ( $\pm 3,4$ )
Er Buche (gesiebt)	39,3 ( $\pm 0,2$ )	P300/n.k.	0,1 ( $\pm 0,0$ )	1,6 ( $\pm 0,9$ )
Wrh Nadelholz (ungesiebt)	49,6 ( $\pm 0,4$ )	P31/n.k.	15,1 ( $\pm 1,8$ )	34,6 ( $\pm 2,9$ )
Wrh Nadelholz (gesiebt)	46,3 ( $\pm 0,5$ )	P31/P31S	0,8 ( $\pm 0,0$ )	14,7 ( $\pm 0,3$ )
Wrh Laubholz (ungesiebt)	33,2 ( $\pm 0,4$ )	P31/n.k.	17,4 ( $\pm 4,1$ )	33,6 ( $\pm 5,9$ )
Wrh Laubholz (gesiebt)	32,7 ( $\pm 0,7$ )	P45/P45S	1,2 ( $\pm 0,2$ )	6,0 ( $\pm 2,1$ )
KUP Pappel (ungesiebt)	68,9 ( $\pm 0,3$ )	P31/n.k.	11,5 ( $\pm 1,8$ )	34,5 ( $\pm 2,9$ )
KUP Pappel (gesiebt)	67,5 ( $\pm 0,6$ )	P31/P31S	2,0 ( $\pm 0,3$ )	13,4 ( $\pm 4,7$ )

Tabelle 20 zeigt neben den Wassergehalten bei der Einlagerung die Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225 (Teil 1 und 4) und die Massenanteile an Partikelklassen  $\leq 3,15$  mm und  $\leq 8$  mm. Durchschnittlich wurden zwischen 10 und 30 % der Hackschnitzelmasse je Variante ausgesiebt. Bei Einlagerung der Hackschnitzel konnten alle Sortimente der ungesiebten Varianten als P31 nach DIN EN ISO 17225-1 klassifiziert werden ([31], Tabelle 20). Bei drei von fünf Sortimenten hatte die Siebung einen positiven Effekt nach DIN EN ISO 17225-4, d. h., nach der Siebung konnten diese Sortimente (als „S-Klassen“, siehe Abschnitt 4.2) gemäß Teil 4 der genannten Norm eingestuft werden [32]. Dies lässt sich primär auf die Reduzierung des Feinanteils zurückführen. Die Qualität konnte somit verbessert werden und die Hackschnitzel sind demnach hinsichtlich ihrer Partikelgröße auch für kleine Feuerungen geeignet. Bei Er Fichte konnte zwar der Feinanteil deutlich verringert werden, dies hatte allerdings keine Auswirkung auf die Größenklasse. Bei Er Buche hatte die Siebung einen gegenteiligen Effekt. Sie führte zu einer Qualitätsverschlechterung nach DIN EN ISO 17225-4, da prozentual der damit größer werdende Grobanteil ( $> 10$  m-%) nach der Siebung nicht einmal mehr eine Klassifizierung als P45S zuließ. Diese Hackschnitzel konnten nach der Siebung nur nach Teil 1 als P300 eingeordnet werden.

### 8.2.2 Klimaparameter und Gewichtsänderungen

Während der fünfmonatigen Lagerung lag die mittlere Lufttemperatur von Mai bis Oktober bei  $19,0$  °C und die mittlere relative Luftfeuchte bei  $65,2$  % (Abbildung 40). Die Lufttemperatur lag während dieser Zeit durchschnittlich knapp  $3$  °C höher als in den vergangenen 10 Jahren [23]. Besonders die Sommermonate Juli und August waren durch sehr hohe Durchschnittstemperaturen ( $24,0$  °C) und eine niedrige Luftfeuchte ( $\bar{\varnothing} 57,9$  %) geprägt. Dies führte in diesen Monaten zu einem starken Sättigungsdefizit der Luft. Das Defizit lag im Juli und August im Mittel bei  $13,8$  hPa.

Das Hackschnitzelgewicht nahm während der gesamten Lagerdauer um durchschnittlich  $39$  m-% ab (absolut; min.:  $21$  m-%; max.:  $53$  m-%). Durchschnittlich verloren die Hackschnitzel pro Woche ca.  $1,7$  m-% (abs.) an Eigengewicht. Bei diesem Verlust konnte ein signifikanter Zusammenhang mit dem durchschnittlichen Sättigungsdefizit pro Woche ( $p \leq 0,05$ ) festgestellt werden. Je höher das Sättigungsdefizit, desto höher ist auch die Aufnahmefähigkeit der Luft, d. h., desto mehr ungebundenes Wasser der Hackschnitzel kann von der Luft aufgenommen werden (Abbildung 41). Folglich kommt es zu einer stärkeren Trocknung der Hackschnitzel. Die höchsten Gewichtsverluste wurden in den Sommermonaten mit den höchsten Sättigungsdefiziten gemessen.

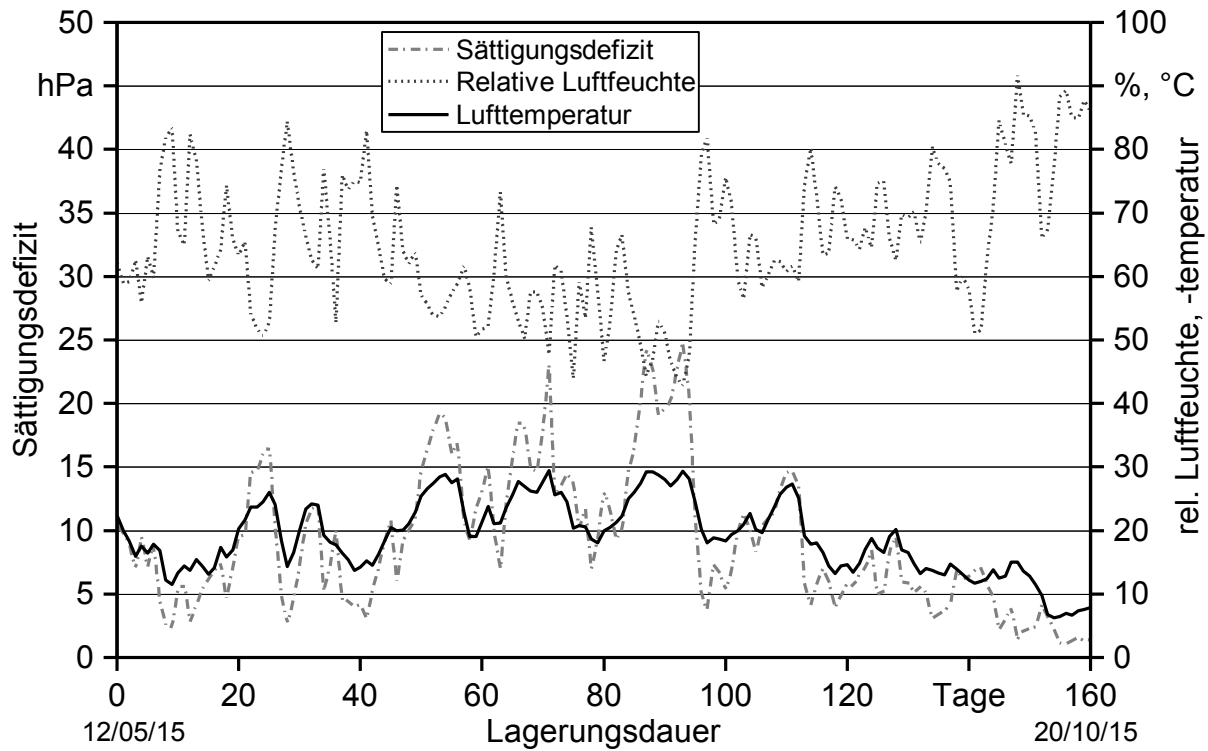


Abbildung 40: Sättigungsdefizit der Luft, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte während der gesamten Lagerdauer von 23 Wochen

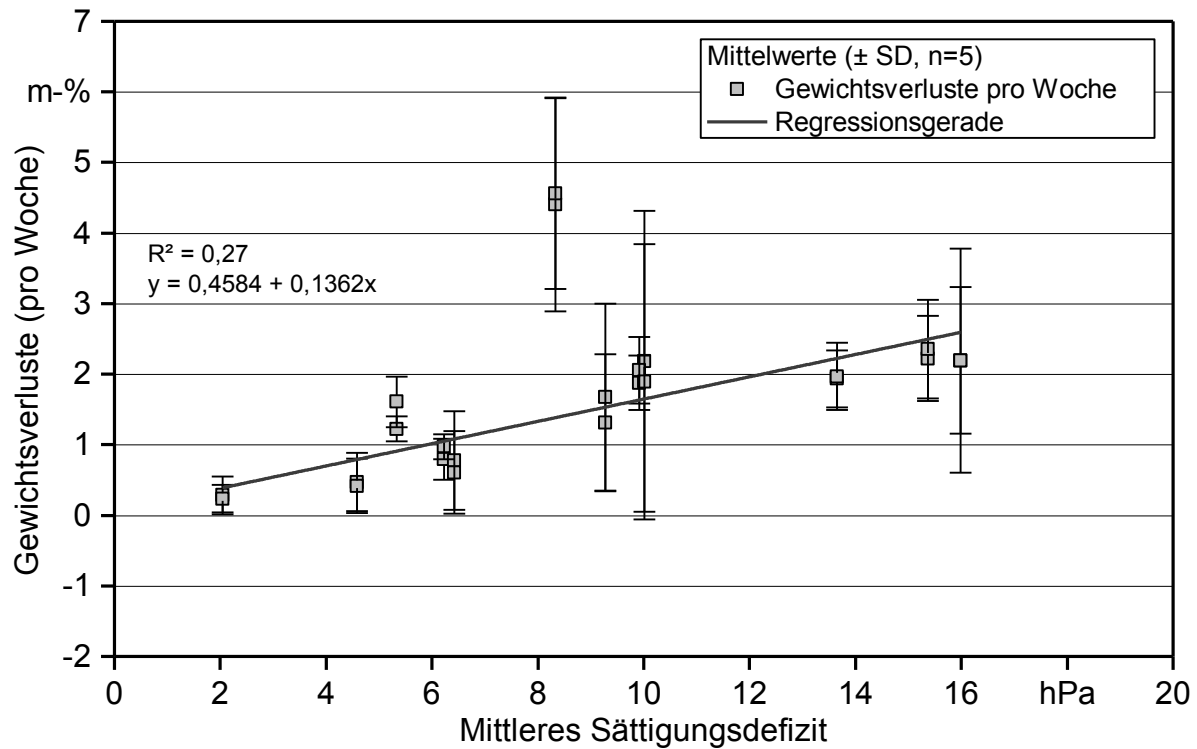


Abbildung 41: Lineare Regression ( $p = 0,0086$ ,  $SD = \text{Standardabweichung}$ ) des mittleren Sättigungsdefizits der Luft und der Gewichtsverluste pro Woche

In früheren Studien wurden bereits Modelle entwickelt, die den aktuellen Wassergehalt teils über die Gewichtsänderung von gehacktem und ungehacktem Material und/oder über Klimaparameter während der Lagerung berechnen [13] [1] [47]. Diese sind jedoch nicht universell anwendbar, sondern z. B. nur auf bestimmte Regionen übertragbar. Im Umkehrschluss konnten für die Behälterversuche keine exakten Berechnungen der Trockenmasseverluste während der Lagerung über diese Modelle erfolgen.

### 8.2.3 Entwicklung der Hackschnitzeltemperatur

Das Sättigungsdefizit der Umgebungsluft bestimmt zwar die Menge des Wassers, das einem Medium entzogen werden kann, gleichzeitig sind jedoch die physikalischen Eigenschaften des Mediums (d. h. Hackschnitzel) von Bedeutung für die Trocknungsrate. Die Temperatur der Hackschnitzel, die durch mikrobielle Aktivität entsteht, ist dabei ein weiterer wichtiger Faktor. In den ungesiebten Hackschnitzelsortimenten war sie im Durchschnitt höher als in den gesiebten Sortimenten (siehe Abbildung 42 und Tabelle 21). Die Maximaltemperaturen wurden in den ersten Tagen nach Einlagerung der Hackschnitzel sowie später in den Sommermonaten Juli und August erreicht. Schwankungen im Verlauf der Hackschnitzeltemperatur wurden aber primär durch Schwankungen der Lufttemperatur hervorgerufen. Ein starker Einfluss der Lufttemperatur wurde auch von THÖRNQVIST [77] festgestellt. Die Temperatur von Mieten mit geringem Hackschnitzelvolumen ( $< 120 \text{ m}^3$ ) wird i. d. R. stark von der Lufttemperatur beeinflusst. Ab Mitte September sanken die Lufttemperaturen und ebenso die gemessenen Behältertemperaturen.

*Tabelle 21: Durchschnittliche Hackschnitzeltemperatur und Differenz zur Lufttemperatur*

Hackschnitzelsortiment (ungesiebt/gesiebt)	Hackschnitzeltemperatur, °C	Temperaturdifferenz zur Außenluft, °C (absolut)
Er Fichte (ungesiebt)	20,5	1,5
Er Fichte (gesiebt)	17,4	-1,5
Er Buche (ungesiebt)	20,4	1,5
Er Buche (gesiebt)	16,9	-2,1
Wrh Nadelholz (ungesiebt)	22,9	3,9
Wrh Nadelholz (gesiebt)	18,8	-0,2
Wrh Laubholz (ungesiebt)	20,0	1,1
Wrh Laubholz (gesiebt)	17,4	-1,6
KUP Pappel (ungesiebt)	19,8	0,8
KUP Pappel (gesiebt)	18,9	-0,1

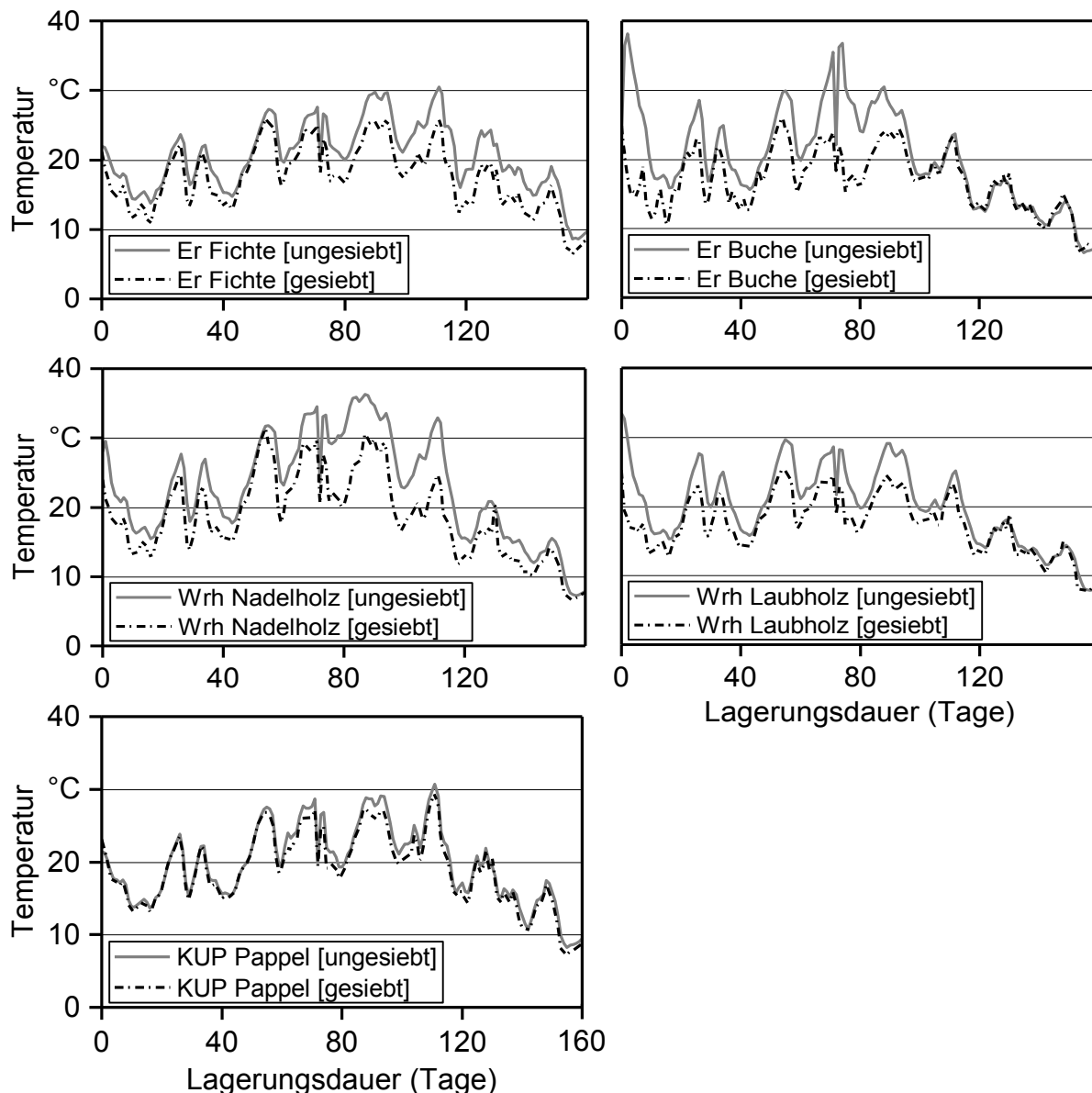


Abbildung 42: Entwicklung der Hackschnitzeltemperatur in den Behältern während der Lagerung

Aufgrund der starken Abhängigkeit der Behältertemperatur von der Lufttemperatur wurden Mittelwerte für die Differenz dieser Temperaturen (in °C) errechnet (Abbildung 42). Die Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) der gesiebten Hackschnitzel zeigte niedrigere Werte im Vergleich zu den ungesiebten Varianten. Im Mittel lag die Temperaturdifferenz der gesiebten Varianten im negativen Bereich, d. h., die Temperatur der Hackschnitzel lag durchschnittlich unter der Lufttemperatur. Es wird daher vermutet, dass es besonders bei den gesiebten Varianten durch die Verdunstung von ungebundenem Wasser in den Hackschnitzeln zu einem Kühlungseffekt kam [56]. Die insgesamt höheren Temperaturen der ungesiebten Varianten lassen vermuten, dass es aufgrund des höheren Feinanteils zu einer schlechteren Durchlüftung der Hackschnitzel und somit einem geringeren Abtransport der feuchten, warmen Luft kam. Gleichzeitig könnte der Feinanteil aufgrund



seiner hohen Oberfläche und des höheren Anteils an leicht verfügbaren Nährstoffen zu einem verstärkten Abbau durch mikrobielle Prozesse und damit zu einer leichten Wärmebildung geführt haben [56].

Der positive Zusammenhang zwischen Feinanteil und Temperaturdifferenz konnte statistisch belegt werden. Je höher der Feinanteil (Partikel  $\leq 3,15$  mm) der Hackschnitzel war, desto stärker war der Anstieg der Temperatur in den Hackschnitzeln. Ein noch klarerer Zusammenhang (siehe Abbildung 43) wurde zwischen dem Anteil der Partikel mit einer Größe von  $\leq 8$  mm und der Temperaturdifferenz festgestellt.

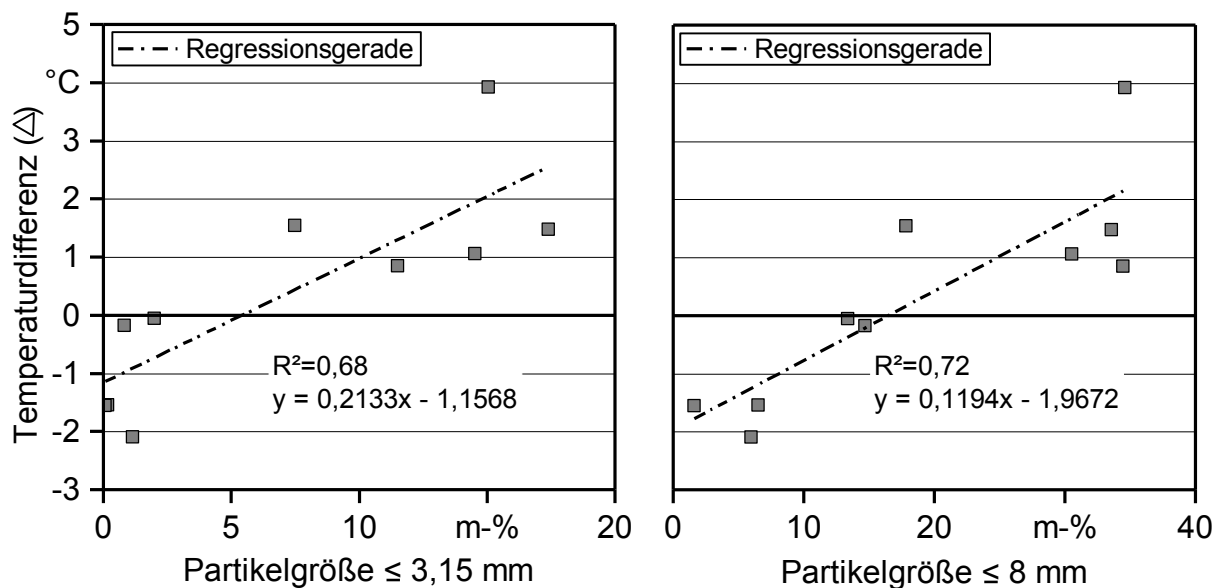


Abbildung 43: <sup>Gleichung  $v = a + b \cdot x$</sup>  Lineare Regression zwischen dem Anteil der Partikel mit einer Größe  $\leq 3,15$  mm ( $p = 0,0036$ ) bzw. 8 mm ( $p = 0,0019$ ) und der Temperaturdifferenz ( $\Delta =$  Behältertemperatur - Lufttemperatur)

#### 8.2.4 Trockenmasseverluste und Wassergehaltsänderungen

Während der Lagerungsdauer von 23 Wochen nahm der Wassergehalt über alle Hackschnitzelvarianten durchschnittlich um 21,5 m-% (absolut,  $\pm 4,2$  m-% Standardabweichung (SD)) ab. Der insgesamt gute Trocknungserfolg ist primär auf die dafür optimalen Klimabedingungen in den Sommermonaten zurückzuführen. Die gesiebten Hackschnitzel zeigten nach 23 Wochen signifikant niedrigere Wassergehalte im Vergleich zu den ungesiebten Varianten ( $p \leq 0,05$ ; t-Test nach Student). Der geringere Feinanteil führte zu einer besseren Durchlüftung und dadurch einem schnelleren Abtransport des Wassers in den Hackschnitzeln. Die Hackschnitzel aus Er Buche, Wrh Laubholz und die gesiebten Wrh Nadelholz hackschnitzel erreichten nach der Lagerung Wassergehalte unter 20 m-% (Tabelle 22). Daher können diese Hackschnitzel als bereits „lagerstabil“ bezeichnet werden [50] [72]. Bei einem Wassergehalt über 25 m-%, wie er zum Zeitpunkt der Auslagerung bei allen anderen Varianten gemessen wurde, ist Wasser ungebunden in den Zellhohlräumen vorhanden [72]. Dieses Wasser ist für das Wachstum von Pilzen und Mikro-

organismen frei verfügbar. Daher wären bei diesen Hackschnitzeln bei einer längeren Lagerdauer nicht nur Feuchteverluste, sondern auch weitere Trockenmasseverluste zu erwarten gewesen. Der Zusammenhang zwischen Lagerdauer und Trockenmasseverlusten wurde bei den Freilandversuchen als signifikant nachgewiesen (siehe Abschnitt 7.2.5).

*Tabelle 22: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung, SD) und Trockenmasseverlust (TM) am Ende der Lagerung und Veränderung des Wassergehalts im Vergleich zur Einlagerung ( $\Delta$  absolut)*

Hackschnitzelsortiment (ungesiebt/gesiebt)	Wassergehalt nach 23 Wochen, m-% ( $\pm$ SD)	Wassergehalts- differenz zur Einlagerung, $\Delta$ (absolut)	TM-Verluste, m-%
Er Fichte (ungesiebt)	30,4 ( $\pm$ 0,9)	-20,8	8,7
Er Fichte (gesiebt)	27,9 ( $\pm$ 0,5)	-23,8	4,2
Er Buche (ungesiebt)	19,3 ( $\pm$ 0,3)	-20,2	7,0
Er Buche (gesiebt)	16,2 ( $\pm$ 0,4)	-23,1	4,0
Wrh Nadelholz (ungesiebt)	25,9 ( $\pm$ 0,8)	-23,7	11,6
Wrh Nadelholz (gesiebt)	19,3 ( $\pm$ 0,0)	-27,0	7,5
Wrh Laubholz (ungesiebt)	19,7 ( $\pm$ 0,4)	-13,5	4,2
Wrh Laubholz (gesiebt)	16,1 ( $\pm$ 0,1)	-16,6	1,7
KUP Pappel (ungesiebt)	49,1 ( $\pm$ 1,1)	-19,8	21,7
KUP Pappel (gesiebt)	41,3 ( $\pm$ 0,7)	-26,2	15,5

Die durchschnittlichen Trockenmasseverluste aller Behältervarianten lag am Ende der Lagerung bei 8,6 m-% ( $\pm$ 6,1 m-% SD). Dabei waren die Trockenmasseverluste der gesiebten Varianten jeweils um durchschnittlich 4,1 m-% (absolut,  $\pm$ 1,4 m-% SD) niedriger als die der ungesiebten Varianten (Tabelle 22).

Neben der Aufbereitung mittels Siebung waren die bilanzierten Trockenmasseverluste stark abhängig vom Wassergehalt der Hackschnitzel bei der Einlagerung (Abbildung 44). Je höher der Wassergehalt bei der Einlagerung, desto länger befanden sich die Hackschnitzel in einem Bereich, der für mikrobielles Wachstum optimal ist (Wassergehalt: 30–50 m-% [50]). Wie in Abbildung 44 dargestellt, steigen entsprechend die Trockenmasseverluste über die beobachtete Lagerdauer mit zunehmendem Einlagerungswassergehalt an. Auch DUMFORD et al. [38] hatten eine solche signifikante Abhängigkeit der mikrobiellen Aktivität und der Trockenmasseverluste vom Wassergehalt in Hackschnitzeln festgestellt.

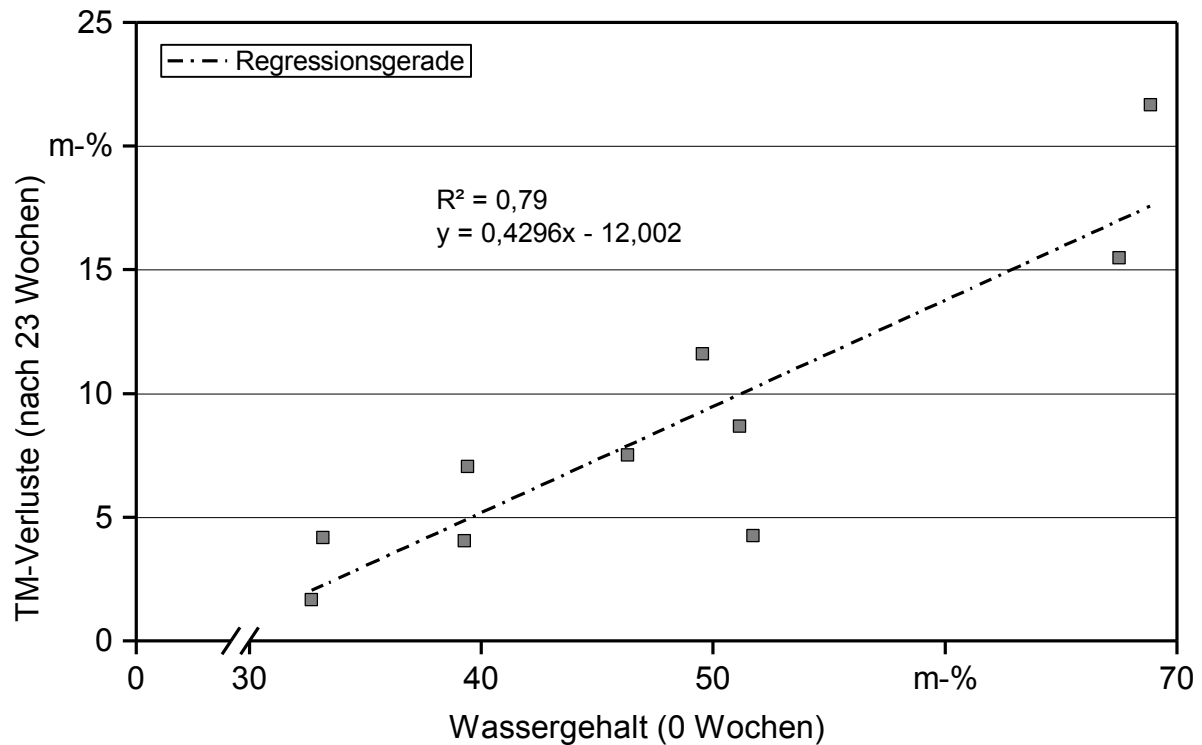


Abbildung 44: Lineare Regression ( $p = 0,0006$ ) des Wassergehalts der Hackschnitzel bei Einlagerung (0 Wochen) der Hackschnitzel und der Trockenmasseverluste der Hackschnitzel bei Auslagerung (23 Wochen)

### 8.2.5 Vergleich der Ergebnisse mit den Freilandversuchen

Die Verwendung derselben Hackschnitzelsortimente und auch nahezu desselben Lagerungszeitpunktes und derselben Lagerungsdauer ermöglicht einen direkten Vergleich der Behälterversuche mit den Freilandversuchen. Die größten Unterschiede zwischen den beiden Messkampagnen lagen in den unterschiedlichen Lagervolumina und den daraus resultierenden unterschiedlichen Temperaturentwicklungen innerhalb der Schüttungen bzw. Behälter. Dieser Temperaturunterschied war besonders stark beim Waldrestholz. Die mit Vlies abgedeckte Wrh-Lagermiete erreichte im Sommersversuch Temperaturen von über 60 °C, wohingegen die Temperatur der ungesiebten Wrh-HS der Behälterversuche maximal 38 °C erreichte. Trotz dieser Unterschiede waren die Ergebnisse zum Wassergehalt und zu den Trockenmasseverlusten der ungesiebten Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel bei den Behälterversuchen auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Freilandversuchen (siehe Tabelle 23).

*Tabelle 23: Vergleich der Trockenmasse(TM)-Verluste und Wassergehaltsänderungen von Behälter- und Freilandversuchen*

Parameter		Behälterversuche (ungesiebt)	Freilandversuche (mit Regenschutz)
TM-Verlust, m-%	Wrh	11,6	11,1
	Er	8,7	6,9
Änderung des Wassergehalts (absolut), m-%	Wrh	-23,7	-22,6
	Er	-20,8	-22,2

### 8.3 Zusammenfassung und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Freilandversuche

Die Siebung von Hackschnitzeln führte bei der Lagerung in Behältern nicht nur zu einer besseren Trocknung, sondern auch zu geringeren Trockenmasseverlusten im Vergleich zu den ungesiebten Varianten. Die Behälterversuche haben gezeigt, dass die Trocknung und die Verluste durch biologische Abbauprozesse von einer Vielzahl externer Faktoren, z. B. dem Sättigungsdefizit der Luft und den physikalischen Eigenschaften der Hackschnitzel (z. B. dem Feinanteil), abhängen. Die Siebung führt zudem in den meisten Fällen zu einer höheren Brennstoffqualität hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-4 und gerade beim Waldrestholz ist ein positiver Einfluss auf den Aschegehalt (hier nicht gemessen) anzunehmen. Jedoch werden bei einer Siebung ca. 10 bis 30 m-% der Brennstoffmasse abgeseibt. Dieser „Siebdurchgang“ könnte als Verlust angesehen werden, falls er nicht kommerziell weiter genutzt wird. Höhere Brennstoffpreise der gesiebtten Hackschnitzel und eine alternative Vermarktung der ausgesiebtten Produkte, z. B. als Einstreu oder in der Kompostierung, könnten den Massenverlust durch Siebung wirtschaftlich kompensieren.

Die Ergebnisse zum Wassergehalt und zu den Trockenmasseverlusten der ungesiebtten Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel waren bei den Behälterversuchen auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Freilandversuchen (vgl. Abschnitt 7.2). Deshalb wird, zumindest im Sommerhalbjahr, eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Behälterversuchen auf praxisnahe Lagerungsbedingungen angenommen.

Für das Winterhalbjahr liegen keine Behälterversuchsmessungen vor, es darf jedoch angenommen werden, dass hier kein positiver Effekt durch Siebung eingetreten wäre. Bei den Er-HS hätte die Siebung voraussichtlich aufgrund der fehlenden Eigenerwärmung zu keiner besseren Trocknung geführt. Bei den Wrh-HS hätte die Siebung sogar zu einem nachteiligen Effekt führen können. Im Winterversuch wurde die Trocknung der Wrh-HS primär durch die starke Wärmeentwicklung und den Wärmestau aufgrund des hohen Grün- und Feinanteils erzielt. Bei Absiebung dieses Anteils wäre die Trocknung daher deutlich geringer gewesen.

Abschließend festzuhalten ist, dass kleine Versuche mit Behältern (0,6 m<sup>3</sup>), wie sie in dieser Versuchsreihe durchgeführt wurden, eine leicht anwendbare und günstige Metho-

de zur Überprüfung der Veränderung der Lagereigenschaften darstellen und eine gute Übertragbarkeit in die Praxis vermuten lassen. Weitere Behälterversuche sind zukünftig am TFZ geplant.



## 9 Analyse der Kosten der Hackschnitzellagerung

In der betrieblichen Praxis beeinflussen zahlreiche Aspekte die Anforderungen an die Hackschnitzellagerung und somit auch deren ökonomische Auswirkungen. Zunächst müssen Absicht und Zweck der Hackschnitzelproduktion und -lagerung differenziert werden. Ein Privatverbraucher (z. B. ein Landwirt), der eine Hackschnitzelzentralheizung mit Hackschnitzeln aus dem eigenen Wald betreibt, hat andere Ziele und Kosten als ein großer Biomassehändler. Infrastruktur, Maschinenausstattung und Personalaufwand etc. unterscheiden sich entsprechend stark. Das Ziel der Kostenanalyse war es, anhand von zwei praxisrelevanten Szenarien die Auswirkungen einer Lagerung, wie sie im vorliegenden Projekt untersucht wurde, auf die Produktionskosten aufzuzeigen. Damit kann jedoch nicht die Vielfalt der Lagerungskonzepte, Betriebsstrukturen und Arbeitsabläufe in der Hackschnitzelbranche abgedeckt werden. Je nachdem, wie stark sich einzelne Akteure in diesen Szenarien wiederfinden, können sie die aufgezeigten Schlussfolgerungen und Empfehlungen auf ihre jeweilige Situation übertragen.

### 9.1 Material und Methoden

Die Szenarien wurden anhand der Ergebnisse aus der durchgeführten Umfrage (siehe Kapitel 5) und von Einblicken in die Lagerungspraxis während der Projektlaufzeit definiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die in den Freilandversuchen (siehe Kapitel 7) gewonnenen Erkenntnisse möglichst passend auf die Szenarien übertragen werden können. Kenngrößen der Szenarien sind unter anderem die jährlich umgesetzte Hackschnitzelmenge, die Größe des Lagerplatzes und die Maschinenausstattung. Die entstehenden Kosten wurden zunächst für jeweils ein Jahr (unter Berücksichtigung der Anzahl der Durchgänge in den Varianten) und bezogen auf die umgesetzte Trockenmasse an Hackschnitzeln ermittelt. Alle Varianten wurden für Hackschnitzel aus Waldrestholz (Wrh-HS) und für Hackschnitzel aus Energierundholz (Er-HS) gerechnet. Einen Überblick über die Varianten gibt Tabelle 24.

#### 9.1.1 Definition von Szenarien

Die definierten Szenarien und Varianten sind in Tabelle 24 zusammenfassend dargestellt. Insgesamt werden 10 Varianten jeweils für die Sortimente Waldrestholz-Hackschnitzel (Wrh-HS) und Energierundholz-Hackschnitzel (Er-HS) betrachtet.

Tabelle 24: Überblick über die Szenarien und Varianten in der ökonomischen Betrachtung.

Szenarien	Varianten	
<b>L</b> Land- und forstwirtschaftlicher Betrieb	<b>L.a</b>	<b>L.a.0:</b> Ohne Vlies
	Alter Lagerplatz vorhanden	<b>L.a.1:</b> Unter Vlies
	<b>L.n</b>	<b>L.n.0:</b> Ohne Vlies
	Lagerplatz neu zu errichten	<b>L.n.1:</b> Unter Vlies
<b>H</b> Biomasse-Händler	<b>H.k</b>	<b>H.k.0:</b> Ohne Vlies
	Kurze Lagerdauer (6 Wochen)	<b>H.k.1:</b> Unter Vlies
	<b>H.m</b>	<b>H.m.0:</b> Ohne Vlies
	Mittlere Lagerdauer (12 Wochen)	<b>H.m.1:</b> Unter Vlies
	<b>H.l</b>	<b>H.l.0:</b> Ohne Vlies
	Lange Lagerdauer (21 Wochen)	<b>H.l.1:</b> Unter Vlies

Die den Szenarien zugrunde liegenden Annahmen sind in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt.

#### 9.1.1.1 Szenario L: Land- und forstwirtschaftlicher Betrieb

Szenario L beschreibt einen land- und forstwirtschaftlichen Betrieb, der Hackschnitzel aus dem eigenen Wald zum Eigenverbrauch produziert. Die Betriebsgebäude werden mit einer Hackschnitzelzentralheizung mit 50 kW Leistung beheizt. Die Heizung benötigt Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von unter 35 m-% [42]. Der jährliche Brennstoffbedarf wird mit ca. 130 Srm Hackschnitzel angesetzt [51]. Diese Hackschnitzelmenge wird nachhaltig aus dem zum Betrieb gehörenden Wald bereitgestellt. Holzernte und Rückung werden betriebsintern bzw. in Eigenleistung durchgeführt. Das Hacken an der Waldstraße wird an forstliche Dienstleistungsunternehmen vergeben. Zusätzliche Kosten für den Hackschnitzeltransport zum Hof mit dem eigenen Traktor und Anhänger werden durch die Lagerung nicht verursacht, da das Holz bei einer alternativen Nutzung bzw. Verwendung ohne Lagerung auch aus dem Wald transportiert werden müsste.

Als Lagerplatz dient eine 120 m<sup>2</sup> große, befestigte Fläche (17 × 7 m) an der Hofstelle, die entweder bereits ungenutzt vorhanden ist (Varianten L.a.0 und L.a.1) oder zum Zwecke der Lagerung gebaut werden muss (Varianten L.n.0 und L.n.1, Tabelle 24). Im ersten Fall werden nur laufende Kosten für den Unterhalt angesetzt. Bei Neubau wird die Anlage eines Platzes mit Betonpflaster inkl. Erdbewegungen und Pflasterbett im Anhalt an Kostensätze des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) [62] berechnet.



Die Lagerdauer der Hackschnitzel beträgt im Mittel 10 Monate: vom Einschlag zu Jahresbeginn bis zum schrittweisen Verbrauch über den Winter. Gelagert wird in einer Miete mit 14,5 m Länge, 6 m Breite und 3 m Höhe.

Zur Manipulation der Hackschnitzel am Hof wird der betriebseigene Schlepper eingesetzt. Dieser wird in erster Linie für Feldarbeiten und andere Arbeiten auf dem Hof verwendet. Es wurde ein Standardtraktor mit Allradantrieb und stufenlosem Getriebe und 83 kW Leistung angenommen und die Maschinenkosten mithilfe der Online-Anwendung „MaKost“ des KTBL [63] berechnet. Zusätzlich zur Eigenleistung kommt ein Helfer zum Einsatz, der im Anhalt an Maschinenringsätze abgerechnet wird.

Der Landwirt hat die Option, ein diffusionsoffenes Schutzvlies einzusetzen (Varianten L.a.0 und L.n.0 ohne Vlies, Varianten L.a.1 und L.n.1 mit Vlies, Tabelle 24). Entsprechend den Herstellerangaben wird von einer Nutzungsdauer des Vlieses von 5 Jahren ausgegangen. Das Zudecken der Hackschnitzel wird durch zwei Personen durchgeführt, wobei eine Person vom Hof gestellt wird (Eigenleistung) und Unterstützung durch einen Helfer vom Maschinenring erhält. Das Auf- und Zudecken zur Befüllung des Bunkers während der Heizperiode wird in Eigenleistung durchgeführt.

#### 9.1.1.2 Szenario H: Biomasse-Händler

Szenario H beschreibt einen Biomasse-Händler, der Hackschnitzel produziert und diese von einem zentralen Biomassehof aus an verschiedene Kunden verkauft. Im Vordergrund stehen bei der Lagerung die Bereitstellungsgarantie zur Erfüllung von Lieferverträgen sowie das flexible Reagieren auf schwankende Marktpreise (siehe Abschnitt 5.1.2). Der Händler verfügt über einen befestigten Lagerplatz als zentralen Umschlagplatz mit einer Grundfläche von 4.200 m<sup>2</sup> (70 × 60 m). Die Baukosten und laufenden Kosten werden für professionelle Errichtung einer Betonplatte im Anhalt an Kostensätze des KTBL [62] berechnet. Bei Anlage von z. B. sechs Mieten mit 60 m Länge, 8 m Breite und 4 m Höhe hat der Lagerplatz eine Kapazität von 5.760 Srm.

Die Maschinenausstattung des Unternehmens besteht aus einem professionellen Radlader (Leistung: 191 kW) mit einer Schaufelfüllmenge von 3,5 m<sup>3</sup> sowie zwei Container-Lkw-Zügen (je zwei Container à 38 m<sup>3</sup> Nennvolumen). Betriebe dieser Art setzen häufig einen eigenen Hacker ein, um ungehackt erworbenes Hackholz zu verarbeiten. Dieser Prozessschritt fällt nicht nur bei der Lagerung, sondern auch bei einer direkten Belieferung der Kunden an. Beim Transport werden nur die durch die Lagerung verursachten zusätzlichen Fahrten (im Vergleich zu einer alternativen Direktlieferung) angerechnet. Für Radlader und Lkw wurden Maschinenkostenkalkulationen in Anlehnung an das Schema nach KWF [64] durchgeführt. Die Kostensätze werden bezogen auf die Maschinenarbeitsstunde (MAS) angegeben.

Für den Biomassehändler wurden drei verschiedene, potenziell mögliche Lagerungskonzepte durchgespielt (Tabelle 24), die sich in erster Linie bezüglich der Lagerdauer unterscheiden:

- Varianten H.k.0 und H.k.1: kurze Lagerdauer (6 Wochen), 7 Durchgänge pro Jahr
- Varianten H.m.0 und H.m.1: mittlere Lagerdauer (12 Wochen), 4 Durchgänge pro Jahr
- Varianten H.l.0 und H.l.1: lange Lagerdauer (21 Wochen), 2 Durchgänge pro Jahr

Die Dauer der Lagerung wirkt sich stark auf die jährliche Durchsatzmenge an Hackschnitzeln und somit auf weitere Positionen aus. Zudem beeinflusst sie die Höhe der Trockenmasseverluste und die Änderung des Wassergehalts.

Auch in Szenario H gibt es die Option, die Hackschnitzel mit einem Vlies abzudecken (Varianten H.k.0, H.m.0 und H.l.0 ohne Vlies, Varianten H.k.1, H.m.1 und H.l.1 mit Vlies). Die Nutzungsdauer des Vlieses wurde in der Variante H.l.1 (2 Durchgänge pro Jahr) entsprechend der Herstellerangabe mit 5 Jahren angesetzt. Bei den Varianten H.m.1 (4 Durchgänge pro Jahr) bzw. H.k.1 (7 Durchgänge pro Jahr) wurde die Nutzungsdauer aufgrund der intensiveren Verwendung auf 4 Jahre (entspricht 16 Durchgängen) bzw. 3 Jahre (entspricht 21 Durchgängen) reduziert. Das Zu- und Aufdecken der Mieten wird jeweils von 2 Lohnarbeitern erledigt.

### 9.1.2 Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel

Um den Verlust an Trockenmasse zu monetarisieren, muss den eingelagerten Hackschnitzeln ein Kostenwert zugeordnet werden. Im Falle des Biomassehändlers in Szenario H können hier Einkaufspreise für waldfrisches Hackholz und zusätzlich die Kosten für das Hacken und den Transport zum Lagerplatz angesetzt werden. Der land- und forstwirtschaftliche Betrieb in Szenario L stellt die Hackschnitzel aus dem eigenen Wald und mit einem hohen Anteil an Eigenleistung bereit. Nur der Prozessschritt Hacken wird durch externe Dienstleister erledigt. Hier werden Opportunitätskosten, die durch den nicht erfolgten Verkauf des Hackholzes entstehen, sowie externe Kosten für das Hacken und intern anfallende Kosten für den Transport in Eigenleistung unter Verwendung früherer Studien [61] und Werten des KTBL [63] hergeleitet. Die Umrechnung zwischen Volumen und Trockenmasse erfolgte, soweit notwendig, im Verhältnis  $1 \text{ Srm} \triangleq 0,17 \text{ t}_{\text{atro}}$  (im Anhalt an Daten für Fichte aus KUPTZ et al.) [61].

### 9.1.3 Einbindung der Lagerungsprozesse

Neben den direkt sichtbaren Kosten für Maschinen, Arbeitskräfte und Betriebsmittel muss auch der Trockenmasseverlust während der Lagerung monetär bewertet werden. Die in den Freilandversuchen (siehe Kapitel 7) ermittelten Trockenmasseverluste sowie die Wassergehaltsänderungen wurden dazu den verschiedenen Varianten zugeordnet. Die entstandenen Kosten wurden nicht auf die eingelagerte, sondern auf die ausgelagerte Hackschnitzelmenge bezogen.

Eine wichtige Eingangsgröße ist der Wassergehalt bei Einlagerung. Die Beschreibung des Ausgangsmaterials in den Feldversuchen haben die bislang bekannten, typischen Wassergehalte von frischen Waldhackschnitzeln bestätigt (siehe Abschnitt 7.2.1). Diese bewegen sich zumeist zwischen 45 und 55 m-% [61]. Da bislang kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Sortiment, Erntezeitpunkt und weiteren Einflussparametern nachgewiesen wurde, wurde für die hier durchgeführten Berechnungen der mittlere Wassergehalt aller Proben bei Einlagerung in den Freilandversuchen verwendet. Dieser lag bei 52,7 m-%.

### **Szenario L: Verwendete Trockenmasseverluste und Wassergehaltsänderungen**

Die in Szenario L angenommene durchgehende Lagerung von im Mittel 10 Monaten mit Einschlag zu Jahresbeginn wurde in den Freilandversuchen nicht untersucht. Bei einem angenommenen Lagerungsbeginn im Frühjahr können jedoch für die ersten 5 Monate die Ergebnisse aus dem Sommersversuch übertragen werden (siehe Abschnitt 7.2). Theoretisch könnten für die anschließende zweite Hälfte der Lagerung (Lagermonat 6 bis 10) die Ergebnisse des Winterversuchs verwendet werden (siehe Abschnitt 7.2). Aufgrund der bereits in den ersten 5 Monaten stattgefundenen Trocknung ist dies jedoch nicht sinnvoll, da der Wassergehalt zu Beginn des Feldversuchs im Winter deutlich über dem Endwassergehalt der Sommerlagerung und damit deutlich über dem Wassergehalt, der im Szenario zu Beginn des 6. Monat angenommenen wird, lag. Die Prozesse während des Winterhalbjahres (Monat 6 bis 10) müssen somit abgeschätzt werden. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Trocknung lässt ab Lagermonat 6 nach, da die Miettemperatur abnimmt und die Lufttemperatur im Winter kaum Trocknung zulässt (siehe Abschnitt 7.2). In den Varianten mit Vlies-Abdeckung (L.a.1 und L.n.1) wird angenommen, dass die Änderung im Wassergehalt im Winterhalbjahr mit einem Drittel der Geschwindigkeit der letzten 9 Wochen des Sommersversuchs fortschreitet. Die nicht abgedeckten Mieten (L.a.0 und L.n.0) sind einer nicht quantifizierbaren Wiederbefeuchtung ausgesetzt. In diesen Varianten wird der Wassergehalt zu Beginn der Heizperiode als konstant fortgeschrieben (Abbildung 45).
- Die Rate der Trockenmasseverluste geht stark zurück, da die Hackschnitzel bereits auf einen Wassergehalt von 30–35 m-% getrocknet sind und die Wärmeentwicklung stark nachgelassen hat. In den Varianten mit Vlies-Abdeckung (L.a.1 und L.n.1) wird angenommen, dass der Trockenmasseverlust im Winterhalbjahr mit der Hälfte der Abbaurate der letzten 9 Wochen des Sommersversuchs fortschreitet (Abbildung 46). Für die nicht abgedeckten Mieten (L.a.0 und L.n.0) wird die Abbaurate konstant gehalten.
- Mit Beginn der Heizperiode wird das Lager sukzessive abgebaut und die Hackschnitzel in den Bunker der Heizanlage gebracht. Bereits ausgelagertes Material wird bei den Lagerungsprozessen nicht berücksichtigt. In der zweiten Hälfte der Lagerung beläuft sich der Lagerbestand daher im Mittel auf 50 m-% der ursprünglich eingelagerten Menge.

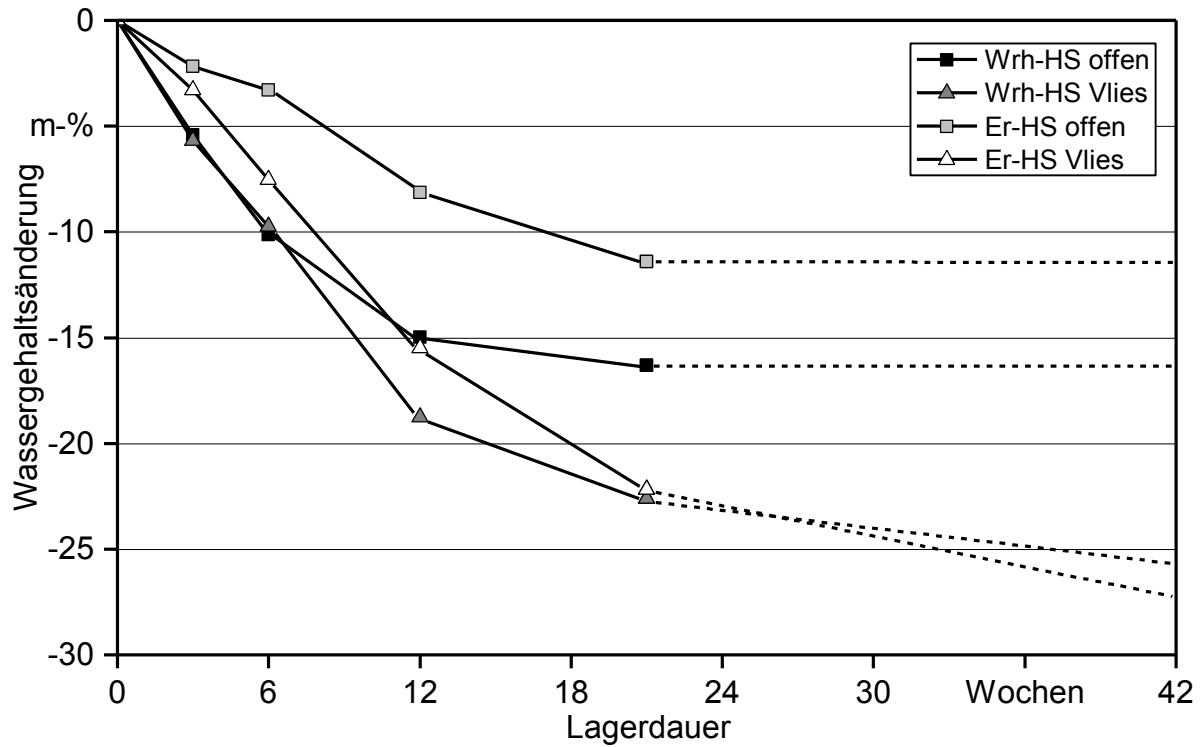


Abbildung 45: Extrapolation der Wassergehaltsverläufe der Hackschnitzelmietten für die 10-monatige Lagerung in Szenario L (Eine mögliche Wiederbefeuchtung im Herbst/ Winter ist hierbei nicht berücksichtigt.)

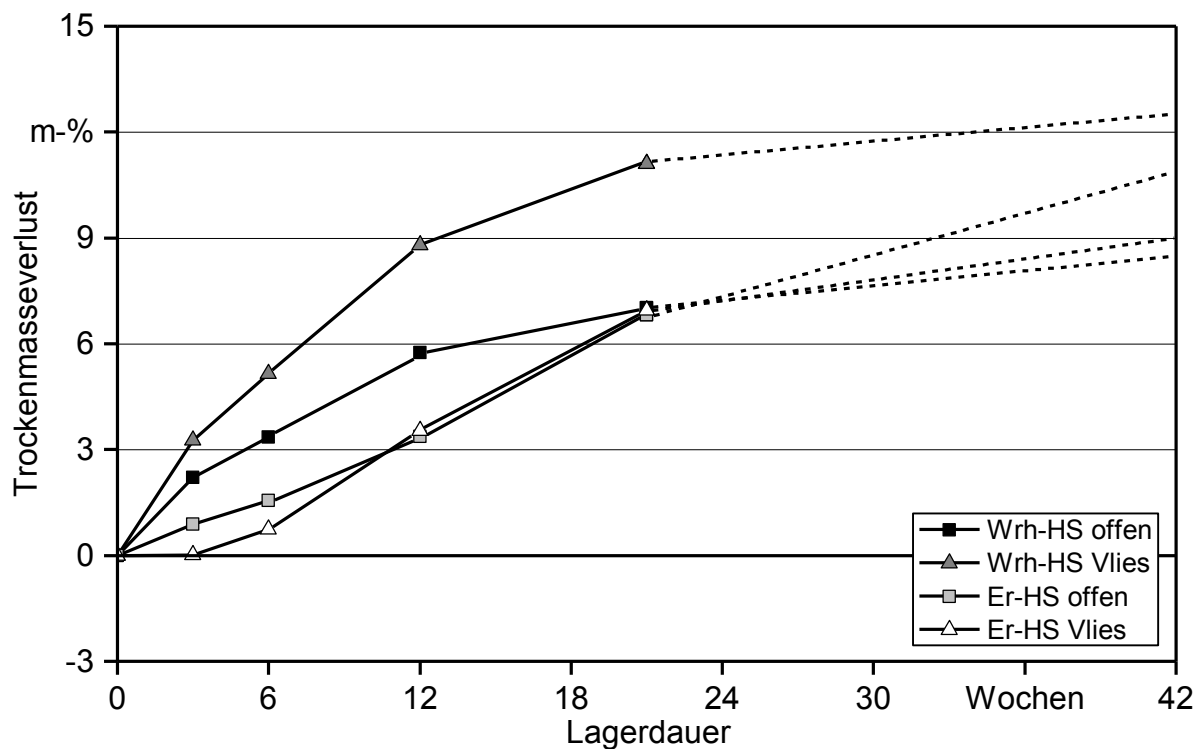


Abbildung 46: Extrapolation der Trockenmasseverlustverläufe der Hackschnitzelmietten für die 10-monatige Lagerung in Szenario L

Für die Lagerung ohne Abdeckung ist die beschriebene Fortschreibung mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet, da nicht untersucht ist, wie eine im Sommer vorgetrocknete Miete auf Wiederbefeuchtung während des Winters reagiert. Dies gilt besonders für den Wassergehalt der nicht geschützten Mieten. Eine Wiederbefeuchtung ist in den folgenden Kalkulationen nicht berücksichtigt.

### **Szenario H: Trockenmasseverluste und Wassergehaltsänderungen**

In Szenario H werden alle Varianten von Daten aus den Freilandversuchen (siehe Kapitel 7) abgedeckt:

- H.k.0 und H.k.1: Bei einer Lagerdauer von 6 Wochen finden 4 Durchgänge im Sommerhalbjahr statt. Für diese werden die Prozesse der ersten 6 Wochen des Sommersversuchs, differenziert nach Sortiment und Witterungsschutz, angenommen. Im Winterhalbjahr werden 3 Durchgänge mit den Prozessen der ersten 6 Wochen des Wintersversuchs gerechnet.
- H.m.0 und H.m.1: Bei einer Lagerdauer von 12 Wochen finden 2 Durchgänge im Sommerhalbjahr statt, für die die Prozesse der ersten 12 Wochen nach Einlagerung im Sommersversuch angenommen werden. Analog wird bei den 2 Durchgängen im Winterhalbjahr verfahren.
- H.l.0 und H.l.1: Es finden 2 Durchgänge mit einer Lagerdauer von 21 Wochen statt. Dies entspricht der Lagerdauer in den Freilandversuchen, sodass die Ergebnisse aus Sommer- und Wintersversuch direkt angewendet werden können.
- Für eine abschließende Kostenanalyse über das gesamte Jahr werden für den Trockenmasseabbau und die Wassergehaltsänderung anhand der vorgenannten Anzahl an Sommer- und Winterdurchgängen mittlere Werte berechnet, die auf die in den Varianten insgesamt eingelagerte Hackschnitzelmenge angewendet werden. Dies erlaubt eine Bewertung der über das Jahr und auf die umgesetzte Menge bezogenen Lagerungskosten. Eine generelle Aussage zum Trocknungserfolg bzw. zur Qualität der Hackschnitzel bei Auslagerung ist hieraus nicht möglich und ist auch nicht Ziel in der Kostenanalyse.

### **Erreichbare Qualität und nutzbarer Energieinhalt**

Die nach der Lagerung erreichbare Qualität wird vorrangig nach dem Wassergehalt bewertet. Hier spielt insbesondere eine Rolle, ob durch die Lagerung allein eine ausreichende Trocknung stattgefunden hat, um die Hackschnitzel ohne weitere (auch technische) Trocknung in verschiedenen Heizanlagen verwenden zu können.

Für die abschließende Bewertung der Lagerungskosten ist es zudem wichtig, die Änderungen des nutzbaren Energieinhalts zu betrachten. Diese errechnen sich aus dem tatsächlichen Heizwert ( $ar$ ) bei Auslagerung, der vornehmlich durch die Wassergehaltsänderung bestimmt wird, und den Trockenmasseverlusten (siehe Abschnitt 7.2.9). Zum Zeitpunkt der Einlagerung wurden typische Werte für den wasserfreien Heizwert ( $wf$ ) für Waldrestholz und Energierundholz aus Fichte verwendet, die im Rahmen früherer Forschungsarbeiten gewonnen wurden [61]. Für die Wrh-HS wurde bei Einlagerung ein

wasserfreier Heizwert von  $19,1 \text{ MJ kg}^{-1}$  (entspricht  $5,31 \text{ kWh kg}^{-1}$ ), für die Er-HS von  $18,9 \text{ MJ kg}^{-1}$  (entspricht  $5,25 \text{ kWh kg}^{-1}$ ) verwendet. Der wasserfreie Heizwert wurde näherungsweise unter Berücksichtigung der Verdampfungsenergie von  $2.453 \text{ kJ kg}^{-1}$  ( $0,68 \text{ kWh kg}^{-1}$ ) Wasser auf den Heizwert im Anlieferungszustand (ar) umgerechnet.

## 9.2 Ergebnisse

### 9.2.1 Szenario L: Land- und forstwirtschaftlicher Betrieb

#### 9.2.1.1 Direkt mit der Lagerung verbundene Kosten

Zu den direkt mit der Lagerung verbundenen Kosten zählen die Kosten für den Lagerplatz, die Maschinen- und Arbeitskosten und die Kosten des Schutzvlieseinsatzes.

#### Lagerplatz

In Varianten L.n.0 und L.n.1 muss der Lagerplatz zunächst neu errichtet werden. Für die professionelle Erstellung einer schwerlasttauglichen Betonpflasterung (Auskoffern, Pflasterbett anlegen, Pflasterung, Drainagen) ergeben sich Investitionskosten von  $43,68 \text{ € m}^{-2}$  [62]. Bei einer Fläche von  $120 \text{ m}^2$  entspricht dies einer Investitionssumme von rund  $5.240 \text{ €}$ . Eine mögliche Eigenleistung beim Bau des Lagerplatzes wird in diesem Szenario nicht berücksichtigt. Die jährlichen Kosten sind in Tabelle 25 aufgeschlüsselt und belaufen sich insgesamt auf rund  $316 \text{ € a}^{-1}$ .

Tabelle 25: Jährliche Kosten bei Bau eines neuen Lagerplatzes ( $120 \text{ m}^2$ ) in Variante L.n.0 und L.n.1 (Stand der Berechnung: September 2016)

Position	Einheit	Betrag
Abschreibung (linear, 19 Jahre)	$[\text{€ a}^{-1}]$	174,72
Kapitalkosten (Zinssatz 3 %)	$[\text{€ a}^{-1}]$	78,62
Unterhaltskosten (Faktor 1 %)	$[\text{€ a}^{-1}]$	52,41
Versicherungskosten (Faktor 0,2 %)	$[\text{€ a}^{-1}]$	10,48
<b>Summe</b>	<b><math>[\text{€ a}^{-1}]</math></b>	<b>316,23</b>

Für den in Varianten L.a.0 und L.a.1 bereits vorhandenen Platz werden nur die laufenden Unterhaltskosten mit  $52,41 \text{ € a}^{-1}$  und die Versicherungskosten mit  $10,48 \text{ € a}^{-1}$  angesetzt.

### Maschinen- und Arbeitskosten

Für den eingesetzten Schlepper ergeben sich nach KTBL [63] Maschinenkosten von rund 28 € MAS<sup>-1</sup> (Stand September 2016). Der Schlepper wird in Eigenleistung bedient, für den Aufbau der Miete fallen 2 Stunden an. Bei der Errichtung der 130 Srm fassenden Miete wird für 2 Stunden ein Helfer vom Maschinenring eingesetzt, dessen Stundensatz sich auf 12,50 € beläuft. Während der Heizperiode müssen regelmäßig mit dem Schlepper Hackschnitzel aus dem Lager in den Bunker der Heizanlage gebracht werden. Hierfür werden 8 Durchgänge à 0,5 Stunden angenommen.

Zusätzlich zur Eigenleistung ergeben sich die in Tabelle 26 aufgelisteten Maschinen- und Arbeitskosten. Die Gesamtkosten für den Schleppereinsatz belaufen sich auf rund 170 € je Miete.

Tabelle 26: Jährliche Kosten für Maschinen und Arbeitskräfte in Szenario L

Position		Einheit	Betrag
Schleppereinsatz	Einlagerung (2 Stunden)	[€ a <sup>-1</sup> ]	56,66
	Auslagerung (4 Stunden)	[€ a <sup>-1</sup> ]	113,66
Hilfskraft Maschinenring	Einlagerung (2 Stunden)	[€ a <sup>-1</sup> ]	25,00
<b>Summe</b>		<b>[€ a<sup>-1</sup>]</b>	<b>194,98</b>

### Kosten beim Einsatz eines Schutzvlieses

Für das Zudecken der Miete mit Vlies fällt in den Varianten L.a.1 und L.n.1 zusätzlich 1 Stunde für den Helfer vom Maschinenring an (ergibt 12,50 € je Miete). Das Auf- und Zudecken der Miete während der Heizperiode erfolgt in Eigenleistung.

Das eingesetzte Vlies kann für 1,92 € m<sup>-2</sup> beschafft werden. Die aufgeschüttete Miete hat eine Länge von 14,5 m, eine Breite von 6 m und eine Höhe von 3 m. Bei einer Breite des Vlieses auf der Rolle von 4 m und einer Überlappung der Vliesbahnen von rund 50 cm ergibt sich ein Materialbedarf von 135,8 m<sup>2</sup>, was 1,04 m<sup>2</sup> Vlies je eingelagertem Schüttraummeter Hackschnitzel entspricht. Berücksichtigt man die Nutzungsdauer von 5 Jahren, so ergeben sich Materialkosten von rund 52 € je Miete.

In Summe betragen Material- und Arbeitskosten für die Verwendung des Vlieses rund 65 € je Miete.

#### 9.2.1.2 Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel

Für das Hackholz aus dem eigenen Wald werden die Opportunitätskosten für den alternativen Verkauf im ungehackten Zustand auf 3 € Srm<sup>-1</sup> für Waldrestholz und auf 13 € Srm<sup>-1</sup> für Energierundholz angesetzt. Diese Kosten sind stark von der aktuellen und regionalen Marktlage abhängig und müssen je nachdem angepasst werden. Die Hackkosten (externe Dienstleistung) belaufen sich in Anlehnung an KUPTZ et al. [61] auf 4,64 € Srm<sup>-1</sup> für Waldrestholz und auf 3,09 € Srm<sup>-1</sup> für Energierundholz. Der Transport

zum Hof in Eigenleistung wird mit dem genannten Standardschlepper und einem zweiachsigen Anhänger durchgeführt (Kosten für den Anhänger: nach KTBL [63]  $0,74 \text{ € t}^{-1}$  (Stand September 2016). Bei einer Transportentfernung von 10 km, einer Durchschnittsgeschwindigkeit von  $25 \text{ km h}^{-1}$ , einer Ladezeit von 0,5 h je Fuhre und einer maximalen Zuladung von 11 t ergeben sich Transportkosten in Höhe von  $1,09 \text{ € Srm}^{-1}$ .

Insgesamt wird den Wrh-HS ein betriebsinterner Kostenwert von  $8,73 \text{ € Srm}^{-1}$  zugeschrieben, bei den Er-HS sind es  $17,18 \text{ € Srm}^{-1}$  (Tabelle 27).

*Tabelle 27: Herleitung des betriebsinternen Kostenwerts der Hackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung in Szenario L*

Position	Einheit	Wrh-HS	Er-HS
Opportunitätskosten Verkauf	$[\text{€ Srm}^{-1}]$	3,00	13,00
Hacken (externe Dienstleistung)	$[\text{€ Srm}^{-1}]$	4,64	3,09
Transport (Eigenleistung)	$[\text{€ Srm}^{-1}]$	1,09	1,09
<b>Summe</b>	$[\text{€ Srm}^{-1}]$ $[\text{€ t}_{\text{atro}}^{-1}]$	<b>8,73</b> <b>51,33</b>	<b>17,18</b> <b>101,05</b>

### 9.2.1.3 Lagerungsprozesse

Die Trockenmasseverluste sind je nach eingelagertem Sortiment und Witterungsschutz unterschiedlich. Bei Szenario L ergeben sich Verluste von 8,5–12,4 m-% der Trockenmasse der eingelagerten Hackschnitzel (Tabelle 28). Dies entspricht einem absoluten Verlust von  $1,9\text{--}2,7 \text{ t}_{\text{atro}}$ .

Kombiniert mit den in Tabelle 27 aufgezeigten Werten ergeben sich Kosten für den Trockenmasseabbau in Höhe von rund  $96\text{--}242 \text{ € a}^{-1}$ . Die Beträge müssen auf den Kostenwert der Hackschnitzel aufgeschlagen werden. Diese Umlage beläuft sich auf  $4,76\text{--}12,29 \text{ € t}_{\text{atro}}^{-1}$ . Dadurch steigt der innerbetriebliche Kostenwert der ausgelagerten Hackschnitzel bezogen auf die Trockenmasse um 9,3–14,2 %.

Die Änderungen des nutzbaren Energieinhalts sind ebenfalls in Tabelle 28 dargestellt. Der Heizwert bezogen auf die Frischmasse steigt durch den Trocknungseffekt zwischen Ein- und Auslagerung, gleichzeitig nimmt die Frischmasse der Lagermiete jedoch ab. Bei Auslagerung hat sich der nutzbare Energieinhalt zwischen -5,6 und +1,8 % verändert. Eine Abnahme entsteht bei der Lagerung ohne Vlies (L.a.0 und L.n.0) aufgrund der relativ geringen Trocknung und bei Wrh-HS unter Vlies aufgrund des vergleichsweise hohen Trockenmasseabbaus. Umgelegt auf die Energiemenge bei Auslagerung stellt dies eine Belastung von  $0,12\text{--}1,26 \text{ € MWh}^{-1}$  dar. Im günstigsten Fall (Varianten L.a.1 und L.n.1, Er-HS) sinken die Energiekosten um  $0,40 \text{ € MWh}^{-1}$ .



Tabelle 28: Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für Szenario L

Position	Einheit	L.a.0 und L.n.0 (ohne Vlies)		L.a.1 und L.n.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Trockenmasseabbau	[m-%]	8,5	10,8	12,4	8,9
	$[\text{t}_{\text{atro}} \text{a}^{-1}]$	1,9	2,4	2,7	2,0
Kostenwert abgebaute Trockenmasse	$[\text{€ a}^{-1}]$	96,22	242,29	141,08	199,62
<b>Umlage auf HS-Menge am Ende der Lagerung</b>	<b><math>[\text{€ t}_{\text{atro}}^{-1}]</math></b>	<b>4,76</b>	<b>12,29</b>	<b>7,29</b>	<b>9,92</b>
Mittlerer Wassergehalt bei Auslagerung	[m-%]	36,4	41,3	27,1	25,3
Änderung nutzbarer Energieinhalt	[%]	-1,0	-5,6	-2,8	1,8
	$[\text{MWh a}^{-1}]$	-1,04	-5,24	-2,7	1,78
Kostenwert Energieänderung	$[\text{€ a}^{-1}]$	-11,71	-118,03	-30,45	40,07
<b>Umlage auf nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung</b>	<b><math>[\text{€ MWh}^{-1}]</math></b>	<b>0,12</b>	<b>1,26</b>	<b>0,31</b>	<b>-0,4</b>

#### 9.2.1.4 Kostenübersicht Szenario L und Bewertung

Die durch die Lagerung zusätzlich zum Kostenwert der Hackschnitzel verursachten Kosten unterscheiden sich je nach Variante stark. In der Gesamtschau ergeben sich für Szenario L die in Tabelle 29 aufgeführten Kosten. Sie sind auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bezogen, die/der in der jeweiligen Variante am Ende der 10-monatigen Lagerung (unter Berücksichtigung der regelmäßigen Auslagerung von Teilmengen ab Beginn der Heizperiode) zur Verfügung steht.

**Tabelle 29:** Übersicht über die Lagerungskosten für Szenario L. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.

Position		L.a.0 (ohne Vlies)		L.a.1 (unter Vlies)		L.n.0 (ohne Vlies)		L.n.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
		Lagerplatz	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	3,11	3,19	3,25	3,12	15,63	16,04
Maschinen	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	8,40	8,62	8,78	8,44	8,40	8,62	8,78	8,44
Hilfskräfte	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	1,24	1,27	1,29	1,24	1,24	1,27	1,29	1,24
Vlies	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]			3,33	3,20			3,33	3,20
<b>Zwischensumme</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>12,74</b>	<b>13,08</b>	<b>16,65</b>	<b>16,01</b>	<b>25,27</b>	<b>25,94</b>	<b>29,74</b>	<b>28,60</b>
<b>direkte Lagerungskosten</b>	<b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>2,59</b>	<b>2,74</b>	<b>3,30</b>	<b>3,19</b>	<b>5,14</b>	<b>5,44</b>	<b>5,89</b>	<b>5,70</b>
Umlage TM-Verluste	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	4,76	12,29	7,29	9,92	4,76	12,29	7,29	9,92
Umlage Änderung nutzbarer Energieinhalt	[€ MWh <sup>-1</sup> ]	0,12	1,26	0,31	-0,40	0,12	1,26	0,31	-0,40
<b>Summe</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>17,50</b>	<b>25,38</b>	<b>23,94</b>	<b>25,93</b>	<b>30,02</b>	<b>38,23</b>	<b>37,03</b>	<b>38,51</b>
	<b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>2,71</b>	<b>4,00</b>	<b>3,61</b>	<b>2,79</b>	<b>5,26</b>	<b>6,69</b>	<b>6,20</b>	<b>5,30</b>

Durch die Lagerung entstehen also in allen Varianten Kosten in relevanter Höhe. Folgende Beobachtungen können hervorgehoben werden:

- Die relativen Lagerungskosten fallen bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt in allen Varianten deutlich geringer aus als bei Bezug auf die Trockenmasse. Darin spiegelt sich der unterstellte Trocknungseffekt wider. Wie eingangs erwähnt, ist dies v. a. in Szenario L mit Unsicherheiten behaftet, da gerade bei der langfristigen, offenen Lagerung das Risiko einer Wiederbefeuchtung im Herbst/Winter gegeben ist.
- Bei den Wrh-HS (betriebsinterner Kostenwert bei Einlagerung: 51,33 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>) beläuft sich die relative Kostensteigerung bezogen auf die Trockenmasse auf 34,1 % des Kostenwerts bei Einlagerung (L.a.0: Platz vorhanden, offene Lagerung) bis 72,1 % (L.n.1: Neubau, Lagerung unter Vlies). Bei Er-HS (betriebsinterner Kostenwert bei Einlagerung: 102,14 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>) sind es 25,1 % (L.a.0: Platz vorhanden, offene Lagerung) bis 38,1 % (L.n.1: Neubau, Lagerung unter Vlies).
- Den größten Anteil an den Lagerungskosten hat in den Varianten L.n.0 und L.n.1 der notwendige Neubau des Lagerplatzes. Bei Nutzung eines vorhandenen Lagerplatzes (Varianten L.a.0 und L.a.1) beträgt die maximale relative Kostensteigerung bezogen auf die Trockenmasse 46,6 % des angesetzten Hackschnitzelwerts (L.a.1, Wrh-HS).
- Betrachtet man die direkten Lagerungskosten bezogen auf die Trockenmasse der ausgelagerten Hackschnitzel, zeigen sich innerhalb der Varianten jeweils für beide Sortimente ähnliche absolute Größenordnungen. Relativ zum angesetzten innerbe-

trieblichen Kostenwert der Hackschnitzel fallen diese Kosten bei den Wrh-HS jedoch deutlich stärker ins Gewicht als bei den Er-HS, da diesen ein geringerer Kostenwert zum Zeitpunkt der Einlagerung zugeordnet wird.

- Bei den Wrh-HS fallen die Lagerungskosten bei Einsatz eines Vlieses höher aus als bei der offenen Lagerung, auch mit Bezug zum nutzbaren Energieinhalt. Das liegt vorrangig an den höheren Abbauraten bei der Lagerung dieses Sortimentes unter Vlies im Sommerhalbjahr (vgl. Abschnitt 7.2.5).
- Die Abdeckung mit Vlies zeigt sich bei den Er-HS als ökonomisch sinnvoll. Zwar steigen auch hier die direkten Kosten, durch die stärkere Trocknung bei vergleichbarem Trockenmasseabbau kehrt sich die Umlage bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt jedoch ins Positive: Anstelle einer Kostenbelastung von  $1,26 \text{ € MWh}^{-1}$  entsteht eine Vergünstigung von  $0,40 \text{ € MWh}^{-1}$ .
- Der Zielwassergehalt von max. 35 % kann in den gezeigten Varianten mit Vlies-Abdeckung (Varianten L.a.1 und L.n.1) erreicht werden. Die Lagerungskosten müssen also auch im Vergleich zu einer alternativen technischen Trocknung bewertet werden. Der bei Auslagerung erreichbare Wassergehalt ist jedoch durch das Risiko der Wiederbefeuchtung mit Unsicherheiten behaftet. Eine grundsätzliche Empfehlung für Eigenversorger kann hieraus nicht abgeleitet werden.

## 9.2.2 Szenario H: Biomasse-Händler

### 9.2.2.1 Direkt mit der Lagerung verbundene Kosten

#### Lagerplatz

In allen Varianten von Szenario H wird davon ausgegangen, dass der Lagerplatz speziell für die Lagerung von Hackschnitzeln errichtet wird und nicht bereits im Betrieb vorhanden war. Als Belag bietet sich Asphalt oder eine Betonplatte an. Für Szenario H werden Baukosten für eine Betonplatte in Anhalt an KTBL [62] in Höhe von  $40,00 \text{ € m}^{-2}$  angesetzt (Stand September 2016). Bei einer Lagerfläche von  $4.200 \text{ m}^2$  ergibt sich eine Investitionssumme von  $168.000 \text{ €}$ . Die jährlichen Kosten sind in Tabelle 30 aufgeschlüsselt und belaufen sich insgesamt auf rund  $10.140 \text{ €}$ . Je nach Variante (und den unterschiedlichen Lagerdauern) fallen diese Kosten bezogen auf die jährlich umgesetzte Hackschnitzelmenge unterschiedlich stark ins Gewicht.

Tabelle 30: Jährliche Kosten bei Bau eines Lagerplatzes in Szenario H

Position	Einheit	Betrag
Abschreibung (linear, 19 Jahre)	[€ a <sup>-1</sup> ]	5.600
Kapitalkosten (Zinssatz 3 %)	[€ a <sup>-1</sup> ]	2.520
Unterhaltskosten (Faktor 1 %)	[€ a <sup>-1</sup> ]	1.680
Versicherungskosten (Faktor 0,2 %)	[€ a <sup>-1</sup> ]	336
<b>Summe</b>	<b>[€ a<sup>-1</sup>]</b>	<b>10.136</b>

### Maschinen- und Arbeitskosten

Für die angestellten Arbeitskräfte wurden ein Stundensatz von 15,00 € h<sup>-1</sup> und ein zusätzlicher Faktor für Lohnnebenkosten von 100 % angenommen. Die Maschinenkosten für den betriebseigenen Radlader inkl. Fahrer belaufen sich auf 57,17 € MAS<sup>-1</sup>, wobei davon ausgegangen wird, dass die Maschine in allen Varianten in gleichem Umfang ausgelastet wird (auch durch weitere, im Betrieb anfallende Arbeiten). Beim Errichten der Mieten werden die Hackschnitzel idealerweise bereits vom Lkw an der richtigen Stelle abgekippt. Der Radlader schiebt die Hackschnitzel dann zur endgültigen Mietenform auf. Hierfür wurden pauschal 3 MAS je Miete angesetzt. Beim Abbau der Mieten müssen die Hackschnitzel auf bereitstehende Lkw geladen werden. Bei einer Schaufelfüllmenge von 3,5 Srm wurde angenommen, dass je MAS rund 210 Srm bewegt werden können. Daraus ergibt sich ein Zeitbedarf für den Abbau von rund 4,4 MAS je Miete. Insgesamt entstehen Radladerkosten von 422,53 € je Miete. Die jährlich je nach Anzahl der Mieten in den Varianten anfallenden Kosten sind in Tabelle 31 aufgestellt.

Im Vergleich zur Direktlieferung vom Hackort zum Kunden fällt bei der Lagerung eine zusätzliche Fahrt an. Für diese wurde eine mittlere Distanz von 35 km angenommen. Für den Lkw-Transport wurden Kosten von 1,60 € km<sup>-1</sup> angesetzt. Es ergibt sich eine Kostenbelastung von 56 € je Fuhre. Basierend auf dem mittleren Auslagerungswassergehalt wurde die mögliche Zuladung je Fuhre in den Varianten ermittelt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 31 aufgeführten jährlichen, durch die Lagerung zusätzlich verursachten Lkw-Kosten, die je nach Auslagerungswassergehalt und damit nach der notwendigen Anzahl an Fuhren variieren. Angegeben sind aus Gründen der Übersichtlichkeit jeweils die Wertebereiche.

Tabelle 31: Jährliche Maschinenkosten in Szenario H

Position		Einheit	H.k.0 und H.k.1	H.m.0 und H.m.1	H.I.0 und H.I.1
Radlader	Einlagerung (3 MAS je Miete)	[€ a <sup>-1</sup> ]	7.203,42	4.116,24	2.058,12
	Auslagerung (4,4 MAS je Miete)	[€ a <sup>-1</sup> ]	16.807,98	9.604,56	4.802,28
Lkw	Auslieferung (35 km je Fuhre)	[€ a <sup>-1</sup> ]	32.613,82	16.438,21	7.628,08
			bis 39.199,65	bis 21.495,48	bis 10.089,02
<b>Summe</b>		<b>[€ a<sup>-1</sup>]</b>	<b>56.625,22</b> <b>bis 63.211,05</b>	<b>30.159,01</b> <b>bis 35.216,28</b>	<b>14.488,48</b> <b>bis 16.949,42</b>

### Kosten beim Einsatz eines Schutzvlieses

Das in den Varianten H.k.1, H.m.1 und H.I.1 eingesetzte Vlies wird in größeren Mengen beschafft als in Szenario L. Die Anschaffungskosten wurden mit 1,72 € m<sup>-2</sup> angenommen (Ansatz: pauschaler Mengenrabatt von 10 %). Bei einer Breite des Vlieses auf der Rolle von 6 m ergibt sich ein Materialbedarf von 746,7 m<sup>2</sup> je Miete, was 0,78 m<sup>2</sup> Vlies je eingelagertem Schüttraummeter Hackschnitzel entspricht.

Für das Zu- und Aufdecken der Mieten werden zwei angestellte Arbeitskräfte eingesetzt. Je Arbeitskraft wurden 3 h für das Zu- und Aufdecken (inkl. eines Puffers für die weitere mit dem Vlies verbundene Arbeit, wie Reinigung, Zusammenlegen), d. h. 6 Arbeitsstunden je Miete angesetzt. Die resultierenden, jährlichen Kosten für die Varianten sind in Tabelle 32 dargestellt. Hier ist auch die unterschiedliche Haltbarkeit des Vlieses je nach Nutzungsintensität berücksichtigt (vgl. Abschnitt 9.1.1.2).

Tabelle 32: Zusätzliche Kosten beim Einsatz eines Schutzvlieses in Szenario H

Position		H.k.1	H.m.1	H.I.1
Haltbarkeit Vlies	[Durchgänge]	21	16	10
Materialkosten	[€ je Miete]	61,31	80,47	128,76
Arbeitsaufwand	[€ je Miete]	180,00	180,00	180,00
<b>Summe</b>	<b>[€ je Miete]</b>	<b>241,31</b>	<b>260,47</b>	<b>308,76</b>
	<b>[€ a<sup>-1</sup>]</b>	<b>10.135,10</b>	<b>6.251,33</b>	<b>3.705,06</b>

### 9.2.2.2 Kostenwert der eingelagerten Hackschnitzel

Die Einkaufskosten für das Hackholz (ungehackt, frei Waldstraße) wurden mit 3 € Srm<sup>-1</sup> für Waldrestholz und mit 13 € Srm<sup>-1</sup> für Energierundholz angesetzt. Aus KUPTZ et al. [61] wurden Maschinenkosten für das Hacken in Höhe von 3,90 € Srm<sup>-1</sup> für Waldrestholz und 2,60 € Srm<sup>-1</sup> für Energierundholz angesetzt. Bei den Transportkosten wurde, mit Kosten

von 1,60 € km<sup>-1</sup> bei einer mittleren Fahrtstrecke von 35 km und unter Annahme von 2 kompletten Lieferzyklen pro Tag, eine Fahrtstrecke pro Zyklus von 87,5 km errechnet (entspricht 140 € je Zyklus). Bei einem Wassergehalt in waldfischem Zustand von 52,7 m-% und einer Schüttdichte von 0,17 t<sub>atro</sub> Srm<sup>-1</sup> ergeben sich Transportkosten von 14,90 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup> (mittlere maximale Zuladung Container-Lkw-Zug nach KUPTZ et al. [61]: 19,9 t je Fuhre).

Insgesamt belaufen sich die Kosten für die Hackschnitzel bei Erreichen des Betriebshofes auf 9,43 € Srm<sup>-1</sup> (Wrh-HS) bzw. 18,13 € Srm<sup>-1</sup> (Er-HS) (Tabelle 33).

*Tabelle 33: Herleitung der Kosten der Hackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung in Szenario H*

<b>Position</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wrh-HS</b>	<b>Er-HS</b>
Einkauf Hackholz	[€ Srm <sup>-1</sup> ]	3,00	13,00
Hacken im Betrieb	[€ Srm <sup>-1</sup> ]	3,90	2,60
Transport	[€ Srm <sup>-1</sup> ]	2,53	2,53
<b>Summe</b>	<b>[€ Srm<sup>-1</sup>]</b>	<b>9,43</b>	<b>18,13</b>
	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>55,49</b>	<b>106,67</b>

### 9.2.2.3 Lagerungsprozesse

In Szenario H betragen die Trockenmasseverluste je nach Lagerdauer im Mittel 0,6–9,5 m-% (Varianten H.k.0 und H.k.1 mit kurzer Lagerdauer: Tabelle 34; Varianten H.m.0 und H.m.1 mit mittlerer Lagerdauer: Tabelle 35; Varianten H.l.0 und H.l.1 mit langer Lagerdauer: Tabelle 36). Dies entspricht einem absoluten Verlust von 41,9–309,5 t<sub>atro</sub> a<sup>-1</sup>.

Kombiniert mit den in Tabelle 33 aufgezeigten Werten ergeben sich Kosten für den Trockenmasseabbau in Höhe von rund 4.470–17.170 € a<sup>-1</sup>. Die Umlage auf den Wert der Hackschnitzel beläuft sich auf 0,66–6,27 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>. Dies entspricht einem Zuschlag von 0,6–10,6 % auf den Kostenwert der Hackschnitzel bei Einlagerung. Die geringste Umlage entsteht bei den kurz und unter Vlies gelagerten Er-HS in Variante H.k.1, die höchste Belastung entsteht bei den langfristig gelagerten Wrh-HS unter Vlies in Variante H.l.1.

Tabelle 34: Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.k.0 und H.k.1 (kurze Lagerdauer) in Szenario H

Position	Einheit	H.k.0 (ohne Vlies)		H.k.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Trockenmasseabbau	[m-%] [t <sub>atro</sub> a <sup>-1</sup> ]	4,0 270,8	0,7 49,9	4,5 309,5	0,6 41,9
Wert abgebaute TM	[€ a <sup>-1</sup> ]	15.028,07	5.325,12	17.174,70	4.472,91
<b>Umlage auf HS-Menge am Ende der Lagerung</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>2,28</b>	<b>0,78</b>	<b>2,62</b>	<b>0,66</b>
Mittlerer Wassergehalt bei Auslagerung	[m-%]	44,5	51,1	43,4	48,1
Änderung nutzbarer Energieinhalt	[%] [MWh a <sup>-1</sup> ]	0,6 182,0	0,3 106,0	0,5 141,4	2,2 685,4
Wert Energieänderung	[€ a <sup>-1</sup> ]	2.221,42	2.518,07	1.726,40	16.283,75
<b>Umlage auf nutzbare Energiemenge bei Auslagerung</b>	<b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,08</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,52</b>

Tabelle 35: Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.m.0 und H.m.1 (mittlere Lagerdauer) in Szenario H

Position	Einheit	H.m.0 (ohne Vlies)		H.m.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Trockenmasseabbau	[m-%] [t <sub>atro</sub> a <sup>-1</sup> ]	7,0 274,8	2,2 87,5	7,8 304,4	2,8 111,2
Wert abgebaute TM	[€ a <sup>-1</sup> ]	15.248,60	9.338,82	16.892,96	11.859,83
<b>Umlage auf HS-Menge am Ende der Lagerung</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>4,19</b>	<b>2,44</b>	<b>4,68</b>	<b>3,12</b>
Mittlerer Wassergehalt bei Auslagerung	[m-%]	44,1	49,8	38,1	44,9
Änderung nutzbarer Energieinhalt	[%] [MWh a <sup>-1</sup> ]	-2,5 -439,1	-0,4 -70,9	-0,9 -151,4	1,6 281,4
Wert Energieänderung	[€ a <sup>-1</sup> ]	-5.360,77	-1.683,93	-1.848,73	6.684,79
<b>Umlage auf nutzbare Energiemenge bei Auslagerung</b>	<b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>0,31</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>-0,37</b>

*Tabelle 36: Verluste an Trockenmasse (TM), Wassergehalt bei Auslagerung sowie Änderung des nutzbaren Energieinhalts für die Varianten H.I.0 und H.I.1 (lange Lagerdauer) in Szenario H*

Position	Einheit	H.I.0 (ohne Vlies)		H.I.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Trockenmasseabbau	[m-%]	7,4	5,1	9,5	5,6
	[t <sub>atro</sub> a <sup>-1</sup> ]	145,1	100,3	187,0	108,8
Wert abgebaute TM	[€ a <sup>-1</sup> ]	8053,12	10696,56	10376,03	11604,28
<b>Umlage auf HS-Menge am Ende der Lagerung</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b>	<b>4,44</b>	<b>5,76</b>	<b>5,86</b>	<b>6,27</b>
Mittlerer Wassergehalt bei Auslagerung	[m-%]	45,4	48,1	34,6	40,4
Änderung nutzbarer Energieinhalt	[%]	-3,6	-2,5	-1,6	0,7
	[MWh a <sup>-1</sup> ]	-307,8	-211,3	-141,0	61,3
Wert Energieänderung	[€ a <sup>-1</sup> ]	-3.757,07	-5.020,39	-1.721,33	1.455,57
<b>Umlage auf nutzbare Energiemenge bei Auslagerung</b>	<b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>0,44</b>	<b>0,58</b>	<b>0,20</b>	<b>-0,16</b>

Die stärkste mittlere Trocknung je Durchgang ergibt sich bei Wrh-HS unter Vlies (18,2 Prozentpunkte in 21 Wochen). Sie steigt mit der zunehmenden Lagerdauer in den Varianten. Der nutzbare Energieinhalt bei Auslagerung hat sich gegenüber der Einlagerung um -3,6–2,2 % geändert.

Die Änderung bei den Energiekosten fällt bei allen Varianten und Sortimenten relativ gering aus. Diese Umlage ist in den Varianten mit kurzer Lagerdauer (H.k.0 und H.k.1) immer negativ, d. h., sie führt zu einer Vergünstigung der Energiekosten. Bei der mittleren und langen Lagerdauer ist dies nur für Er-HS unter Vlies der Fall (H.m.1 und H.I.1). Die höchste Belastung entsteht mit 0,58 € MWh<sup>-1</sup> bei der langfristigen Lagerung von Er-HS ohne Vlies (Variante H.I.0).

#### 9.2.2.4 Kostenübersicht Szenario H und Bewertung

In der Gesamtschau für Szenario H ergeben sich die in Tabelle 37 (kurze Lagerdauer), Tabelle 38 (mittlere Lagerdauer) und Tabelle 39 (lange Lagerdauer) aufgeführten Kosten. Die Werte in der Tabelle sind auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bezogen, die/der in der jeweiligen Variante am Ende der Lagerung zur Verfügung steht.



Tabelle 37: Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.k.0 und H.k.1 (kurze Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.

Position	Einheit	H.k.0 (ohne Vlies)		H.k.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Lagerplatz	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	1,54	1,49	1,55	1,49
Radlader	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	3,65	3,53	3,67	3,52
Lkw	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	5,07	5,76	4,98	5,43
Vlies	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]			1,55	1,49
<b>Zwischensumme direkte Lagerungskosten</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b> <b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>10,26</b> <b>2,16</b>	<b>10,78</b> <b>2,38</b>	<b>11,75</b> <b>2,46</b>	<b>11,93</b> <b>2,58</b>
Umlage TM-Verluste	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	2,28	0,78	2,62	0,66
Umlage Änderung nutzbarer Energieinhalt	[€ MWh <sup>-1</sup> ]	-0,07	-0,08	-0,06	-0,52
<b>Summe</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b> <b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>12,54</b> <b>2,08</b>	<b>11,56</b> <b>2,29</b>	<b>14,37</b> <b>2,40</b>	<b>12,59</b> <b>2,07</b>

Tabelle 38: Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.m.0 und H.m.1 (mittlere Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.

Position	Einheit	H.m.0 (ohne Vlies)		H.m.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Lagerplatz	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	2,78	2,65	2,81	2,66
Radlader	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	3,77	3,58	3,80	3,61
Lkw	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	5,04	5,61	4,55	5,11
Vlies	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]			1,73	1,64
<b>Zwischensumme direkte Lagerungskosten</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b> <b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>11,59</b> <b>2,43</b>	<b>11,84</b> <b>2,59</b>	<b>12,89</b> <b>2,64</b>	<b>13,02</b> <b>2,77</b>
Umlage TM-Verluste	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	4,19	2,44	4,68	3,12
Umlage Änderung nutzbarer Energieinhalt	[€ MWh <sup>-1</sup> ]	0,31	0,10	0,10	-0,37
<b>Summe</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>]</b> <b>[€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>15,78</b> <b>2,74</b>	<b>14,28</b> <b>2,69</b>	<b>17,56</b> <b>2,74</b>	<b>16,14</b> <b>2,40</b>

**Tabelle 39:** Übersicht über die Lagerungskosten für die Varianten H.I.0 und H.I.1 (lange Lagerdauer) in Szenario H. Alle Kosten sind bezogen auf die Hackschnitzeltrockenmasse bzw. den nutzbaren Energieinhalt bei Auslagerung.

Position	Einheit	H.I.0 (ohne Vlies)		H.I.1 (unter Vlies)	
		Wrh-HS	Er-HS	Wrh-HS	Er-HS
Lagerplatz	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	5,59	5,45	5,72	5,48
Radlader	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	3,78	3,69	3,87	3,71
Lkw	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	5,16	5,43	4,31	4,73
Vlies	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]			2,09	2,00
<b>Zwischensumme direkte Lagerungskosten</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>] [€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>14,53</b>	<b>14,58</b>	<b>15,99</b>	<b>15,92</b>
		<b>3,07</b>	<b>3,16</b>	<b>3,23</b>	<b>3,33</b>
Umlage TM-Verluste	[€ t <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]	4,44	5,76	5,86	6,27
Umlage Änderung nutzbarer Energieinhalt	[€ MWh <sup>-1</sup> ]	0,44	0,58	0,20	-0,16
<b>Summe</b>	<b>[€ t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>] [€ MWh<sup>-1</sup>]</b>	<b>18,97</b>	<b>20,33</b>	<b>21,85</b>	<b>22,20</b>
		<b>3,50</b>	<b>3,74</b>	<b>3,43</b>	<b>3,16</b>

Auch in Szenario H entstehen Lagerungskosten in relevanter und je nach Variante und Sortiment schwankender Höhe. Folgende Beobachtungen lassen sich hervorheben:

- Der jährliche Durchsatz steigt in den beschriebenen Varianten mit sinkender Lagerdauer, da dann mehr Durchgänge pro Jahr möglich sind. Dadurch sinkt die Belastung der Hackschnitzel mit direkten Kosten. Das gilt auch für das Vlies. Auch die Umlagen für Trockenmasseverluste und für die Änderung des nutzbaren Energieinhalts steigen mit zunehmender Lagerdauer und dem fortschreitenden Abbau. Bei der kurzen Lagerung tritt aber auch nur ein geringerer Trocknungseffekt ein.
- Bei den Wrh-HS (Kosten der Hackschnitzel bei Einlagerung: 55,49 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>) beträgt die relative Kostensteigerung bezogen auf die Trockenmasse 22,6 % (H.k.0: kurze Lagerung, offen) bis 39,4 % (H.I.1: lange Lagerung, unter Vlies). Bei den Er-HS (Kosten der Hackschnitzel bei Einlagerung: 106,67 € t<sub>atro</sub><sup>-1</sup>) sind es 10,8 % (H.k.0: kurze Lagerung, ohne Vlies) bis 20,8 % (H.I.1: lange Lagerung, unter Vlies).
- Die relative Kostenbelastung bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt fällt deutlich geringer aus als mit Bezug auf die Trockenmasse, wobei der Unterschied mit zunehmender Lagerdauer (und damit zunehmender Trocknung) ansteigt. Im günstigsten Fall betragen die Lagerungskosten 8,7 % des Kostenwerts bei Einlagerung (Er-HS in H.k.1: kurze Lagerung, unter Vlies), die stärkste relative Belastung beläuft sich auf 28,7 % (Wrh-HS in H.I.0: lange Lagerung, ohne Vlies).
- Innerhalb der Varianten sind die direkten Kosten auf vergleichbarem Niveau, unabhängig vom Sortiment und der Verwendung eines Vlieses. Die Kosten für das Vlies

scheinen in der Summe der direkten Kosten nicht auf. Dies hat zwei Gründe: Erstens sind die absoluten Kosten für das Vlies gering. Zweitens wird eine stärkere Trocknung bei der Lagerung unter Vlies erwartet, die wiederum zu geringeren Transportkosten nach Auslagerung führt. Je Lkw-Fuhre kann in den Varianten H.k.1, H.m.1 und H.l.1 mehr Trockenmasse zum Kunden transportiert werden.

### 9.3 Zusammenfassung

Um die mit der Freilandlagerung von Waldhackschnitzeln verbundenen Kosten zu analysieren, wurden zwei beispielhafte Szenarien aufgestellt. In Szenario L werden in einem land- und forstwirtschaftlichen Betrieb Hackschnitzel im Rahmen der Eigenversorgung über eine mittlere Dauer von 10 Monaten gelagert. Szenario H beschreibt einen Biomasse-Händler, für den Varianten mit unterschiedlicher Lagerdauer (6, 12 und 21 Wochen) und damit unterschiedlichem Jahresdurchsatz aufgestellt wurden. Vergleiche zwischen den Szenarien müssen neben den Lagerungskosten auch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Motive berücksichtigen. Durch den aufgezeigten Rechenweg ist es möglich, bei abweichenden Bedingungen die in einem Praxisfall zu erwartenden Lagerungskosten zu berechnen.

Trockenmasseabbau, Trocknungseffekte und Änderungen im nutzbaren Energieinhalt wurden auf Basis der Freilandversuche (siehe Kapitel 7) festgelegt. Durch die geringe Anzahl an untersuchten Fällen mussten an vielen Stellen Annahmen getroffen werden. Auch kann in dieser Analyse nicht abgeschätzt werden, wie sich die Lagerungskosten bei anderen Witterungsverläufen entwickelt hätten. Die Eingangsgrößen für die direkten Lagerungskosten, also Investitionen für den Lagerplatz und weitere Betriebsmittel, für Arbeitskräfte und eingesetzte Maschinen, haben einen starken Einfluss auf die resultierenden Lagerungskosten. Nicht zuletzt fallen die Kosten des Trockenmasseabbaus sehr unterschiedlich aus, je nachdem welchen Kostenwert man den Hackschnitzeln bei Einlagerung zuordnet.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Kostenanalyse sind im Folgenden zusammengefasst:

- Durch die Lagerung entstehen immer Kosten in relevanter Höhe. Diese fallen je nach Variante sehr unterschiedlich aus. Wrh-HS zeigen in allen Varianten eine höhere relative Kostenbelastung durch die Lagerung als Er-HS. Das liegt vorrangig an den angesetzten stark unterschiedlichen Kostenwerten der eingelagerten Hackschnitzel. Absolut betrachtet liegen die direkten Kosten innerhalb der Varianten für jeweils beide Sortimente in vergleichbarer Größenordnung.
- Die absoluten Gesamtkosten der Lagerung steigen mit der Lagerdauer. Das liegt zum einen daran, dass bei kürzerer Lagerdauer die direkten Kosten auf eine größere jährlich eingelagerte Hackschnitzelmenge umgelegt werden, und zum anderen an den mit der Lagerdauer steigenden Trockenmasseverlusten.

- In Szenario L entsteht der größte Anteil der Lagerungskosten, falls ein Lagerplatz speziell errichtet werden muss und nicht bereits an der Hofstelle vorhanden ist.
- In Szenario H zeigt sich deutlich, dass die direkten Kosten bezogen auf die ausgelagerte Trockenmasse mit zunehmendem Jahresdurchsatz stark sinken. Durch die damit verbundene kürzere Lagerdauer sinkt ebenfalls die Umlage für den Trockenmasseverlust. Allerdings wird bei kurzer Lagerdauer auch nur ein geringer Trocknungseffekt erzielt.
- Die mit der Lagerdauer steigende Umlage für den Trockenmasseverlust wird teilweise durch die fortschreitende Trocknung kompensiert, sodass die relativen Lagerungskosten bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt in allen Fällen niedriger liegen als mit Bezug auf die Trockenmasse. Der Effekt steigt mit zunehmender Lagerdauer an. Die direkten Lagerungskosten werden auch in den günstigsten Fällen nicht durch einen höheren nutzbaren Energieinhalt kompensiert.
- Bei Verwendung eines Vlieses fallen direkt Kosten an, die allerdings in unterschiedlichem Umfang durch eine stärkere Trocknung kompensiert werden können. Bei der mittleren und langen Lagerdauer in Szenario H sind die Gesamtkosten bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt bei der Lagerung unter Vlies geringer als bei der offenen Lagerung.

Die durch die Lagerung verursachten Kosten müssen auf die Kosten des am Ende der Lagerung bereitstehenden Produkts aufgeschlagen werden. Im Falle der Eigenversorgung sind sie als zusätzliche Kosten des betriebsintern bereitgestellten Brennstoffs zu sehen. Im Hackschnitzelhandel sind durch die Qualitätsänderungen während der Lagerung und ggf. durch die mögliche kontinuierliche Bereitstellung auch andere Verkaufspreise als bei waldfrischen Hackschnitzeln zu erwarten. Idealerweise findet eine Trocknung statt, die am Markt durch höhere Preise honoriert wird. Dieser mögliche Mehrerlös ist jedoch schwer zu beziffern und muss letztendlich unter Berücksichtigung der regionalen Absatzmöglichkeiten bewertet werden.

## 10 Gesamtzusammenfassung

In Bayern werden jährlich fast fünf Millionen Schüttraummeter Waldhackschnitzel produziert. Der Brennstoffanfall ist jedoch zeitlich oft vom Verbrauch entkoppelt. Daher kommt der Lagerung von Hackschnitzeln eine wichtige Rolle zu. Allerdings kann es bei der Lagerung von frischen Waldhackschnitzeln durch den Abbau organischer Substanz durch Mikroorganismen (v. a. Pilze und Bakterien) zu einem Massen- und Qualitätsverlust kommen. Dies kann für Brennstoffproduzenten, -händler und -verwerter ein großes wirtschaftliches Risiko bedeuten.

Zur Bewertung derartiger Effekte wurde das Forschungsprojekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzellagerung“ vom Technologie- und Förderzentrum (TFZ) sowie von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) über einen Zeitraum von 2,5 Jahren durchgeführt. Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung umfangreicher Verfahrensdaten zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln. Dabei sollten neben den Trockenmasseverlusten insbesondere die verschiedenen Wirkungen der Lagerung auf die Hackschnitzelqualität bestimmt werden.

**Lagerung in Bayern.** Um die aktuelle Praxis der Waldhackschnitzellagerung in Bayern zu kennen, wurde eine Umfrage mit den Ansprechpartnern für Holzenergie der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und Expertenbefragungen mit dem Zentrum für Energieholz der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. durchgeführt. Der Lagerung von Hackschnitzeln kommt sowohl im Staatswald als auch in den Privat- und Körperschaftswäldern Bayerns eine große Bedeutung zu. Es wird viel und auch teilweise sehr lange gelagert, was die Erforschung der Lagerungsprozesse noch wichtiger macht. Erkenntnisse bezüglich der Schüttungsgröße, der Haufenform, der Lagerungsdauer und des Lagerungszeitraums flossen in die laufenden Versuchsplanungen der LWF und des TFZ ein.

**Vorversuche.** Neben der Umfrage zur aktuellen Situation in Bayern und einer ausführlichen Literaturstudie zu bisher durchgeführten Lagerungsstudien wurden zu Beginn des Projekts in Vorversuchen unterschiedliche Probenahmemethoden an Hackschnitzelmieten hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Durchführbarkeit geprüft. Aus den gewonnenen Erfahrungen und Ergebnissen wurden optimale Versuchsdesigns für groß angelegte, praxisnahe Freilandversuche und für klein angelegte Behälterversuche abgeleitet. Für die Freilandversuche erwies sich die Bilanzbeutelmethode aufgrund der hohen Messauflösung, der räumlichen Darstellung der Ergebnisse und aufgrund eines vergleichsweise geringen Zeit- und Kostenaufwands (v. a. bei der Probengewinnung) als am besten geeignet. Für die Behälterversuche wurden modifizierte, teilweise perforierte Lagerboxen mit 0,6 m<sup>3</sup> Füllvolumen gewählt, die an einem überdachten, windgeschützten Unterstand aufgestellt wurden.

**Freilandversuche.** In Freilandversuchen wurde die Lagerung von Fichtenhackschnitzeln aus Waldrestholz (Kronenmaterial) und aus Energierundholz (aus entastetem Stammholz geringer Qualität) sowie die Lagerung mit und ohne Regenschutz (Vlies) untersucht. Die Lagerung fand auf einem asphaltierten Lagerplatz bei Eichstätt (Oberbayern) statt.

Es gab insgesamt zwei Versuchsdurchgänge, einen Winterversuch (November 2014 bis April 2015) und einen Sommersversuch (Mai 2015 bis Oktober 2015). Die Probenahme erfolgte mit Bilanzbeuteln, die beim Aufbau des Versuchs innerhalb der Hackschnitzelschüttungen rasterförmig angeordnet und im Verlauf der Lagerung herausgezogen wurden. Zusätzlich zur Lagerung von Hackschnitzeln wurden beide Sortimente ungehackt in Poltern ohne Regenschutz gelagert und ebenfalls beprobt.

Die Versuche zeigten, dass die untersuchten Faktoren (Lagerungsdauer, Lagersaison, Sortiment und Regenschutz) einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Wassergehalt und die Trockenmasseverluste der Hackschnitzel hatten. Nach fünf Monaten Lagerung war der mittlere Wassergehalt um bis zu 22,6 Prozentpunkte gesunken, der höchste Trockenmasseverlust betrug 11,1 m-%. Im Winter wurden die höchsten Energieverluste (11,3 %) gemessen. Im Sommer änderte sich der Energieinhalt kaum, oder stieg sogar leicht an (max. 4,7 %). Miettemperatur und Trockenmasseverluste waren bei den Wrh-HS signifikant positiv korreliert. Eine Bildung von verschiedenen Schichten innerhalb der Mieten konnte nachgewiesen werden. Das Lagerverhalten war beim ungehackten Energierundholz besser als bei den Er-HS. Die Lagerung von ungehacktem Waldrestholz war bezüglich des Energieinhalts nicht vorteilhaft, jedoch verbesserte sich die Brennstoffqualität durch einen verringerten Asche- und Feingehalt.

Aus den Ergebnissen konnten eindeutige Praxisempfehlungen hinsichtlich der Hackschnitzellagerung unter mitteleuropäischen Bedingungen abgeleitet werden. Während des Winters sollten Wrh-HS mit Regenschutz oder so kurz wie möglich gelagert werden, wohingegen während eines trocken-warmen Sommers Hackschnitzel ohne große Einschränkungen gelagert werden können.

**Behälterversuche zur Lagerung.** Parallel zu den Freilandversuchen fanden im Sommer 2015 Behälterversuche am TFZ statt. Hierbei sollte unter kontrollierten Bedingungen das Lagerungsverhalten unterschiedlicher Rohmaterialien analysiert werden. Der Schwerpunkt dieser Versuche lag auf Untersuchungen zum Einfluss des Feingehalts auf die Trockenmasseverluste und die Trocknungseffekte. Hierfür wurde die Feinfraktion von fünf Hackschnitzelsortimenten ausgesiebt. Je Sortiment wurden zwei Varianten in 0,6 m<sup>3</sup> großen Behältern für fünf Monate eingelagert: gesiebt (Partikel > 8 mm) und ungesiebt (Anlieferungszustand). Durchschnittlich verloren die Hackschnitzel pro Woche ca. 1,7 m-% (absolut) an Eigengewicht. Dieser Verlust korrelierte signifikant mit dem durchschnittlichen Sättigungsdefizit der Luft. Die Siebung von Hackschnitzeln führte bei der Lagerung in Behältern nicht nur zu einer besseren Trocknung, sondern auch zu geringeren Trockenmasseverlusten im Vergleich zu den ungesiebten Varianten. Durch die Lagerung unter kontrollierten Bedingungen konnte eine Vielzahl an Faktoren und deren Wirkung auf die Trocknung und die Verluste durch biologische Abbauprozesse ermittelt werden.

Die Ergebnisse zum Wassergehalt und zu den Trockenmasseverlusten der ungesiebten Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel waren bei den Behälterversuchen auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Freilandversuchen. Deshalb wird, zumindest im

Sommerhalbjahr, eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Behälterversuchen auf praxisnahe Lagerungsbedingungen angenommen.

**Analyse der Lagerungskosten.** Die mit der Freilandlagerung von Waldhackschnitzeln verbundenen Kosten wurden für zwei Szenarien berechnet: ein land- und forstwirtschaftlicher Betrieb und ein Biomassehändler (inkl. Varianten mit unterschiedlicher Lagerungsdauer und unterschiedlichem Jahresdurchsatz). In allen berechneten Varianten fielen Lagerungskosten in relevanter Höhe an. Diese stiegen mit der Lagerungsdauer an, was zum einen an der damit geringeren jährlich durchgesetzten Menge, zum anderen an den höheren Kosten durch Trockenmasseabbau lag. Die Kosten für den Trockenmasseabbau konnten bei Betrachtung des nutzbaren Energieinhalts teilweise durch die parallel stattfindende Brennstofftrocknung kompensiert werden.

Im Forschungsprojekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzellagerung“ wurden während der gesamten Laufzeit umfangreiche Verfahrensdaten zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln unter bayerischen Bedingungen gesammelt. Die gewonnenen Erkenntnisse können zur weiteren Rationalisierung der Bereitstellungskette von Waldhackschnitzeln beitragen.





## 11 Abstract

Almost five million loose cubic meters of wood chips from forests are produced in Bavaria annually. As production and consumption of these fuels often occur at different times during the year, the storage of fresh wood chips is an important part of the fuel supply chain. However, biological degradation processes during storage can cause high dry matter losses and a decline in fuel quality. These effects may pose an economical risk for biomass producers, distributors and users.

To assess these effects the research project "Quality preserving storage of wood chips" was carried out by the Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ) and by the Bavarian State Institute of Forestry (LWF) over a period of 2.5 years. The aim of the project was to conduct extensive research regarding storage and quality assurance of wood chips. Therefore dry matter losses and different storage effects on fuel quality were investigated.

**Wood chip storage in Bavaria.** A survey and expert interviews were conducted to analyse the current situation of wood chip storage in Bavaria. Target groups were district foresters throughout Bavaria and the Centre for Energy Wood (ZfE) of the Bavarian State Forest Enterprise (BaySF), allowing for the assessment of both private and federal forest practice. In addition to collecting information on typical pile form and pile size, storage duration and season, the overall importance of wood chip storage was evaluated. This information was used to develop a suitable storage design for field trials following the typical storage practice in Bavaria.

**Preliminary tests.** To develop an experimental setup for large wood chip piles under practical conditions, different sampling techniques were compared in preliminary trials. Sampling with balance bags revealed to be the best sampling method for large wood chip piles due to a high measuring resolution and spatial resolution of the results. Furthermore, this method required the lowest cost and time expenditures. Additionally, an experimental setup was elaborated by conducting preliminary tests with containers to store wood chips under small scale conditions. For the experimental setup of the container trials, modified and perforated storage boxes with a volume of 0.6 m<sup>3</sup> were chosen. Best storage location for the trials proved to be a rain and wind protected outdoor shelter.

**Field trials.** In extensive field trials, the storage of spruce wood chips from forest residues (FRC, i. e. crown biomass) and from energy roundwood (ERC, i. e. thin delimbed stem sections of low quality) with and without rain protection was investigated. Storage took place on a paved storage area nearby Eichstätt (Upper Bavaria). Two trials were conducted, one during winter (November 2014 – April 2015) and one during summer (May 2015 – October 2015). Sampling was done using balance bags. In addition to storage of wood chips, the storage of unchipped piles without rain protection was examined. The same assortments (FR, ER) were used for these trials. The results indicate that the investigated factors, i. e. storage duration, season, assortment and rain protection, have a statistically significant influence on moisture content and dry matter loss of wood chips.

During five months of storage, the highest decline in moisture content was 22.6 %-points, the highest dry matter loss 11.1 w-%. In winter, energy losses reached up to 11.3 %. In summer, energy contents did not change or they even increased slightly (max. 4.7 %). Pile temperature and dry matter losses were significantly and positively correlated for FRC storages. Formation of different layers within the piles could be detected. Storage performance was better in unchipped than in chipped energy roundwood. Storage of unchipped forest residues was not beneficial concerning energy content, but fuel quality increased due to reduced ash and fine particle content. Clear best practice recommendations could be drawn for wood chip storage under Central European conditions. During winter, FRC should be stored with rain protection or as short as possible while during a dry and warm summer, wood chips can be stored with only few restrictions.

**Container trials.** During summer 2015, container trials were conducted to examine the effect of fuel screening on dry matter losses and drying processes. In total, five different assortments were compared: Forest residue chips of deciduous and coniferous trees, energy roundwood chips of spruce and beech and poplar chips of short rotation coppice. All assortments were stored in two variants: Screened (particle diameter > 8 mm) and unscreened (as received). Samples were filled in containers (0.6 m<sup>3</sup>) with perforated floors and stored in an outdoor shelter for five months. On average, wood chips lost 1.7 w-% of their total mass per week. This loss correlated positively with the average saturation deficit of the ambient air. Screening of wood chips not only lead to better drying due to better ventilation but also to decreased dry matter losses due to a smaller share of fines.

The results on drying and dry matter losses of the container trials reached similar levels compared to field trials under practical conditions. Therefore, small scale container trials can, at least during summer, be applied as a simple method to assess storage behavior of wood chips on larger scales.

**Storage costs.** Two scenarios were developed from the results of the survey and the field trials to calculate costs that are associated with outdoor storage of wood chips from forests in Bavaria: An agricultural and forest farm that produces wood chips for own consumption and a professional biomass trader with varying storage durations and varying annual throughput rates. Storage costs were of relevance in all scenario variations. With increasing storage duration, costs increased due to a lower throughput rate and higher dry matter losses. Costs for dry matter losses were partially compensated by drying effects when energy costs were considered.

During the research project "Quality preserving wood chip storage", extensive data on wood chip storage and quality changes under practical conditions in Bavaria were collected. The gathered experiences will help to further rationalise supply chains for wood chips from forests.

## 12 Quellenverzeichnis

- [1] ACUNA, M.; ANTTILA, P.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; ASIKAINEN, A. (2012): Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Jg. 33, Nr. 2, S. 225–238
- [2] AFZAL, M. T.; BEDANE, A. H.; SOKHANSANJ, S.; MAHMOOD, W. (2010): Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. *Bio-Resources*, Jg. 5, Nr. 1, S. 55–69
- [3] BALSARI, P.; MANZONE, M. (2010): Evaluation of different wood chips storage techniques. In: FORMEC – THE FOREST ENGINEERING NETWORK (Hrsg.): 43<sup>rd</sup> FORMEC Symposium. *Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment*. 11. – 14. Juli 2010, Padova, Italy: University of Padua, S. 1–10
- [4] BARONTINI, M.; SCARFONE, A.; SPINELLI, R.; GALLUCCI, F.; SANTANGELO, E.; ACAMPORA, A.; JIRJIS, R.; CIVITARESE, V.; PARI, L. (2014): Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 62, Nr. 3 (March), S. 17–25
- [5] BÄRWOLFF, M.; HERING, T. (2012): Fremdenergiefreie Trocknungsvarianten für Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Trocknungsversuch mit 4 Varianten im Rahmen des Projektes AgroForstEnergie. Dornburg-Camburg: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 11 Seiten
- [6] NEUHOF, I.; MERGLER, F.; ZORMAIER, F.; WEINERT, B.; HÜTTL, K. (2012): Hackschnitzel richtig lagern. Merkblatt, Nr. 11. Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten
- [7] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2014): Nachhaltig und naturnah. Wald und Forstwirtschaft in Bayern: Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 32 Seiten, ISSN 1865-8709
- [8] BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR (2012–2015): Bayerische Staatsforsten. Statistikbände 2012–2015. Regensburg: Bayerische Staatsforsten (BaySF), URL: <http://www.baysf.de/de/publikationen.html> (Stand: 15.06.2016)
- [9] BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR (2015): Bayerische Staatsforsten. Statistikband 2015. Regensburg: Bayerische Staatsforsten (BaySF), URL: <http://www.baysf.de/de/publikationen.html> (Stand: 15.06.2016)
- [10] BAYERISCHE STAATSFORSTEN AÖR (2009): Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitzeln. Regensburg: Bayerische Staatsforsten AÖR, 8 Seiten
- [11] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (StMELF) (2014): Forstbetriebsgemeinschaften und Waldbesitzervereinigungen. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) URL: <http://www.stmelf.bayern.de/wald/waldbesitzer/forstwirtschaftliche-zusammenschlusse/index.php> (Stand: 29.06.2016)
- [12] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (StMELF) (2014): Holzmarktbericht für das II. Quartal 2014. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) URL: <http://www.stmelf.bayern.de/wald/holz/004816/index.php> (Stand: 24.09.2014)

- [13] BEDANE, A. H.; MUHAMMAD, T. A.; SOKHANSANJ, S. (2011): Simulation of temperature and moisture changes during storage of woody biomass owing to weather variability. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 35, Nr. 7 (July), S. 3147–3151
- [14] BERGMAN, Ö.; NILSSON, T. (1979): An experiment on outdoor storage of whole-tree chips. Report, Nr. 109. Uppsala: The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, 21 Seiten, ISBN 9157601968
- [15] BRAND, M. A.; BOLZON DE MUÑIZ, G. I.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. (2011): Storage as a tool to improve wood fuel quality. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 35, Nr. 7, S. 2581–2588
- [16] BRUMMACK, J. (2009): Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut. In: LEIBNIZ-INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK POTSDAM-BORNIM E. V. (Hrsg.): Lagerung von Holzhackschnittel. Experten-Workshop. 18. Juni 2008, Potsdam-Bornim. Bornimer Agrartechnische Berichte, Nr. 63. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., S. 5–20
- [17] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL) (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 56 Seiten
- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, beschlossen durch das Bundeskabinett am 14.11.2016. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB), 91 Seiten
- [19] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (2015): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2014. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 82 Seiten
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (2016): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Februar 2016. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 44 Seiten
- [21] CASAL, M. D.; GIL, M. V.; PEDIVA, C.; RUBIERA, F.; PIS, J. J. (2010): Influence on storage time on the quality and combustion behaviour of pine woodchips. *Energy*, Jg. 35, Nr. 7, S. 3066–3071
- [22] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2015): Klimadaten 2006–2015 der Messstation Eichstätt-Landershofen, URL: [www.dwd.de/WESTE](http://www.dwd.de/WESTE) (Stand: 01.02.2016)
- [23] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2016): Archiv – Monatsmittelwerte zwischen 2004 und 2014 der Wetterstation Straubing. Deutscher Wetterdienst – Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, URL: <http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html> (Stand: 08.06.2017)
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14774-2. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung des Wassergehaltes. Ofentrocknung. Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser. Vereinfachtes Verfahren. April 2010. Berlin: Beuth, 8 Seiten

- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14774-3. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung des Wassergehaltes. Ofentrocknung. Teil 3: Wassergehalt in allgemeinen Analyseproben. Februar 2010. Berlin: Beuth, 8 Seiten
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14775. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung des Aschegehaltes. April 2010. Berlin: Beuth, 10 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14918. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung des Heizwertes. April 2010. Berlin: Beuth, 63 Seiten
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 15103. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung der Schüttdichte. April 2010. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 15149-1. Feste Biobrennstoffe. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung. Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber. April 2010. Berlin: Beuth, 15 Seiten
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 14780. Feste Biobrennstoffe. Probenherstellung. September 2011. Berlin: Beuth, 22 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen. September 2014. Berlin: Beuth, 62 Seiten
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. September 2014. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17827-1. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe. Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber. Oktober 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Schüttdichte. Mai 2016. Berlin: Beuth, 18 Seiten
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Aschegehalts. März 2016. Berlin: Beuth, 14 Seiten
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134-2. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Wassergehaltes. Ofentrocknung. Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser. Vereinfachtes Verfahren. Dezember 2015. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [37] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. Berichte aus dem TFZ, Nr. 46. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)., 141 Seiten, ISSN 1614-1008

- [38] DUMFORD, S.; HUBER, M. B.; KIRCHMAIER, C.; FLOERL, K.; LARCH, C. (2016): Respirometric tests as a new approach to determine storage losses of energy wood. In: FAAIJ, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Eds.): 24<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition - Setting the course for a biobased economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. RAI Amsterdam, The Netherlands, Exhibition and Conference Centre, 6–9 June, 2016. Florence: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies, S. 60–64
- [39] ERBER, G.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. (2012): Predicting moisture content in a pine logwood pile for energy purposes, *Silva Fennica*, Jg. 46, Nr. 4, S. 555–567
- [40] ERIKSSON, A. (2011): Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Energy and Technology, 24 Seiten
- [41] FACELLO, A.; CAVALLO, E.; MAGAGNOTTI, N.; PALETTO, G.; SPINELLI, R. (2013): The effect of knife wear on chip quality and processing cost of chestnut and locust fuel wood. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 59, Nr. 12 (December), S. 468–476
- [42] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2012): Hackschnitzel-Heizungen – Marktübersicht. 4. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 91 Seiten
- [43] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2014): Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 208 Seiten
- [44] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2017): Handbuch zum Qualitätsmanagement von Holzhackschnitzeln. Hintergründe, Bereitstellung, Qualitätssicherung. Bonn: Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE), 92 Seiten
- [45] FEICHT, E. (2002): Hackschnitzel-Alveolitis. Gesundheitliche Probleme bei der Handhabung und Lagerung von Hackschnitzeln. Materialien der LWF, Nr. 3. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 92 Seiten
- [46] FERRERO, F.; LOHRER, C.; SCHMIDT, B. M.; NOLL, M.; MALOW, M. (2009): A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Jg. 22, Nr. 4, S. 439–448
- [47] FILBAKK, T.; HØIBØ, O.; NURMI, J. (2011): Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 35, Nr. 1, S. 454–463
- [48] GAGGERMEIER, A.; FRIEDRICH, S.; HIENDLMEIER, S.; ZETTINIG, C. (2014): Energieholzmarkt Bayern 2012. Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 128 Seiten
- [49] HARTMANN, H. (2016): Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 580–640, ISBN 978-3-662-47437-2

- [50] HARTMANN, H. (2016): Lagerung biogener Festbrennstoffe. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 533–564, ISBN 978-3-662-47437-2
- [51] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. 3., vollst. überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 192 Seiten
- [52] HEDING, N. (1990): Exploitation of marginal forest resources for fuel. Contract No. EN-38-069-DK. Frederiksberg: Danish Institute of Forest Technology, Commission of the European Communities, Energy, Final Report, 90 Seiten
- [53] HEINEK, S.; POLANZ, S.; HUBER, M.; HOFMANN, A.; MONTHALER, G.; FUCHS, H.; GIOVANNINI, A. (2013): Biomass conditioning. Degradation of biomass during the storage of wood chips. In: ELDRUP, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Eds.): Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Biomass Conference and Exhibition, Copenhagen. 3–7 June, 2013, Florence: ETA-Florence Renewable Energies, S. 11–20
- [54] HINTERREITER, S. (2010): Bestimmung und Einflussgrößen der Brückenbildung bei der Lagerentnahme von biogenen Festbrennstoffen. Dissertation. München, Freising-Weihenstephan: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, 166 Seiten
- [55] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY BIOENERGY (2013): Health and safety aspects of solid biomass storage. Transportation and feeding. Niederlande: International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32, 36, 37 and 40, 86 Seiten
- [56] JIRJIS, R. (2005): Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted salix viminalis. Biomass and Bioenergy, Jg. 28, Nr. 2, S. 193–201
- [57] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. aktual. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 1755 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [58] KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Band 1. Berlin: Springer, 1050 Seiten, ISBN 3642494749
- [59] KONS, K.; BERGSTRÖM, D.; FULVIO, F. D. (2015): Effects of sieve size and assortment on wood fuel quality during chipping operations. International Journal of Forest Engineering, Jg. 26, Nr. 2, S. 114–123
- [60] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2014): Holzhackschnitzel für Kleinfeuerungsanlagen. Produktion definierter Qualitäten nach DIN EN ISO 17225-4. Schule und Beratung, Nr. 11/12, S. 31–35
- [61] 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

- [62] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (2016A): BauKost. Online-Anwendung zur Berechnung von Investitionsbedarf und Jahreskosten für landwirtschaftliche Betriebsgebäude. URL: [http://daten.ktbl.de/baukost2/?tx\\_ktblsso\\_checktoken\[token\]=39ebb61027bdeb566c56aa82788d3505](http://daten.ktbl.de/baukost2/?tx_ktblsso_checktoken[token]=39ebb61027bdeb566c56aa82788d3505) (Stand: 22.09.2016)
- [63] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (2016B): MaKost. Online-Anwendung zur Berechnung von Kosten landwirtschaftlicher Maschinen. URL: <http://daten.ktbl.de/makost/navigation.do?selectedAction=start#start> (Stand: 22.09.2016)
- [64] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2013): Forstmaschinen vorauskalkulieren. Hintergründe. KWF-Richtwerte und Berechnungsbeispiele. KWF Merkblatt, Nr. 17. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., 35 Seiten
- [65] LEHTIKANGAS, P. (2001): Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 20, Nr. 5, S. 351–60
- [66] LENZ, H.; IDLER, C.; HARTUNG, E.; PECENKA, R. (2015): Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 83, Nr. 12 (December), S. 269–77
- [67] MENDEL, T. (2014): Qualitätserhaltende Hackschnitzzellagerung. Eine Studie zur Beprobung der Qualität von Hackschnitzzellagermieten. Masterarbeit an der Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften. Hohenheim, 110 Seiten
- [68] NOLL, M.; JIRJIS, R. (2012): Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Jg. 95, Nr. 3, S. 551–563
- [69] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. (2006): Chemical properties of solid biofuels. Significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 30, Nr. 11, S. 973–982
- [70] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSIKITUT (1998): ÖNORM M 7133. Hackgut für energetische Zwecke. Anforderungen und Prüfbestimmungen. Februar 1998. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 8 Seiten
- [71] PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C.; DARIES, W.; EHLERT, D. (2014): Development of biophysical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 65, Nr. 6 (June) 13–19
- [72] PETTERSSON, M.; NORDFJELL, T. (2006): Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 31, Nr. 11-12, S. 782–792
- [73] ROUTA, J.; KOLSTRÖM, M.; RUOTSALAINEN, J.; SIKANEN, L. (2005): Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by constant weight monitoring. *International Journal of Forest Engineering*, Jg. 26, Nr. 1, S. 71–83
- [74] SCHOLZ, V.; IDLER, C.; DARIES, W.; EGERT, J. (2005): Lagerung von Feldholzhackgut. Verluste und Schimmelpilze. *Agrartechnische Forschung*, Jg. 11, Nr. 4, S. 100–113



- [75] SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; MACK, R.; ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. (2017): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers. Biomass Conversion and Biorefinery, published online, DOI 10.1007/s13399-017-0249-7
- [76] SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K. (2014): Hacken, schütten, liefern. Freising-Weihenstephan: LWF aktuell, Jg. 103, Nr. 62, 4 Seiten
- [77] THÖRNQVIST, T. (1985): Drying and storage of forest residues for energy production. Biomass, Jg. 7, Nr. 2, S. 125–134
- [78] WEIMAR, H.; DÖRING, P.; MANTAU, U. (2012): Standorte der Holzwirtschaft. Holzrohstoffmonitoring: Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011. Hamburg: Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, 27 Seiten
- [79] WOLF, C.; KLEIN, D.; WEBER-BLASCHKE, G.; SCHULZ, C. (2015): Treibhausgasvermeidung durch Wärme aus Holz. Freising-Weihenstephan: Merkblatt, Nr. 34 Freising-Weihenstephan: Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten



## 13 Anhang

### 13.1 Anhang A – Lagerungspraxis in Bayern

Umfrage zur aktuellen Situation der Waldhackschnitzellagerung in Bayern

Beantworten Sie bitte folgende Fragen zur Situation der Waldhackschnitzellagerung in Ihrem Amtsbereich. Der Fokus liegt auf Privat- und Körperschaftswald, bitte lassen Sie den Staatswald sowie die Lagerung am Hof von Biomasseheiz(kraft)werken außer Betracht. Gerne dürfen Sie die freien Felder für weitere stichpunktartige Antworten nutzen!

1. Spielt die Lagerung von Waldhackschnitzeln außerhalb von BMH(K)W in Ihrem Amtsbereich eine Rolle?

- ja  
 nein

2. Welche Akteure lagern Hackschnitzel? Bitte geben Sie ungefähr die Häufigkeit an. Aus welchen Motiven (z. B. Marktschwankungen, durchgehende Bereitstellung, Trocknung) wird jeweils gelagert?

Akteure	nie	selten	gelegentlich	oft	Motive
Forstliche Zusammenschlüsse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Privatwaldbesitzer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Kommunalwaldbesitzer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Hackschnitzelhändler/Hackerunternehmer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Sonstige:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

3. Welche Größe (in Schüttraummeter) haben die Lagerhaufen etwa?

Srm

4. Auf welche Art wird gelagert? Bitte geben Sie ungefähr die Häufigkeit an.

<b>a) Regenschutz</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
ohne Regenschutz im Freien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
abgedeckt mit Vlies im Freien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
überdacht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiger:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>b) Haufenform</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
unförmige Schüttungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
längliche Mieten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>c) Untergrund</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
Waldboden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
geschotterter Platz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grünland	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
versiegelte Fläche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiger:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>d) Vortrocknung</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
durch Abwärme von Biogasanlagen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Wie lang (in Monaten) ist ca. die Lagerungsdauer?

Monate

6. Wann wird gelagert? Bitte geben Sie ungefähr die Häufigkeit an.

<b>Lagerungszeitraum</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
Winterhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sommerhalbjahr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiger:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7. Wie wird mit dem Waldrestholz vor dem Hacken verfahren (unabhängig davon, ob die Hackschnitzel danach gelagert werden oder nicht)? Bitte geben Sie ungefähr die Häufigkeit an.

<b>Waldrestholz vor dem Hacken</b>	nie	selten	gelegentlich	oft
sofort gehackt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
gelagert, ca. Wochen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

### 13.2 Anhang B – Freilandversuche

Von jedem vierten Bilanzbeutel wurde das Ummantelungsmaterial separat zurückgewogen, um einen Korrekturfaktor für das sich während der Lagerung ändernde Ummantelungsgewicht zu erhalten. Die Masseänderung der Ummantelungen bei Auslagerung korrelierte stark mit den Auslagerungswassergehalten der Hackschnitzelproben, wodurch die Ummantelungsgewichte bei Auslagerung gut korrigiert werden konnten (Abbildung 47).

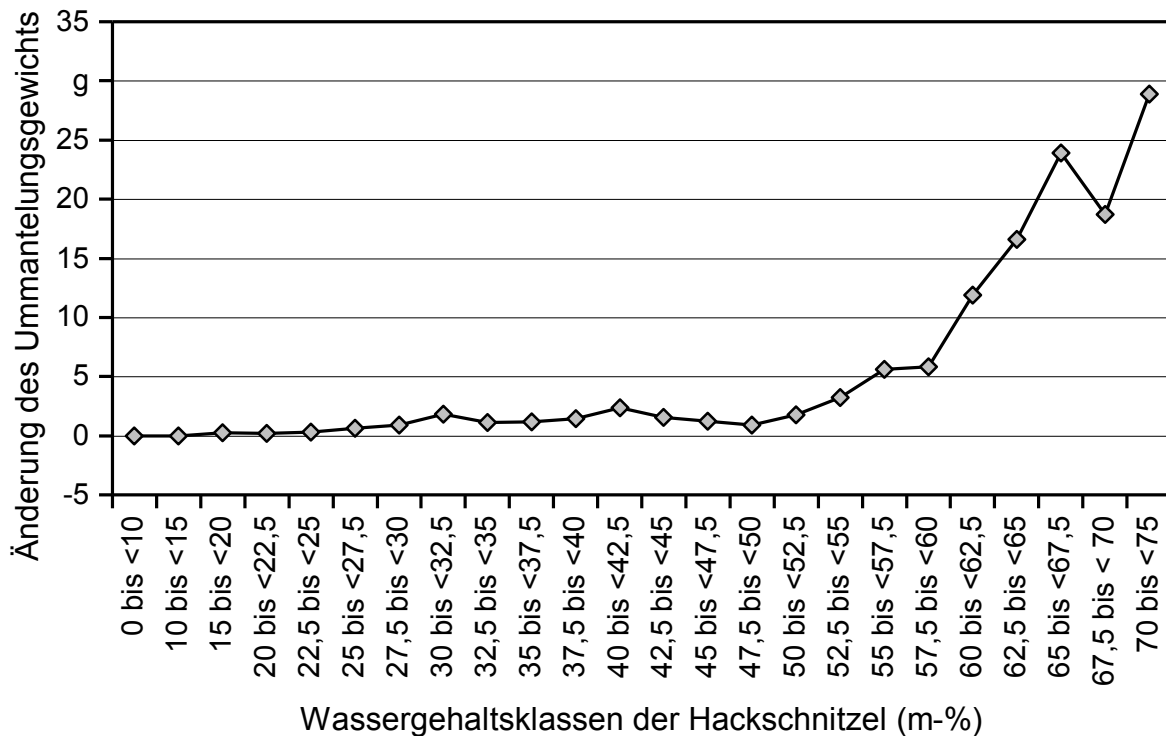


Abbildung 47: Änderung des Ummantelungsgewichts der Bilanzbeutel bei Auslagerung im Vergleich zur Einlagerung in Abhängigkeit des Wassergehalts der Hackschnitzel bei Auslagerung

Aus jedem Sortiment wurde eine verkürzte Miete mit 36 Beuteln (3 Querschnitte) errichtet. Die Beutel wurden unmittelbar nach dem Einbau wieder mit dem Radlader herausgezogen, um einen Trockenmasseabbau und eine Änderung des Wassergehalts ausschließen zu können. Das Setzen der Miete während der Lagerung wurde durch Verdichten mittels Radladerschaufel simuliert. Durchschnittlich verloren die Bilanzbeutel durch das Handling ca. 0,25 % ihrer Probenmasse (Wrh 2,1 g und Er 3,1 g). Dieser Verlust wurde bei der Bestimmung des Trockenmasseverlusts eingerechnet.

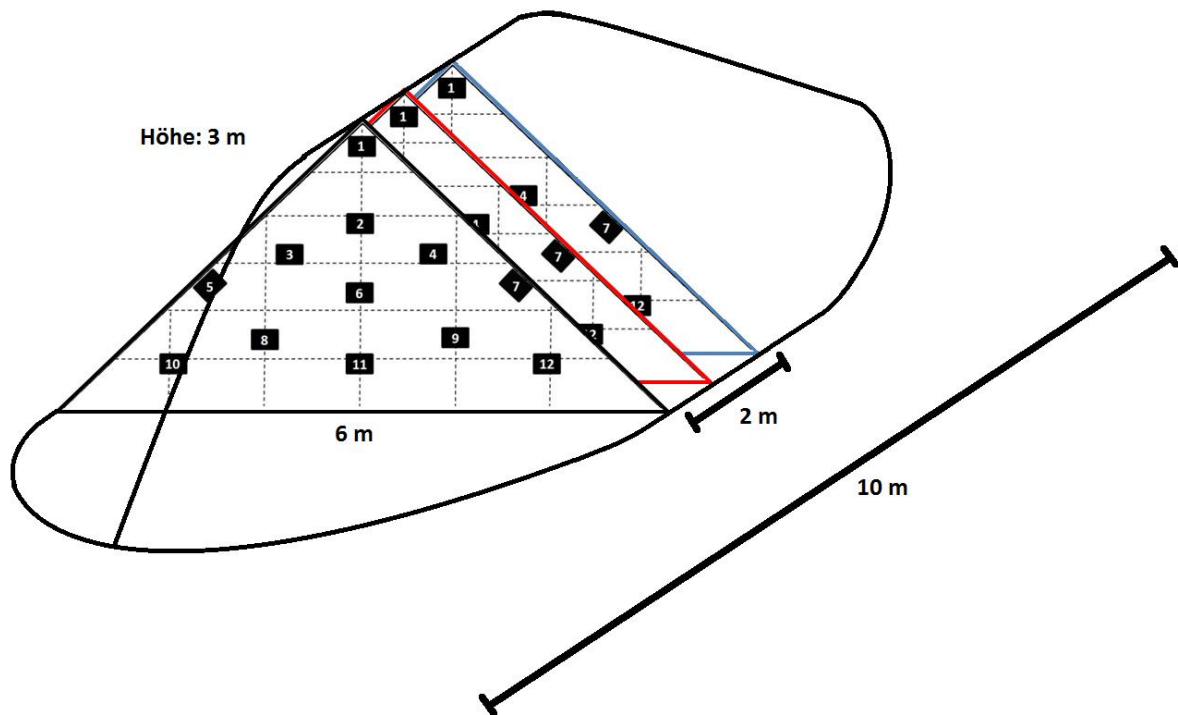


Abbildung 48: Verkürzte Miete zur Ermittlung von Materialein- und -austrag bei der Probenahme

Von den insgesamt 1.152 Bilanzbeuteln konnten 7 nicht ausgewertet werden, weil z. B. das Zugseil riss oder ein Wert nicht eingetragen wurde. Aus den verbleibenden 1.145 Werten wurden insgesamt 40 Ausreißer identifiziert und interpoliert. Ein Beispiel zur Ausreißeridentifizierung zeigt Abbildung 49.

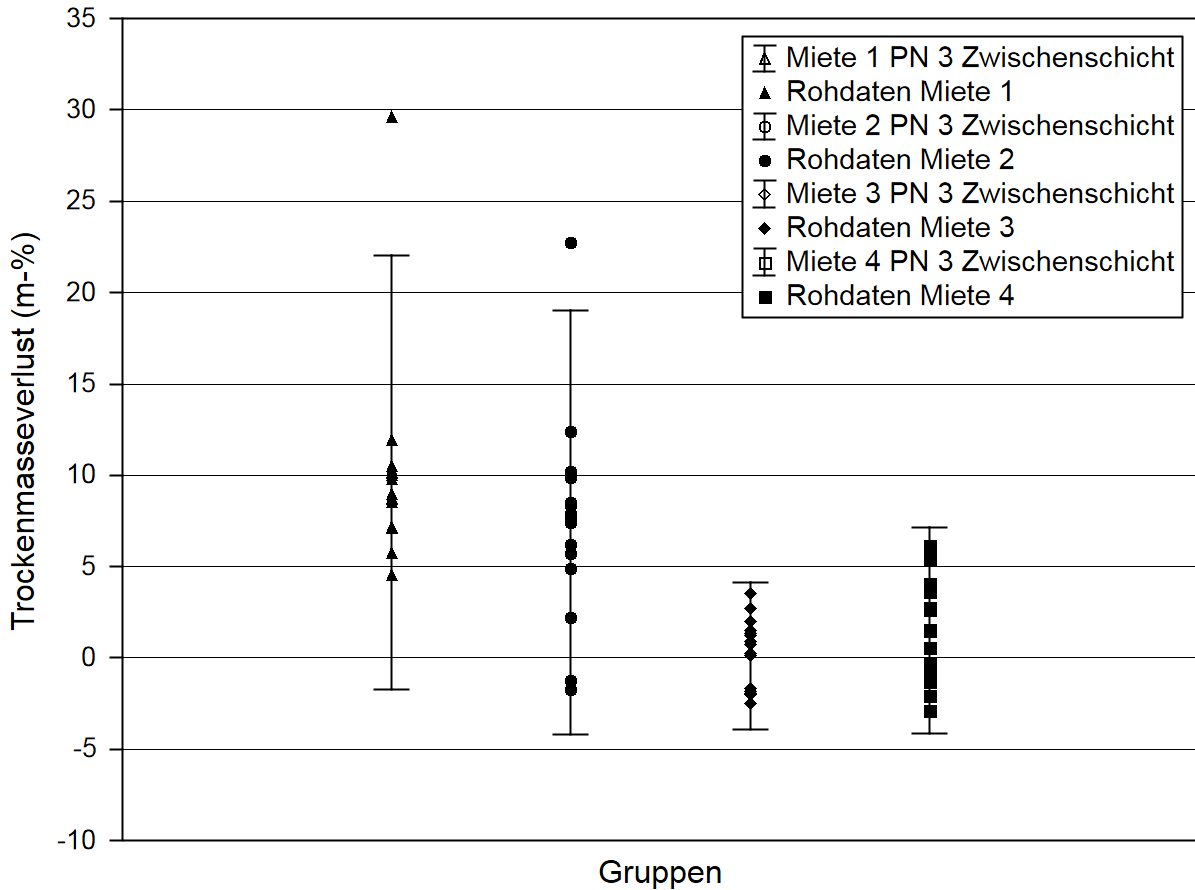


Abbildung 49: Ausreißeridentifizierung nach der zweifachen Standardabweichung, markiert durch die vertikalen Whisker. Je ein Ausreißer am oberen Ende beim Trockenmasseverlust von Miete 1 und 2 in der Zwischenschicht zur dritten Probenahme



Sowohl während der Winter- als auch während der Sommerlagerung bildeten sich signifikant unterschiedliche Schichten in den Hackschnitzelmietten bezüglich des Wassergehalts (insgesamt in 23 von 32 Fällen) und des Trockenmasseverlusts aus (insgesamt in 21 von 32 Fällen). In den meisten Fällen entstanden zwei Schichten. In zwei Mietten konnten jedoch während der Winterlagerung nach 21 Wochen Lagerdauer sogar drei Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht und Kernzone) hinsichtlich des Wassergehalts festgestellt werden (siehe Tabelle 40 bis Tabelle 54; siehe auch Abschnitt 7.2.6.).

**Tabelle 40:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholz hackschnitzelmiete während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	53,7 ( $\pm 5,4$ ) <sup>a</sup>	54,1 ( $\pm 5,8$ ) <sup>a</sup>	60,4 ( $\pm 3,5$ ) <sup>a</sup>	60,8 ( $\pm 4,2$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	41,3 ( $\pm 3,5$ ) <sup>b</sup>	37,0 ( $\pm 4,1$ ) <sup>b</sup>	36,2 ( $\pm 8,7$ ) <sup>b</sup>	29,7 ( $\pm 6,0$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	43,8 ( $\pm 3,0$ ) <sup>b</sup>	39,2 ( $\pm 5,2$ ) <sup>b</sup>	29,8 ( $\pm 6,1$ ) <sup>b</sup>	28,0 ( $\pm 3,2$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 41:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholz hackschnitzelmiete während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	60,2 ( $\pm 3,5$ ) <sup>a</sup>	62,5 ( $\pm 4,0$ ) <sup>a</sup>	68,6 ( $\pm 2,2$ ) <sup>a</sup>	69,9 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	55,5 ( $\pm 1,1$ ) <sup>b</sup>	55,9 ( $\pm 1,0$ ) <sup>b</sup>	56,7 ( $\pm 1,7$ ) <sup>b</sup>	58,5 ( $\pm 5,1$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	55,5 ( $\pm 1,0$ ) <sup>b</sup>	54,8 ( $\pm 0,8$ ) <sup>b</sup>	54,4 ( $\pm 0,8$ ) <sup>b</sup>	50,7 ( $\pm 5,1$ ) <sup>c</sup>

**Tabelle 42:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholz hackschnitzelmiete während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	56,0 ( $\pm 3,5$ ) <sup>a</sup>	57,0 ( $\pm 4,9$ ) <sup>a</sup>	59,6 ( $\pm 5,5$ ) <sup>a</sup>	62,8 ( $\pm 5,0$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	53,7 ( $\pm 1,3$ ) <sup>a</sup>	53,4 ( $\pm 1,3$ ) <sup>b</sup>	53,6 ( $\pm 2,3$ ) <sup>b</sup>	51,6 ( $\pm 4,8$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	53,2 ( $\pm 2,9$ ) <sup>a</sup>	53,7 ( $\pm 0,7$ ) <sup>*</sup>	53,1 ( $\pm 0,6$ ) <sup>b</sup>	46,7 ( $\pm 5,3$ ) <sup>b</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 43:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	57,2 ( $\pm 5,2$ ) <sup>a</sup>	57,6 ( $\pm 5,1$ ) <sup>a</sup>	56,3 ( $\pm 7,9$ ) <sup>a</sup>	52,5 ( $\pm 11,7$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	41,0 ( $\pm 2,8$ ) <sup>b</sup>	35,1 ( $\pm 4,0$ ) <sup>b</sup>	28,6 ( $\pm 3,0$ ) <sup>b</sup>	28,0 ( $\pm 2,3$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	40,7 ( $\pm 2,0$ ) <sup>b</sup>	33,6 ( $\pm 3,1$ ) <sup>b</sup>	28,2 ( $\pm 3,6$ ) <sup>b</sup>	27,9 ( $\pm 3,2$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 44:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	55,4 ( $\pm 4,7$ ) <sup>a</sup>	49,7 ( $\pm 9,9$ ) <sup>a</sup>	33,1 ( $\pm 20,7$ ) <sup>a</sup>	28,1 ( $\pm 20,8$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	49,8 ( $\pm 2,4$ ) <sup>b</sup>	46,8 ( $\pm 3,1$ ) <sup>a</sup>	40,6 ( $\pm 2,6$ ) <sup>a</sup>	36,9 ( $\pm 4,4$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	49,6 ( $\pm 1,4$ ) <sup>b</sup>	45,5 ( $\pm 2,4$ ) <sup>a</sup>	38,7 ( $\pm 3,8$ ) <sup>a</sup>	35,5 ( $\pm 4,4$ ) <sup>a</sup>

**Tabelle 45:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	47,3 ( $\pm 6,0$ ) <sup>a</sup>	46,5 ( $\pm 9,8$ ) <sup>a</sup>	39,6 ( $\pm 17,4$ ) <sup>a</sup>	43,2 ( $\pm 20,0$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	45,3 ( $\pm 1,1$ ) <sup>a</sup>	44,3 ( $\pm 1,6$ ) <sup>a</sup>	40,5 ( $\pm 3,0$ ) <sup>a</sup>	37,4 ( $\pm 8,7$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	45,1 ( $\pm 0,6$ ) <sup>a</sup>	43,5 ( $\pm 0,8$ ) <sup>a</sup>	38,8 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>	30,3 ( $\pm 3,6$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 46:** Schichtbildung (mittlerer Wassergehalt in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Dunn's Test) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	48,0 ( $\pm 4,3$ ) <sup>a</sup>	35,4 ( $\pm 11,1$ ) <sup>a</sup>	20,3 ( $\pm 15,6$ ) <sup>a</sup>	23,0 ( $\pm 18,0$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	50,6 ( $\pm 0,8$ ) <sup>a</sup>	49,5 ( $\pm 1,3$ ) <sup>b</sup>	43,7 ( $\pm 4,9$ ) <sup>b</sup>	33,2 ( $\pm 5,9$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	50,5 ( $\pm 0,6$ ) <sup>a</sup>	48,6 ( $\pm 1,1$ ) <sup>*</sup>	43,2 ( $\pm 3,7$ ) <sup>b</sup>	34,3 ( $\pm 5,4$ ) <sup>a</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 47:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	2,0 ( $\pm 1,7$ ) <sup>a</sup>	3,4 ( $\pm 2,5$ ) <sup>a</sup>	5,7 ( $\pm 1,9$ ) <sup>a</sup>	6,1 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	3,0 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>	5,6 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>	8,9 ( $\pm 2,0$ ) <sup>a</sup>	7,6 ( $\pm 1,9$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	1,3 ( $\pm 2,4$ ) <sup>a</sup>	4,7 ( $\pm 2,9$ ) <sup>a</sup>	9,5 ( $\pm 5,4$ ) <sup>a</sup>	9,4 ( $\pm 1,3$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 48:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	2,2 ( $\pm 1,7$ ) <sup>*</sup>	4,2 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>	4,8 ( $\pm 0,9$ ) <sup>a</sup>	6,2 ( $\pm 1,6$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	3,3 ( $\pm 2,4$ ) <sup>a</sup>	4,0 ( $\pm 1,2$ ) <sup>a</sup>	6,6 ( $\pm 4,1$ ) <sup>*</sup>	8,7 ( $\pm 2,2$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	1,3 ( $\pm 1,7$ ) <sup>b</sup>	2,8 ( $\pm 3,6$ ) <sup>a</sup>	8,5 ( $\pm 2,5$ ) <sup>b</sup>	8,5 ( $\pm 2,0$ ) <sup>b</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 49:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	0,0 ( $\pm 1,8$ ) <sup>a</sup>	-0,1 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>	1,3 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>	1,0 ( $\pm 1,8$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	-1,4 ( $\pm 2,8$ ) <sup>a</sup>	-0,7 ( $\pm 2,2$ ) <sup>a</sup>	0,1 ( $\pm 2,0$ ) <sup>a</sup>	2,3 ( $\pm 2,7$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	0,2 ( $\pm 2,2$ ) <sup>a</sup>	-0,1 ( $\pm 1,6$ ) <sup>a</sup>	2,2 ( $\pm 1,7$ ) <sup>a</sup>	6,6 ( $\pm 4,8$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 50:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Winterlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	-0,8 ( $\pm 2,5$ ) <sup>a</sup>	-1,2 ( $\pm 0,9$ ) <sup>a</sup>	-0,1 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>	0,6 ( $\pm 1,6$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	0,5 ( $\pm 2,5$ ) <sup>*</sup>	0,3 ( $\pm 2,5$ ) <sup>*</sup>	1,5 ( $\pm 2,8$ ) <sup>a</sup>	3,5 ( $\pm 5,0$ ) <sup>*</sup>
Kernzone	2,1 ( $\pm 1,3$ ) <sup>b</sup>	1,8 ( $\pm 1,2$ ) <sup>b</sup>	4,6 ( $\pm 1,7$ ) <sup>b</sup>	7,7 ( $\pm 5,7$ ) <sup>b</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 51:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	0,8 ( $\pm 2,1$ ) <sup>a</sup>	2,2 ( $\pm 2,0$ ) <sup>a</sup>	4,3 ( $\pm 2,6$ ) <sup>a</sup>	8,2 ( $\pm 7,4$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	2,7 ( $\pm 1,7$ ) <sup>a</sup>	4,0 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>	6,4 ( $\pm 2,0$ ) <sup>b</sup>	6,6 ( $\pm 1,8$ ) <sup>a</sup>
Kernzone	2,7 ( $\pm 2,4$ ) <sup>a</sup>	3,4 ( $\pm 2,2$ ) <sup>a</sup>	6,0 ( $\pm 1,2$ ) <sup>*</sup>	6,7 ( $\pm 1,8$ ) <sup>a</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 52:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Waldrestholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	3,1 ( $\pm 2,2$ ) <sup>a</sup>	4,0 ( $\pm 1,0$ ) <sup>a</sup>	6,7 ( $\pm 2,0$ ) <sup>a</sup>	7,8 ( $\pm 3,2$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	2,8 ( $\pm 1,3$ ) <sup>a</sup>	4,2 ( $\pm 1,4$ ) <sup>a</sup>	9,0 ( $\pm 0,9$ ) <sup>b</sup>	11,6 ( $\pm 3,1$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	4,0 ( $\pm 1,6$ ) <sup>a</sup>	7,2 ( $\pm 1,6$ ) <sup>b</sup>	10,1 ( $\pm 1,8$ ) <sup>b</sup>	12,9 ( $\pm 2,7$ ) <sup>b</sup>

**Tabelle 53:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der nicht abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	-0,2 ( $\pm 1,2$ ) <sup>a</sup>	0,5 ( $\pm 1,7$ ) <sup>a</sup>	1,9 ( $\pm 1,2$ ) <sup>a</sup>	2,8 ( $\pm 0,8$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	1,1 ( $\pm 1,1$ ) <sup>b</sup>	1,9 ( $\pm 1,1$ ) <sup>b</sup>	3,9 ( $\pm 1,1$ ) <sup>b</sup>	7,7 ( $\pm 2,4$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	1,5 ( $\pm 0,6$ ) <sup>b</sup>	1,9 ( $\pm 1,1$ ) <sup>*</sup>	3,9 ( $\pm 1,3$ ) <sup>b</sup>	8,7 ( $\pm 3,7$ ) <sup>b</sup>

\* weder zu a noch zu b signifikant unterschiedlich

**Tabelle 54:** Schichtbildung (mittlerer Trockenmasseverlust in m-%  $\pm$ Standardabweichung) in der abgedeckten Energierundholzhackschnitzelmierte während der Sommerlagerung. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; Scheffé) unterschiedliche Gruppen in den Spalten.

	3 Wochen	6 Wochen	12 Wochen	21 Wochen
Deckschicht	-2,4 ( $\pm 1,2$ ) <sup>a</sup>	-2,1 ( $\pm 2,0$ ) <sup>a</sup>	-1,8 ( $\pm 2,3$ ) <sup>a</sup>	-1,2 ( $\pm 1,5$ ) <sup>a</sup>
Zwischenschicht	0,6 ( $\pm 1,1$ ) <sup>b</sup>	1,7 ( $\pm 1,8$ ) <sup>b</sup>	5,5 ( $\pm 3,0$ ) <sup>b</sup>	10,1 ( $\pm 3,6$ ) <sup>b</sup>
Kernzone	1,0 ( $\pm 1,2$ ) <sup>b</sup>	1,6 ( $\pm 1,5$ ) <sup>b</sup>	5,1 ( $\pm 2,4$ ) <sup>b</sup>	9,1 ( $\pm 2,3$ ) <sup>b</sup>

Um herauszufinden, wie gut die 12 Bilanzbeutel den gesamten Mietenquerschnitt repräsentieren, wurde eine Miete senkrecht angeschnitten und an den 12 Bilanzbeutelpositionen Proben entnommen ( $n = 12$ ). Anschließend wurden etwa drei weitere Meter von der Miete abgegraben und hierbei aus jeder Radladerschaufel 3 Proben gezogen ( $n = 36$ ). Der Unterschied im Mittelwert (Wassergehaltsmessung) betrug zwischen den beiden Methoden nur 0,9 Prozentpunkte.

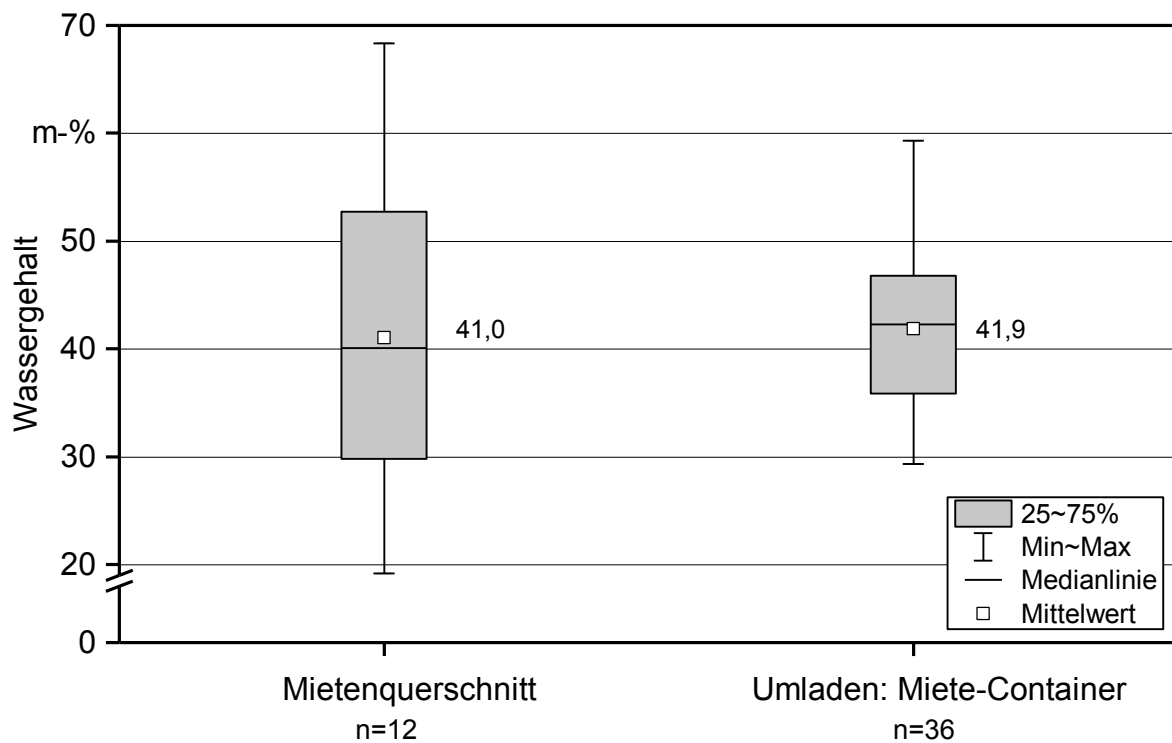


Abbildung 50: Fallstudie: Homogenisierung der Hackschnitzel vom Lagerplatz zum Container anhand des Wassergehalts

### 13.3 Anhang C – Behälterversuche

*Formeln zur Berechnung des Sättigungsdefizits*

$$\Delta E = E \times (1 - \rho / (100\%))$$

$\Delta E$  = Sättigungsdefizit

$E$  = Sättigungsdampfdruck

$\rho$  = Relative Luftfeuchte

$e$  = Dampfdruck

Wobei:

$$\Delta E = E - e$$

und:

$$\rho = e/E$$

und:

$$E = 6,112 \text{ hPa} \times e^{((17,62 \times t)/(243,12+t))}$$

## Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	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 Dieselmotoren betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
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 pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von 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
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayेरische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln – Trockenmasseverluste, Änderungen der Brennstoffqualität und Kosten





ISSN 1614-1008