

70

Berichte aus dem TFZ

# Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungs- verfahren für Holzhackschnitzel

Projektpartner:

**LWF** Bayerische Landesanstalt  
für Wald und Forstwirtschaft





# **Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel**





# Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel

Autoren

Dr. Daniel Kuptz  
Nicolas Hofmann  
Theresa Mendel  
Simon Lesche  
Markus Riebler  
Fabian Schulmeyer  
Claudia Schön  
Dr. Frank Burger  
Dr. Herbert Borchert  
Dr. Hans Hartmann

Projektpartner  Bayerische Landesanstalt  
für Wald und Forstwirtschaft

**Berichte aus dem TFZ 70**

**Straubing & Freising-Weihenstephan, August 2020**

Titel: Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel

Autoren: Dr. Daniel Kuptz (TFZ) Nicolas Hofmann (LWF)  
Theresa Mendel (TFZ) Markus Riebler (LWF)  
Simon Lesche (TFZ) Fabian Schulmeyer (LWF)  
Claudia Schön (TFZ) Dr. Frank Burger (LWF)  
Dr. Hans Hartmann (TFZ) Dr. Herbert Borchert (LWF)

weitere Mitarbeiter: Albert Maierhofer (TFZ) Johanna Krauß (LWF)  
Elisabeth Rist (TFZ) Dr. Uwe Blum (LWF)  
Robert Mack (TFZ) Dr. Elke Dietz (LWF)  
Anja Rocktäschel (TFZ) Irmgard Kern (LWF)  
Benedikt Haas (TFZ) Elisabeth Solic (LWF)  
Paul Roßmann (TFZ) Sandra Egger (LWF)  
Stephan Winter (TFZ) Mandy Kaps (LWF)  
Alexander Marks (TFZ) Johanna Wagner (LWF)  
Thomas Schindlbeck (TFZ) Stefan Herbst (LWF)  
Fabian Blank (TFZ) Stefan Mußner (LWF)  
Johannes Hillenbrand (LWF)  
Vanessa Diepold (LWF)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) unter dem Förderkennzeichen KS/16/03 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.09.2016 bis 15.05.2019. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2020

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

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werks 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: Kuptz, Hofmann, Mendel, Lesche, Riebler, Schulmeyer, Schön, Burger,  
Borchert, Hartmann, Grundner

Gestaltung: Kuptz, Hofmann, Mendel, Lesche, Riebler

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing & Freising-Weihenstephan

Erscheinungsjahr: 2020

Fotonachweis: TFZ, LWF

## Danksagung

Der vorliegende Bericht zum Forschungsvorhaben „Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel“ umfasst die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen, die über den Zeitraum von über drei Jahren gemeinsam durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) durchgeführt wurden.

Besonderer Dank gilt:

- den Kolleginnen und Kollegen des Zentrums für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten AöR (BaySF) für die Bereitstellung der Brennstoffe und Lagerplätze, beispielsweise für die Versuche zur gesiebten Lagerung, zu Fließ- und Verbrennungsversuchen, für die Sickerwasser- und Polterlagerungsversuche sowie die Holzhackschnitzel für die Homogenisierungsversuche. Insbesondere danken die Autoren Frau Anika Sander und Herrn Markus Achhammer für die stets gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit und den wertvollen fachlichen Austausch.
- Herrn Albert Herrnberger der Firma A & L Herrnberger und der Familie Obermair vom Agrarservice Moarhof für die Unterstützung bei den Versuchen zur gesiebten Lagerung von Holzhackschnitzeln und bei dem Arbeitspaket zur Polterlagerung,
- der Firma Guntamatic Heiztechnik GmbH für die Bereitstellung eines geeigneten Holzhackschnitzelkessels für die im Projekt durchgeführten Verbrennungsversuche,
- den Mitarbeitern der Firma Forstbetrieb Alois Probst für die sehr gute Zusammenarbeit bei der technischen Trocknung der Holzhackschnitzel.

Die Studie wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) unter dem Förderkennzeichen KS/16/03 gefördert.



## **Abstract (deutsch/englisch)**

Die verlustfreie und qualitätserhaltende Lagerung von Holzhackschnitzeln stellt einen wesentlichen Prozessschritt in der Brennstoffbereitstellungskette dar. Ziel des Projekts „Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel“ (FKZ: KS/16/03) ist die Erarbeitung detaillierter Verfahrensdaten zur Lagerung und Qualitätssicherung bei der Holzhackschnitzelproduktion. Die Arbeiten fanden durch das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) und die Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) statt. Das Projekt wurde über das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) gefördert. Die Fragestellungen und Untersuchungen umfassten u. a. (I) die Lagerung von Hackholz in ungehacktem Zustand mit und ohne Abdeckung, (II) mögliche Verbesserungen der Holzhackschnitzellagerung durch eine vorangegangene mechanische Siebung der Brennstoffe, (III) innovative Konservierungsmethoden für die qualitätserhaltende Holzhackschnitzellagerung (anaerobe Lagerung, Kalkbeimischung), (IV) Fragen zur Homogenisierung der Brennstoffe während des Transports vom Haufwerk bis zur Feuerung, (V) die energieeffiziente, technische Trocknung im Satzrockner für einen homogenen Wassergehalt, (VI) die Identifikation des maximalen Wassergehalts für volle Lagerstabilität, (VII) Fragen zum Qualitätserhalt vorgetrockneter Holzhackschnitzel bei der Freilandlagerung im Haufwerk mittels Vliesabdeckung als Alternative zur Hallenlagerung, (VIII) das Fließ- und Verbrennungsverhalten gelagerter gegenüber technisch getrockneten Holzhackschnitzeln in Kleinf Feuerungsanlagen sowie (IX) eine Bewertung von Sickerwasserausträgen aus Haufwerken. Für einen Teil der Versuche wurden reale Haufwerke aus Holzhackschnitzel  $\geq 100$  Srm im Freiland errichtet. Diese wurden jeweils zu Beginn und nach einer Lagerungsdauer von vier bis fünf Monaten hinsichtlich ihrer Trockenmasseverluste und Brennstoffqualität sowie bezüglich der speziellen Fragestellungen zu den einzelnen Arbeitspaketen untersucht. Neben praxisnahen Haufwerken fanden Analysen im Labor und über klein angelegte, stationäre Versuche statt. Die zahlreichen Ergebnisse sind in der detaillierten Zusammenfassung am Ende des Berichts wiedergegeben.

Efficient storage of wood chips is a relevant step within the wood chip supply chain aiming at low dry matter losses and fuel quality assurance. The research project “Efficient storage and processing techniques for wood chips” (grant number: KS/16/03) focussed on the development of detailed data on storage and quality assurance during wood chip production. The work was done by the Technology and Support Centre in the Centre of Excellence for Renewable Resources (TFZ) and the Bavarian State Institute of Forestry (LWF). The project was funded by the Bavarian Ministry for Food, Agriculture and Forestry (StMELF). Work packages comprised e. g. (I) storage of unchipped wood with and without cover, (II) improvement of wood chip storage capability due to screening of the fuels, (III) innovative storage methods for wood chips (i. e. anaerobic storage, addition with chalk), (IV) homogenisation during wood chip transport from the storage pile to the boiler, (V) technical drying of wood chips in batch drying system, (VI) identification of

the moisture content for full wood chip storage stability, (VII) outdoor storage of technically dried wood chips with a fleece cover vs. storage in buildings, (VIII) transport and combustion behavior of stored vs. technically dried wood chips, as well as (IX) the evaluation of leachate water from wood chip piles. Individual trials were performed on real full-size wood chip piles in the field ( $\geq 100$  lcm). In most cases, storage was done for up to five months, also focussing on dry matter losses, fuel quality changes and individual hypotheses that derived from the individual working packages. The field trials were complemented by numerous laboratories as well as small-scale trials.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract (deutsch/englisch)</b> .....	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>15</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>27</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>33</b>
<b>2 Problem- und Zielstellung</b> .....	<b>35</b>
<b>3 Aufbau des Berichts</b> .....	<b>37</b>
<b>4 Stand des Wissens</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 Brennstoffqualität</b> .....	<b>41</b>
4.1.1 Wassergehalt.....	42
4.1.2 Schüttdichte .....	42
4.1.3 Aschegehalt.....	43
4.1.4 Heizwert.....	43
4.1.5 Partikelgrößenverteilung, Partikelform und Feinanteil.....	44
4.1.6 Qualitätsnorm für Holzhackschnitzel .....	45
<b>4.2 Bereitstellung und Lagerung von Holzhackschnitzeln</b> .....	<b>46</b>
4.2.1 Bereitstellungsketten für Holzhackschnitzel aus Waldholz .....	46
4.2.2 Lagerung von Holzhackschnitzeln in Mieten und Gebäuden .....	48
4.2.3 Prozesse in Lagermieten.....	49
<b>5 Hackholzlagerung mit und ohne Abdeckung</b> .....	<b>53</b>
<b>5.1 Problem- und Zielstellung</b> .....	<b>53</b>
<b>5.2 Material und Methoden</b> .....	<b>54</b>
<b>5.3 Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>57</b>
5.3.1 Witterung .....	57
5.3.2 Wassergehalt.....	58
5.3.3 Trockenmasseverlust .....	59
5.3.4 Aschegehalt und Heizwert.....	62
5.3.5 Partikelgrößenverteilung und Schüttdichte.....	63
5.3.6 Inhaltsstoffliche Analyse Walki Biomass Cover.....	67
<b>5.4 Kosten der Polterabdeckung</b> .....	<b>68</b>
<b>5.5 Zusammenfassende Bewertung</b> .....	<b>70</b>
<b>6 Veränderte Lagerung durch Siebung von Holzhackschnitzeln</b> ...	<b>73</b>
<b>6.1 Problem- und Zielstellung</b> .....	<b>73</b>
<b>6.2 Material und Methode</b> .....	<b>74</b>
6.2.1 Siebung der Holzhackschnitzel und Versuchsdesign.....	75
6.2.2 Probenahme .....	77

6.2.3	Brennstoffanalysen .....	78
<b>6.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>79</b>
6.3.1	Charakterisierung des Ausgangsmaterials .....	79
6.3.2	Klimabedingungen und Entwicklung der Miettemperaturen .....	83
6.3.3	Trocknungseffekte und Trockenmasseverluste .....	85
6.3.4	Aschegehalt und Heizwert nach der Lagerung .....	87
6.3.5	Änderung des Energieinhalts .....	88
<b>6.4</b>	<b>Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>Neue Konservierungsmethoden für die Holzhackschnitzellagerung .....</b>	<b>91</b>
<b>7.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>91</b>
<b>7.2</b>	<b>Theoretische Überlegungen zu neuartigen Konservierungsmethoden bei der Holzhackschnitzellagerung .....</b>	<b>92</b>
7.2.1	Anaerobe Lagerung .....	92
7.2.2	Lagerung mit CaCO <sub>3</sub> als Additiv .....	93
<b>7.3</b>	<b>Versuchsreihe A: Erste Erprobung der anaeroben Lagerung und der Additivierung von Holzhackschnitzeln mit CaCO<sub>3</sub> im Behälterversuch .....</b>	<b>94</b>
7.3.1	Material und Methoden aus Versuchsreihe A .....	94
7.3.1.1	Ausgangsmaterial .....	94
7.3.1.2	Konservierungsmethoden .....	95
7.3.1.3	Brennstoffparameter .....	99
7.3.1.4	pH-Wert .....	99
7.3.1.5	Gasmessung bei der Auslagerung der anaerob gelagerten Sortimente.....	100
7.3.1.6	Emissionsmessungen bei der Verbrennung ausgewählter Sortimente .....	100
7.3.2	Ergebnisse und Diskussion aus Versuchsreihe A .....	102
7.3.2.1	Brennstoffqualität zu Beginn der Lagerung.....	102
7.3.2.2	Temperaturverläufe während der Lagerung .....	104
7.3.2.3	Masseveränderung über die Lagerdauer .....	106
7.3.2.4	Brennstoffqualität nach der Lagerung .....	107
7.3.2.5	Gaszusammensetzung zum Zeitpunkt der Auslagerung .....	112
7.3.2.6	Verbrennungsversuche .....	114
<b>7.4</b>	<b>Versuchsreihe B: Weiterführende Messungen zur anaeroben Lagerung von Holzhackschnitzeln in Behältern, Silos und einer Miete .....</b>	<b>118</b>
7.4.1	Material und Methoden in Versuchsreihe B .....	118
7.4.1.1	Behälterlagerung.....	118
7.4.1.2	Lagerung in abgedichteten Betonsilos .....	120
7.4.1.3	Lagerung von Waldrestholz in einer Lagermiete .....	123
7.4.2	Ergebnisse und Diskussion zu Versuchsreihe B .....	124
7.4.2.1	Brennstoffqualität zu Beginn der Lagerung.....	124
7.4.2.2	Behälterversuche .....	126
7.4.2.3	Gasentwicklung in den anaerob gelagerten Behältern .....	133
7.4.2.4	Lagerung in abgedichteten Betonsilos .....	134
7.4.2.5	Mietenlagerung .....	141
<b>7.5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung zu den Konservierungsmethoden .....</b>	<b>145</b>

<b>8</b>	<b>Homogenität im Wassergehalt vom Lagerplatz bis zur Feuerung .....</b>	<b>149</b>
<b>8.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>149</b>
<b>8.2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>149</b>
8.2.1	Probenahme am Lagerplatz .....	150
8.2.2	Probenahme nach Transport.....	151
8.2.3	Probenahme im Bunker.....	152
<b>8.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der Fallstudie 1 .....</b>	<b>153</b>
<b>8.4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der Fallstudie 2.....</b>	<b>155</b>
<b>8.5</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>157</b>
<b>9</b>	<b>Technische Trocknung für einen homogenen Wassergehalt....</b>	<b>159</b>
<b>9.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>159</b>
<b>9.2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>160</b>
9.2.1	Grundaufbau der Satztrockneranlage am TFZ.....	160
9.2.2	Verfahrenstechnische Optimierung der Satztrocknung am TFZ .....	162
9.2.3	Versuchsreihe 1 – Homogenität des Wassergehalts in der Schüttung .....	164
9.2.4	Versuchsreihe 2 – Prozessparameter der Trocknung.....	166
<b>9.3</b>	<b>Trocknungsversuche am hauseigenen Satztrockner .....</b>	<b>169</b>
9.3.1	Versuchsreihe 1 – Homogenität des Wassergehalts in der Schüttung .....	169
9.3.2	Versuchsreihe 2 – Energetische Optimierung der Trocknung.....	172
<b>9.4</b>	<b>Schlussfolgerung der Trocknungsversuche .....</b>	<b>179</b>
<b>10</b>	<b>Identifikation des maximalen Wassergehalts für volle Lagerstabilität.....</b>	<b>181</b>
<b>10.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>181</b>
<b>10.2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>181</b>
10.2.1	Praktische Durchführung .....	181
10.2.2	Korrektur der Sauerstoffkonzentration.....	185
10.2.3	Berechnung des Trockenmasseverlusts .....	185
10.2.4	Statistik .....	187
<b>10.3</b>	<b>Vorversuche.....</b>	<b>188</b>
10.3.1	Lagerungsdauer 24 Stunden bei niedriger Temperatur .....	188
10.3.2	Lagerungsdauer 48 Stunden bei niedriger und hoher Temperatur .....	189
<b>10.4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>191</b>
10.4.1	Wassergehalt der Holzhackschnitzel vor der technischen Trocknung .....	191
10.4.2	Aschegehalt.....	192
10.4.3	Partikelgrößenverteilung.....	192
10.4.4	Nebenversuch zur Sauerstoffzehrungsrate .....	193
10.4.5	Korrelation von Wassergehalt und Sauerstoffkonzentration .....	194
10.4.6	Multiples lineares Regressionsmodell der Rate des Trockenmasseabbaus... 197	197
<b>10.5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>198</b>
10.5.1	Diskussion der Ergebnisse .....	198
10.5.1.1	Charakterisierung des Ausgangsmaterials.....	198

10.5.1.2	Korrelation von Wassergehalt und Sauerstoffverbrauch .....	199
10.5.1.3	Sauerstoffzehrung bei Holzpellets .....	199
10.5.1.4	Einfluss der Lagerdauer vor der Trocknung und der Sortimente .....	200
10.5.1.5	Abbauraten bei unterschiedlichen Wassergehalten .....	201
10.5.2	Diskussion der Methoden .....	202
<b>10.6</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung .....</b>	<b>203</b>
<b>11</b>	<b>Lagerung vorgetrockneter Holzhackschnitzel unter Vlies .....</b>	<b>205</b>
<b>11.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>205</b>
<b>11.2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>205</b>
11.2.1	Nebenversuch Vliesberechnung .....	206
11.2.2	Hauptversuch zum Vergleich der Freilandlagerung unter Vlies mit der Hallenlagerung .....	209
<b>11.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>213</b>
11.3.1	Nebenversuch Vliesberechnung .....	213
11.3.1.1	Freilandversuch .....	213
11.3.1.2	Laborversuch .....	214
11.3.2	Hauptversuch Freiland- und Hallenlagerung .....	216
11.3.2.1	Witterung .....	216
11.3.2.2	Mietentemperatur .....	218
11.3.2.3	Wassergehalt .....	220
11.3.2.4	Trockenmasseverlust .....	220
11.3.2.5	Aschegehalt, Schüttdichte und Partikelgrößenverteilung .....	221
<b>11.4</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung .....</b>	<b>222</b>
<b>12</b>	<b>Änderung im Fließ- und Verbrennungsverhalten durch die Lagerung .....</b>	<b>225</b>
<b>12.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>225</b>
<b>12.2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>226</b>
12.2.1	Versuchsbrennstoffe .....	226
12.2.2	Messung der Brückenbildungsneigung .....	227
12.2.3	Messung der Verbrennungseigenschaften .....	229
<b>12.3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>231</b>
12.3.1	Brennstoffqualität .....	231
12.3.2	Brückenbildungsneigung .....	233
12.3.3	Verbrennungseigenschaften .....	243
<b>12.4</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>251</b>
<b>13</b>	<b>Sickerwasser aus Holzhackschnitzelmieten .....</b>	<b>253</b>
<b>13.1</b>	<b>Problem- und Zielstellung .....</b>	<b>253</b>
<b>13.2</b>	<b>Vorversuch – Lagerung im Freiland mit Sickerwasserrinnen .....</b>	<b>253</b>
<b>13.3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>255</b>
<b>13.4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>261</b>
13.4.1	Witterung .....	261
13.4.2	Holzhackschnitzelqualität .....	262

13.4.2.1 Wassergehalt und Masse .....	262
13.4.2.2 Aschegehalt und Heizwert.....	263
13.4.2.3 Partikelgrößenverteilung.....	264
13.4.2.4 Element- und Schwermetallgehalt.....	265
13.4.3 Sickerwasser .....	267
13.4.3.1 Sickerwassermenge .....	267
13.4.3.2 Chemischer und biologischer Sauerstoffbedarf, gelöster organischer Kohlenstoff.....	269
13.4.3.3 Stickstoff und Phosphor.....	274
13.4.3.4 pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Trockensubstanz .....	277
13.4.3.5 Schwermetalle und Spurenelemente.....	278
13.4.4 Filterwirkung des Bodens .....	282
13.4.5 Alternative Nutzung der Lagerfläche .....	287
<b>13.5 Zusammenfassende Bewertung .....</b>	<b>288</b>
<b>13.6 Praxisempfehlungen .....</b>	<b>289</b>
 <b>Zusammenfassung .....</b>	 <b>291</b>
 <b>Quellenverzeichnis .....</b>	 <b>299</b>
 <b>Anhang .....</b>	 <b>311</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiele für Verfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln [54] .....	47
Abbildung 2:	Freilandlagerung von Holzhackschnitzeln in Lagermieten (links) und von ungehacktem Waldrestholz (rechts) in einem Feldversuch von TFZ und LWF. Die Brennstoffe wurden teilweise abgedeckt. ....	49
Abbildung 3:	Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (nach [68]).....	50
Abbildung 4:	Lagerplatz in Putzbrunn nach dem Aufbau der Polterversuche. Jeweils drei Polter ohne Abdeckung und zum Vergleich drei Polter mit Abdeckung (Abdeckpapier: Walki Biomass Cover, Walki Group Oy) .....	54
Abbildung 5:	Aufladen des Waldrestholzes im Wald mit einem Bagger zangenweise abwechselnd in zwei Hakenliftcontainer mit je 40 m <sup>3</sup> Volumen.....	55
Abbildung 6:	Lagerplatz in Putzbrunn während der ersten Probenahme. Oben: Hacken mitsamt Walki Biomass Cover. Unten links: Aufsammeln der abgefallenen bzw. liegen gebliebenen Biomasse für separates Verwiegen. Unten rechts: „gesäuberter“ Lagerplatz nach der ersten Probenahme. Das Verfahren der Probenahme erfolgte somit analog zu dem Vorgehen im bereits abgeschlossenen Projekt [60]. ....	56
Abbildung 7:	Witterungsdaten während des Polterlagerungsversuchs auf dem Lagerplatz Putzbrunn.....	57
Abbildung 8:	Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung) der Referenzhackschnitzel beider Varianten (offen/abgedeckt) zum Zeitpunkt der Einlagerung sowie der sechs ungehackt gelagerten Waldrestholzpolter bei Auslagerung (PN 1 bis PN 3).....	59
Abbildung 9:	Trockenmasseverlust bei den sechs ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern .....	60
Abbildung 10:	Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern nach zehn Wochen Lagerungsdauer am 24.07.2017 (PN 1). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben (n = 5).....	65
Abbildung 11:	Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern nach 20 Wochen Lagerungsdauer am 05.10.2017 (PN 2). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben (n = 5).....	66
Abbildung 12:	Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten	

---

	Waldrestholzpoltern nach 30 Wochen Lagerungsdauer am 11.12.2017 (PN 3). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben (n = 5) .....	67
Abbildung 13:	Ausgangsmaterial für die Lagerungsversuche: Energierundholz (Bilder oben) und Waldrestholz (Bilder unten) .....	74
Abbildung 14:	Verwendetes Schwingsieb zur Absiebung der Feinfraktion (Partikel < 10 mm).....	75
Abbildung 15:	Aufbau der Holzhackschnitzellagermieten und Verteilung der Bilanzbeutel im Querschnitt .....	76
Abbildung 16:	Darstellung der vier abgedeckten Lagermieten zum Zeitpunkt der Einlagerung .....	77
Abbildung 17:	Verlauf der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Niederschlagsmenge während der gesamten Lagerungsdauer .....	84
Abbildung 18:	Verlauf der Mietentemperaturen (Tagesmittelwerte der drei Sensoren je Miete) und des Sättigungsdefizits während der gesamten Lagerungsdauer .....	85
Abbildung 19:	Änderungen des Energieinhalts bei der Lagerung, Einlagerung entspricht 100 %.....	88
Abbildung 20:	Hacken des Brennstoffs mit dem Trommelhacker Jenz A 582R und Förderbandaustrag.....	95
Abbildung 21:	Wind- und regengeschützte Lagerung der Behälter .....	96
Abbildung 22:	Regelmäßige Wiegung der Behälter mittels einer Kranwaage .....	96
Abbildung 23:	Manuelle Beimischung von CaCO <sub>3</sub> zu den Holzhackschnitzeln .....	98
Abbildung 24:	Stickstoffspülung eines der anaerob gelagerten Behälter vor dem Einlagern (Einleiten des N <sub>2</sub> unten links, Messung der O <sub>2</sub> -Konzentration am obenliegenden Gärspund) .....	98
Abbildung 25:	Bestimmung des pH-Werts nach DIN EN 15933 [37] .....	100
Abbildung 26:	Zudosieren des CaCO <sub>3</sub> über eine Dosierschnecke direkt in die Brennstoffzufuhr des Kessels .....	101
Abbildung 27:	Mittlerer Aschegehalt der Sortimente vor und nach der Lagerung (in m-%, ± Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) (n = 3, Versuchsreihe A).....	103
Abbildung 28:	Mittlere Schüttdichte der Materialien (± Standardabweichung, bezogen auf 15 m-% Wassergehalt) zum Zeitpunkt der Einlagerung (n = 3, Versuchsreihe A) .....	104
Abbildung 29:	Temperaturverläufe der anaerob gelagerten Sortimente und der Referenz in Versuchsreihe A .....	105
Abbildung 30:	Temperaturverläufe der aerob gelagerten Sortimente in Versuchsreihe A.....	106

---

Abbildung 31: Prozentuale Massesabnahme über die Lagerdauer in Versuchsreihe A .....	107
Abbildung 32: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung, in m-%) der Sortimente vor und nach der Lagerung in Versuchsreihe A (n = 5) .....	108
Abbildung 33: Trockenmasseverluste nach der Lagerung in Versuchsreihe A (n = 1).....	110
Abbildung 34: Energieinhaltsveränderung über die Lagerdauer in Bezug auf den Ausgangsenergieinhalt in Versuchsreihe A.....	111
Abbildung 35: Mittlere CO <sub>2</sub> -Konzentration (in Vol.-%) im Behälter zum Zeitpunkt der Auslagerung $\pm$ Standardabweichung in Versuchsreihe A (n = 395).....	112
Abbildung 36: Mittlere CH <sub>4</sub> -Konzentration (in ppm) im Behälter zum Zeitpunkt der Auslagerung; $\pm$ Standardabweichung in Versuchsreihe A (n = 395).....	113
Abbildung 37: Mittlere CO-Emission und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert $\pm$ Min/Max in Versuchsreihe A (n = 5).....	115
Abbildung 38: Mittlere NO <sub>x</sub> -Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert $\pm$ Min/Max in Versuchsreihe A (n = 5).....	115
Abbildung 39: Mittlere Gesamtstaubemission und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert $\pm$ Min/Max in Versuchsreihe A (n = 5) .....	116
Abbildung 40: Mit Plexiglas und Silikon gasdicht verschlossene Behälter für die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln. Jeder Behälter wurde mit einem Temperatursensor (grünes Kabel) und einem verschließbaren Anschluss für einen Gassammelbeutel ausgestattet (Versuchsreihe B) .....	119
Abbildung 41: Leeres Betonsilo (U-Profil) vor der Lagerung (links); mit Holzhackschnitzeln gefülltes Betonsilo inkl. Plexiglaswand, Temperatursensoren und Silofolie (rechts) .....	121
Abbildung 42: Holzhackschnitzelsilo beim Aufbau inkl. Silofolie, Unterziehfolie und Sandsäcke (links). Lagerung in abgedichteten Silos am Betriebshof des TFZ inkl. Sonnen- und Vogelschutz (rechts) .....	122
Abbildung 43: Schematischer Aufbau der 12 Srm großen Lagermiete am Betriebshof des TFZ in Versuchsreihe B.....	123
Abbildung 44: Einbau der untersten Bilanzbeutelsschicht in die Lagermiete (links) und mit Vlies abgedeckte Miete (rechts).....	124
Abbildung 45: Mittlerer Temperaturverlauf in den Lagerbehältern aus Versuchsreihe B .....	126
Abbildung 46: Gesamtmasse der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung .....	127

---

Abbildung 47: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung (n = 5) .....	128
Abbildung 48: Mittlere Schüttdichte ( $\pm$ Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung .....	128
Abbildung 49: Deutliche Myzelienbildung auf der Oberfläche der KUP-Hackschnitzel in einem anaerob gelagerten Behälter beim Abbau in Versuchsreihe B .....	131
Abbildung 50: Gemessene und für die anaerobe Varianten berechnete Trockenmasseverluste bei der fünfmonatigen Behälterlagerung von KUP- und Wrh-Holzhackschnitzeln in Versuchsreihe B.....	132
Abbildung 51: Energieinhaltsveränderung über die Lagerdauer in Bezug auf den Ausgangsenergieinhalt bei der fünfmonatigen Behälterlagerung von KUP- und Wrh-Holzhackschnitzeln in Versuchsreihe B.....	133
Abbildung 52: Mittlerer Temperaturverlauf in den Holzhackschnitzelsilos aus Versuchsreihe B .....	135
Abbildung 53: Gesamtmasse der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung .....	136
Abbildung 54: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung) der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung.....	137
Abbildung 55: Trockenmasseverlust der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B nach fünf Monaten Lagerung .....	138
Abbildung 56: Optische Beispiele für das Wachstum von Pilzen beim Abbau der Lagersilos in Versuchsreihe B.....	138
Abbildung 57: Deutliche Verklumpung der Partikel durch das Wachstum von Pilzmyzelien beim Abbau der Silos in Versuchsreihe B.....	140
Abbildung 58: Mittlerer Temperaturverlauf in der Holzhackschnitzelmiete aus Versuchsreihe B .....	142
Abbildung 59: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$ Standardabweichung) in den Bilanzbeuteln vor und nach der fünfmonatigen Lagerung in der Holzhackschnitzelmiete aus Versuchsreihe B .....	142
Abbildung 60: Mittlerer Trockenmasseverlust ( $\pm$ Standardabweichung) in den Bilanzbeuteln nach der fünfmonatigen Lagerung in der Holzhackschnitzelmiete aus Versuchsreihe B .....	143
Abbildung 61: Übergeordnete Probenahmezeitpunkte beider Fallstudien.....	150
Abbildung 62: Probenahme am Lagerplatz (a = am Mietenquerschnitt, b = beim Umladen in den Transportcontainer).....	151

---

Abbildung 63: Probenahme bei Lieferung (a = an der Oberfläche des Containers, b = beim Abkippen in den Bunker – Varianten a, c = homogenisierte Probe – Varianten b, d = Homogenisierung mittels Probenteiler) .....	152
Abbildung 64: Probenahme im Bunker (a = an der Oberfläche im Bunker, b und c = vor der Feuerung) .....	152
Abbildung 65: Wassergehalte (in m-%) im Mietenquerschnitt von Fallstudie 1 .....	153
Abbildung 66: Wassergehaltsmessungen der Fallstudie 1 an den Schnittstellen der Probenahme: Lagerplatz, Lieferung und Bunker .....	154
Abbildung 67: Wassergehalte (in m-%) im Mietenquerschnitt von Fallstudie 2 .....	156
Abbildung 68: Wassergehaltsmessungen der Fallstudie 2 an den Schnittstellen der Probenahme: Lagerplatz, Lieferung und Bunker .....	156
Abbildung 69: Grundaufbau des TFZ-Versuchstrockners .....	161
Abbildung 70: Temperaturverlauf der Trocknungsanlage während des Vorversuchs .....	163
Abbildung 71: Relative Luftfeuchte der Trocknungsanlage während des Vorversuchs .....	164
Abbildung 72: Wassergehaltsprobenahme in Versuchsreihe 1 zur technischen Trocknung. Links: manuelle Probenahme, rechts: Verteilung der Bilanzbeutel vor der Auffüllung der Box mit losen Holzhackschnitzeln .....	165
Abbildung 73: Verteilung der Wassergehaltsproben (Bilanzbeutel, manuelle Probenahme) bei der Trocknung in Versuchsreihe 1 mit jeweils 13 Proben auf drei Höhen .....	166
Abbildung 74: Schematischer Aufbau der Trocknungseinrichtung für die Versuche zu Versuchsreihe 2 .....	167
Abbildung 75: Trocknungseinrichtung mit Erweiterung der Trocknungsbox auf eine Höhe von 2,3 m .....	168
Abbildung 76: Wassergehalt der Holzhackschnitzel nach der Trocknung in der TFZ-Satz Trocknung an jeweils 13 Positionen auf drei unterschiedlichen Höhen. Die Probenahme erfolgte durch schichtweises Abtragen der Brennstoffe nach der Trocknung. ....	170
Abbildung 77: Wassergehalt der Holzhackschnitzel nach der Trocknung in der TFZ-Satz Trocknung an jeweils 13 Positionen auf drei unterschiedlichen Höhen. Die Probenahme erfolgte durch die Messung mit Bilanzbeutel .....	171
Abbildung 78: Zeitlicher Trocknungsverlauf der Referenz Trocknung (Beispiel) .....	174
Abbildung 79: Holzhackschnitzelproben (hier des Sortimentes Energierundholz) für die Untersuchung des lagerstabilen Wassergehalts nach Entnahme aus der Schüttung und Homogenisierung .....	183
Abbildung 80: Luftdicht verschlossener Eimer mit Ventilkonstruktion im Deckel, gefüllt mit Holzhackschnitzeln (links). Messung der	

	Sauerstoffkonzentration im Eimer nach 48 Stunden Lagerung (rechts) .....	184
Abbildung 81:	Korrelation von Restsauerstoff nach 24 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel sowie Energierundholzhackschnitzel im Eimer bei $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem ersten Vorversuch .....	189
Abbildung 82:	Korrelation von Restsauerstoff nach 48 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel im Eimer bei niedriger ( $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und hoher ( $34 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem zweiten Vorversuch.....	190
Abbildung 83:	Korrelation von Restsauerstoff nach 48 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Energierundholzhackschnitzel im Eimer bei niedriger ( $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und hoher ( $34 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem zweiten Vorversuch.....	191
Abbildung 84:	Mittlere Partikelgrößenverteilung der Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel ( $\pm$ Standardabweichung) für den Sauerstoffzehrungsversuch .....	193
Abbildung 85:	Entwicklung der Sauerstoffkonzentration in den Eimern über eine Dauer von knapp drei Tagen. Der Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel lag bei $63,6 \pm 0,3 \text{ m-\%}$ , der Wassergehalt der Energierundholzhackschnitzel bei $55,1 \pm 0,4 \text{ m-\%}$ (jeweils $n = 7$ ). .....	194
Abbildung 86:	Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für beide Sortimenten .....	195
Abbildung 87:	Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für eine unterschiedliche Lagerdauer vor der Trocknung bei Waldrestholz.....	196
Abbildung 88:	Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für unterschiedliche Temperaturniveaus während des Experiments bei Energierundholz .....	196
Abbildung 89:	Der Einfluss von verschiedenen erklärenden Variablen auf die Abbaurate. Die Rate bei den Waldrestholzhackschnitzeln bei $21 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Lagerdauer von mehr als fünf Wochen vor der Durchführung der Experimente dient als Referenz. Die Abbaurate pro Jahr wurde berechnet, indem die mit Gleichung (10.12) ermittelten Werte mit $365/2$ multipliziert wurden. ....	198
Abbildung 90:	Versuchsaufbau zur künstlichen Beregnung des Vlieses auf einer ca. 3,5 m hohen Schüttung aus Energierundholzhackschnitzeln: Beregnungsgestell, bestehend aus drei $1 \times 1 \text{ m}$ großen Beregnungsgittern mit je 110 gleichmäßig verteilten Tropflöchern. Hilfgestell für die drei Beregnungskanister mit VE-Wasser. Laborschlauchpumpe (auf dem Handwagen) für die konstante Förderung der eingestellten Wassermenge und Trog zum	

	Auffangen des abgeleiteten Beregnungswassers. Die drei verschlossenen Kanister auf dem Boden dienten als Beschwerung.....	206
Abbildung 91:	Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen Vliesausschnitts im 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln (links ohne Vlies, rechts mit Vlies).....	208
Abbildung 92:	Anordnung der 36 Bilanzbeutel in der Holzhackschnitzelmiete im Freiland und der Vergleichsschüttung in der Halle.....	210
Abbildung 93:	Miete aus technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln mit Vliesabdeckung und Wetterstation im Freien (oben). Aufbau der Vergleichsmiete in der Lagerhalle mit Bilanzbeuteln zur Probenahme (unten links). Fertiggestellte Vergleichsmiete (unten rechts).....	212
Abbildung 94:	Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen, unbenutzten Vliesausschnitts in einem 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln .....	215
Abbildung 95:	Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen, bereits zehn Monate im Freilandland genutzten Vliesausschnitts in einem 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln .....	215
Abbildung 96:	Niederschlag (Tagessumme), Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (jeweils Tagesmittelwerte) auf dem Lagerplatz während des fünfmonatigen Versuchs zur Lagerung technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzeln.....	216
Abbildung 97:	Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsintensitäten auf dem Lagerplatz während des fünfmonatigen Versuchs (05.06.2018 bis 05.11.2018).....	217
Abbildung 98:	Mietentemperaturen in der Freilandmiete mit Vliesabdeckung in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund) während des fünfmonatigen Versuchs mit technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln .....	218
Abbildung 99:	Mietentemperaturen in der Hallenmiete in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund) während des fünfmonatigen Versuchs mit technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln .....	219
Abbildung 100:	Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$ Standardabweichung) der Energierundholzhackschnitzeln bei der Freilandlagerung mit Vlies und bei der Hallenlagerung.....	222
Abbildung 101:	Messverfahren der Bildanalyse und Beispiele für den Kornformfaktor; A = Minimaler Feret, B = Maximale Partikellänge, U = Partikelumfang, U' = Umfang eines flächengleichen Kreises [80].....	227
Abbildung 102:	Aufbau des TFZ-Brückenbildungstesters ([58], basierend auf [90]).....	228
Abbildung 103:	Messverfahren zur Bestimmung der Brückenbildung [58].....	229
Abbildung 104:	Testaufbau am Feuerungsprüfstand des TFZ (T = Temperaturmessung, v = Gasgeschwindigkeitsmessung).....	230

---

Abbildung 105: Öffnungsweite (1. Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	234
Abbildung 106: Öffnungsweite (> 50 % Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	234
Abbildung 107: Öffnungsweite (100 % Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	235
Abbildung 108: Vergleich modellierter und gemessener Werte für die Öffnungsweite des Bridging-Testers (100 % Einsturz) der untersuchten Brennstoffe (Modellberechnungen nach [58]) .....	237
Abbildung 109: Vergleich modellierter und gemessener Werte für die Öffnungsweite des Bridging-Testers (100 % Einsturz) der untersuchten Brennstoffe (eigene Modellberechnungen nach Tabelle 54) .....	239
Abbildung 110: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit des Kornformfaktors .....	240
Abbildung 111: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit der mittleren Partikellänge.....	241
Abbildung 112: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit des Länge-zu-Breite-Verhältnisses .....	242
Abbildung 113: Mittlere CO-Emissionen und Luftüberschusszahl Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert $\pm$ Min/Max (n = 5). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	244
Abbildung 114: Mittlere Abgastemperaturen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert $\pm$ Min/Max (n = 5). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	245
Abbildung 115: CO-Emissionen in Abhängigkeit des Wassergehalts.....	245
Abbildung 116: Mittlere Org.-C-Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert $\pm$ Min/Max (n = 5).	

Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).....	247
Abbildung 117: Org.-C-Emissionen in Abhängigkeit des Wassergehalts.....	247
Abbildung 118: Mittlere $\text{NO}_x$ -Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert $\pm$ Min/Max ( $n = 5$ ). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). .....	248
Abbildung 119: $\text{NO}_x$ -Emissionen in Abhängigkeit des Stickstoffgehalts .....	249
Abbildung 120: Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert $\pm$ Min/Max ( $n = 5$ ). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).....	250
Abbildung 121: Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit vom Gehalt der aerosolbildenden Elemente Kalium und Natrium im Brennstoff .....	250
Abbildung 122: Rinnenkonstruktion zur Gewinnung von Sickerwasserproben mit den wichtigsten Komponenten im Mietenquerschnitt [103] .....	254
Abbildung 123: Niederschlagsereignisse und Sickerwassermengen bei den nicht abgedeckt gelagerten Waldrestholzhackschnitzeln aus Untersuchungen des Vorgängerprojekts .....	255
Abbildung 124: Holzhackschnitzelmieten aus Fichte (links: Energierundholz-HS, rechts: Waldrestholz-HS) zur Entnahme von Holzhackschnitzeln für die künstliche Beregnung .....	256
Abbildung 125: Oben links: Waldrestholzhackschnitzelmiete nach der zweiten Beprobung: Entnahme einer ca. 1 m breiten und 25 cm mächtigen Holzhackschnitzelschicht quer über den gesamten Mietenkörper. Oben rechts: Beprobung der händisch homogenisierten Waldrestholzhackschnitzeln. Unten links: Befüllung der Beregnungsfässer nach der Holzhackschnitzelnbeprobung. Unten rechts: Aufbau des Beregnungsversuchs mit Laborschlauchpumpe, Beregnungsgittern, mit Holzhackschnitzeln befüllte HDPE-Fässer mit Lochboden, Holzgestellen und lebensmittelechten Auffangwannen in einer Garage auf dem Lagerplatz. ....	257
Abbildung 126: Vorrichtung zur Messung der Sauerstoffkonzentration in der Deckschicht der Holzhackschnitzelmieten, bestehend aus Einstechlanze (Edelstahlrohr, 100 cm) mit perforiertem Ende, Laborschlauch, Kartusche mit Kieselgel, Sauerstoffmessgerät (GOX 100, GHM Messtechnik GmbH) und Handpumpe.....	261
Abbildung 127: Lufttemperatur und Niederschlag an der DWD-Messstation Weihenstephan-Dürnast während des Versuchszeitraums [25].....	262

---

Abbildung 128: Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$ Standardabweichung) der Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung und nach fünf Monaten Lagerungsdauer .....	265
Abbildung 129: Mittlerer chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) des Sickerwassers aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung).....	270
Abbildung 130: Mittlerer chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) des Sickerwassers aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	270
Abbildung 131: Mittlerer biologischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> ) des Sickerwassers aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung).....	271
Abbildung 132: Mittlerer biologischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> ) des Sickerwassers aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	271
Abbildung 133: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	272
Abbildung 134: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	272
Abbildung 135: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs (NH <sub>4</sub> -N) im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	275
Abbildung 136: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs (NH <sub>4</sub> -N) im Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung) .....	275
Abbildung 137: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung).....	276
Abbildung 138: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) im Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$ Standardabweichung).....	276
Abbildung 139: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag).....	283
Abbildung 140: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs (NH <sub>4</sub> -N) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag).....	284
Abbildung 141: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag).....	285
Abbildung 142: Mittlere Konzentration von Aluminium (Al) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und	

---

Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag) .....	286
Abbildung 143: Mittlere Konzentration von Eisen (Fe) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag).....	287
Abbildung 144: Probenverteilung im Mietenquerschnitt nach Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht und Kernzone).....	313
Abbildung 145: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$ Standardabweichung) der ungesiebten Wrh-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt .....	313
Abbildung 146: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$ Standardabweichung) der gesiebten Wrh-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt .....	314
Abbildung 147: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$ Standardabweichung) der ungesiebten Er-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt .....	314
Abbildung 148: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$ Standardabweichung) der gesiebten Er-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt.....	315
Abbildung 149: Rechnerischer Trockenmasseverlust in Prozent pro Jahr bei verschiedenen Wassergehalten der Waldrestholzhackschnitzel und einer Lagerungstemperatur von $21 \pm 2$ °C. Es wurden hierbei nur die ersten sechs Wochen der Lagerung mit einer überdurchschnittlich starken Sauerstoffabnahme berücksichtigt, weshalb die Extrapolation auf ein Jahr zu hohe Trockenmasseverlustwerte liefert. ....	320



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Arbeitspakete (AP) für das Projekt „Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel“ und deren dazugehörige Kapitel im Bericht.....	37
Tabelle 2:	Auswahl relevanter physikalischer Qualitätsparameter und deren Einfluss sowie die anzuwendende Prüfnorm (gekürzt aus [52]).....	41
Tabelle 3:	Partikelgrößenklassen für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug ohne maximale Querschnittsfläche).....	45
Tabelle 4:	Brennstoffspezifikationen A1 bis B2 für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug ohne chemische Inhaltsstoffe) (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand).....	46
Tabelle 5:	Niederschlagssummen und mittlere Lufttemperaturen auf dem Lagerplatz zwischen den Probenahmeterminen. Einlagerung = 17.05.2017, PN 1 = 24.07.2017, PN 2 = 05.10.2017, PN 3 = 11.12.2017 .....	58
Tabelle 6:	Masse und Wassergehalt (Mittelwert ± Standardabweichung) des von den Waldrestholzpoltern abgefallenen und/oder nicht vom Ladekran des Hackers aufgegriffenen Materials (Rest). Die Masse der sechs Polter lag bei der Einlagerung zwischen 4800 und 6120 kg. WG = Wassergehalt, TM = Trockenmasse, n. g. = nicht gemessen .....	61
Tabelle 7:	Aschegehalte der Holzhackschnitzel (in m-%, wf) aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. Mittelwerte ± Standardabweichung. Statistisch signifikante Änderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test, $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme (PN) fettgedruckt (wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	62
Tabelle 8:	Heizwerte ( $\text{kJ kg}^{-1}$ , wf) der Hackschnitzel aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. In Klammern die prozentuale Veränderung im Vergleich zum jeweiligen Einlagerungswert. Analysen an repräsentativen Mischproben ( $n = 1$ ) (wf = wasserfreie Bezugsbasis) .....	63
Tabelle 9:	Feinanteil, Partikel $\leq 8$ mm, Medianwert der Größenverteilung, Hauptfraktion und Klassifizierung der Waldrestholzhackschnitzel aus der ungehackten Polterlagerung. Veränderungen ( $\Delta$ ) im Vergleich zur ungehackten Einlagerung in Klammern, k. V. = keine Veränderung, n. m. = nicht möglich, Mittelwerte mit jeweils $n = 5$ . Statistisch signifikante Veränderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test, $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme sind fettgedruckt. ....	64
Tabelle 10:	Schüttdichte der Holzhackschnitzel (in $\text{kg m}^{-3}$ , wf) aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. Mittelwert ± Standardabweichung. Statistisch signifikante Änderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test, $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme (PN) fettgedruckt (wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	67

Tabelle 11:	Kostenübersicht (in €) beim Einsatz eines Polterabdeckpapiers. Vergleich eines Praxisbeispiels mit dem Lagerungsversuch im Forschungsprojekt.....	69
Tabelle 12:	Liste der verwendeten Normen für biogene Festbrennstoffe und deren Bezeichnungen .....	78
Tabelle 13:	Charakterisierung des Ausgangsmaterials der vier Lagermieten (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand) .....	80
Tabelle 14:	Charakterisierung des ausgesiebten Feinmaterials (Partikel $\leq 10$ mm) beider Sortimente (wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	81
Tabelle 15:	Elementgehalte bei Einlagerung der Waldrestholzhackschnitzel (wasserfreie Bezugsbasis) .....	82
Tabelle 16:	Elementgehalte bei Einlagerung der Energierundholzhackschnitzel (wasserfreie Bezugsbasis) .....	83
Tabelle 17:	Mittlere Wassergehalte (in m-%, $\pm$ Standardabweichung), Wassergehaltänderungen und Trockenmasseverluste der Hackschnitzelmieten nach einer Lagerungsdauer von 22 Wochen. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) zeigen signifikante Unterschiede im Mittel (ANOVA mit Tukey-Test: $p \leq 0,05$ ).....	86
Tabelle 18:	Mittlere Aschegehalte und Heizwerte ( $\pm$ Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten nach einer Lagerungsdauer von 22 Wochen. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei Auslagerung ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test) (wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	87
Tabelle 19:	Auflistung der durchgeführten Konservierungsvarianten in Versuchsreihe A (FM = Frischmasse).....	97
Tabelle 20:	Brennstoffqualität bei Einlagerung in Versuchsreihe A (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand) .....	102
Tabelle 21:	Mittlere pH-Werte vor der Lagerung in Versuchsreihe A (n = 9).....	103
Tabelle 22:	Mittlere pH-Werte der gelagerten Sortimente zum Zeitpunkt der Auslagerung in Versuchsreihe A (n = 9) .....	107
Tabelle 23:	Versuchsdesign der Behälterlagerung in Versuchsreihe B.....	119
Tabelle 24:	Mittlere Brennstoffqualität (Wassergehalt, Schüttdichte, Aschegehalt, Heizwert, jeweils $\pm$ Standardabweichung) der beiden Ausgangsmaterialien Waldrestholz (Wrh) und KUP zu Beginn von Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand).....	125
Tabelle 25:	Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$ Standardabweichung) der beiden Ausgangsmaterialien Waldrestholz (Wrh) und KUP zu Beginn von Versuchsreihe B .....	125
Tabelle 26:	Mittlerer Aschegehalt und mittlerer Heizwert ( $\pm$ Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel bei Auslagerung in Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand) .....	129

Tabelle 27:	Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$ Standardabweichung) der Holz hackschnitzel in den Lagerbehältern vor und nach der fünfmonatigen Lagerung.....	130
Tabelle 28:	Mittlere Gasentwicklung ( $\pm$ Standardabweichung) in den anaerob gelagerten Behältern in Versuchsreihe B .....	134
Tabelle 29:	Mittlere Temperaturdifferenz der Temperatur in °C ( $\pm$ Standardabweichung) innerhalb der abgedichteten Silos im Vergleich zur Außentemperatur in Versuchsreihe B pro Monat .....	135
Tabelle 30:	Mittlere Brennstoffqualität (Aschegehalte, Heizwerte und Schüttdichte ( $\pm$ Standardabweichung) der Holz hackschnitzel nach der Lagerung in abgedichteten Silos in Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand).....	139
Tabelle 31:	Mittlere Partikelgrößenverteilung der Holz hackschnitzel ( $\pm$ Standard-abweichung) vor und nach der Lagerung in abgedichteten Silos in Versuchsreihe B .....	140
Tabelle 32:	Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$ Standardabweichung) der Holz hackschnitzel aus Waldrestholz vor und nach der Lagerung in der Miete in Versuchsreihe B.....	145
Tabelle 33:	Einstellungen der Trocknungsluft für den Vorversuch zur Optimierung der TFZ-Trocknungsanlage.....	163
Tabelle 34:	Varianten der Trocknung in Versuchsreihe 2 .....	168
Tabelle 35:	Ausgangsvariablen und Trocknungsdauer der unterschiedlichen Trocknungsversuche in Versuchsreihe 2 .....	173
Tabelle 36:	Mittlere Temperaturen in °C ( $\pm$ Standardabweichung) bis zum Erreichen des Zielwassergehalts während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	175
Tabelle 37:	Mittlere relative Luftfeuchte und mittlerer Volumenstrom ( $\pm$ Standardabweichung) der Ansaugluft und bei Eingang in die Trocknungskiste während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	176
Tabelle 38:	Absolute Trocknungsarbeit, mittlere Trocknungsleistung ( $\pm$ Standardabweichung) und Trocknerwirkungsgrad während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	176
Tabelle 39:	Absoluter und mittlerer Energiebedarf des Gebläses und des Luftherhitzers ( $\pm$ Standardabweichung) während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	177
Tabelle 40:	Gesamtenergiebedarf und spezifischer Energiebedarf in MJ kg <sup>-1</sup> Wasserverdampfung während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	177
Tabelle 41:	Theoretisches Trocknungsvermögen und elektrischer Trocknerwirkungsgrad während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2 .....	178

Tabelle 42:	Mittlere Wassergehalte ( $\pm$ Standardabweichung, $n = 10$ ) der Holzhackschnitzelproben für die Versuche zum lagerstabilen Wassergehalt vor der technischen Trocknung auf definierte Zielwassergehalte. Probenahmen zwischen Februar und Mai 2018 ....	192
Tabelle 43:	Nebenversuch zur Sauerstoffzehrung von Holzpellets (Wassergehalt: 8,2 m-%, Mischprobe). Obere Tabellenhälfte: Eimer randvoll befüllt (6560 g), untere Tabellenhälfte: Eimer zu ca. einem Drittel befüllt (2219 g).....	200
Tabelle 44:	Zwei Szenarios für die Rate des Trockenmasseabbaus bei technisch getrockneten Hackschnitzeln über einen Lagerzeitraum von sechs Monaten .....	202
Tabelle 45:	Regenrückhaltequote bei der künstlichen Beregnung des Hackschnitzelvlieses mit schwacher bis mittlerer (2,5 mm) und starker (11,2 mm) Regenintensität. Beregnungsdauer jeweils 60 Minuten, beregnete Fläche 4 m <sup>2</sup> .....	213
Tabelle 46:	Mittlere Mietentemperaturen während der fünfmonatigen Lagerungsdauer in der Freilandmiete mit Vlies und in der Hallenmiete in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund) .....	219
Tabelle 47:	Wassergehalte und Trockenmasseverlust bei Freilandlagerung mit Vlies und bei Hallenlagerung. Mittelwert $\pm$ Standardabweichung ( $n = 36$ ) .....	220
Tabelle 48:	Aschegehalt und Schüttdichte der Holzhackschnitzel für den Lagerungsversuch technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wf = wasserfreie Bezugsbasis).....	221
Tabelle 49:	Versuchsbrennstoffe für die Analyse der Fließ- und Verbrennungseigenschaften .....	226
Tabelle 50:	Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert und Schüttdichte der Brennstoffe (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = fünf Monate im Bigbag gelagert, M = in Miete gelagert (fünf Monate), S = in Silo gelagert (fünf Monate), wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand).....	231
Tabelle 51:	Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe für die Versuche zur Brückenbildungsneigung (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = im Bigbag gelagert (fünf Monate), M = in einer Miete gelagert (fünf Monate), S = in einem Silo gelagert) .....	232
Tabelle 52:	Messparameter der Bildanalyse der Brennstoffe für die Versuche zur Brückenbildungsneigung (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = im Bigbag gelagert (fünf Monate), M = in einer Miete gelagert (fünf Monate), S = in einem Silo gelagert) .....	233
Tabelle 53:	Modellgüte multipler linearer Regressionen des Parameters „Öffnungsweite 100 %“ des Bridging-Testers in Abhängigkeit der	

	Variablen der Holzhackschnitzel-Modelle (HHS) nach HINTERREITER et al. [58] und nach eigener Auswahl.....	238
Tabelle 54:	Modellberechnung und Signifikanz einer multiplen linearen Regression des Parameters „Öffnungsweite bei 100 % Einsturz“ des Bridging-Testers mit den unabhängigen Variablen KFF, MP, w, LzuB und BD <sub>15</sub> .....	238
Tabelle 55:	Zeitlicher Ablauf der Hauptversuche zu den Sickerwasseruntersuchungen (Probenahme jeweils zur Monatsmitte) .....	256
Tabelle 56:	Materialien, mit denen das Beregnungs- bzw. Sickerwasser in Berührung kam, bevor es zur Analyse in die Probenflaschen abgefüllt wurde. Obere Tabellenhälfte: VE-Wasser. Untere Tabellenhälfte: Sickerwasser. Sortiert nach Reihenfolge des Kontakts .....	259
Tabelle 57:	Literaturübersicht zur Luftsauerstoffkonzentration in Holzhackschnitzelschüttungen – Messung der Sauerstoffkonzentration (HS = Holzhackschnitzel) .....	260
Tabelle 58:	Literaturübersicht zur Luftsauerstoffkonzentration in Holzhackschnitzelschüttungen – Messung anderer Gase mit Rückschluss auf die Sauerstoffkonzentration (HS = Holzhackschnitzel) .....	260
Tabelle 59:	Wassergehalt (Mittelwert ± Standardabweichung aus jeweils zehn Proben) und Gesamtmasse der Holzhackschnitzel für die Sickerwasserversuche. ....	263
Tabelle 60:	Aschegehalt und Heizwert der Holzhackschnitzel für die Sickerwasserversuche. Aschegehalt: Mittelwerte ± Standardabweichung aus jeweils fünf Proben. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; t-Test) unterschiedliche Gruppen in den Zeilen. Heizwert: Analysen an Mischproben ( $n = 1$ ) (wf = wasserfreie Bezugsbasis) .....	264
Tabelle 61:	Element- und Schwermetallgehalte der Holzhackschnitzelproben (Teil 1) für die Sickerwasserversuche sowie der dazugehörige Grenzwert der Anforderungsnorm DIN EN ISO 17225-4. Mittelwerte ± Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ ) (wasserfreie Bezugsbasis) .....	266
Tabelle 62:	Element- und Schwermetallgehalte der Holzhackschnitzelproben (Teil 2) für die Sickerwasserversuche sowie der dazugehörige Grenzwert der Anforderungsnorm DIN EN ISO 17225-4. Mittelwerte ± Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ ) (wasserfreie Bezugsbasis) .....	266
Tabelle 63:	Sickerwassermenge bei der künstlichen Beregnung von Waldhackschnitzeln in 220-l-Fässern. Schwache Beregnung: 2,3 l; starke Beregnung: 9,2 l. Die Beregnungsdauer betrug eine Stunde, die Nachtropfdauer ebenfalls. Probenanzahl: $0 \leq n \leq 5$ . Mengenangaben in ml .....	268

Tabelle 64:	pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (in $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) der Sickerwasserproben. Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung aus jeweils vier bis fünf Proben ( $4 \leq n \leq 5$ ).....	277
Tabelle 65:	Analysewerte der Elemente, für die Vergleichswerte (Grenzwerte) im Abwasserabgabengesetz (AbwAG) existieren (Teil 1): Quecksilber, Cadmium, Chrom und Nickel (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	279
Tabelle 66:	Analysewerte der Elemente, für die Vergleichswerte (Grenzwerte) im Abwasserabgabengesetz (AbwAG) existieren (Teil 2): Blei und Kupfer (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis).....	280
Tabelle 67:	Analysewerte weiterer Elemente, für die Vergleichswerte (Prüfwerte) in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) existieren (Teil 1): Antimon, Arsen, Kobalt und Molybdän (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis).....	281
Tabelle 68:	Analysewerte weiterer Elemente, für die Vergleichswerte (Prüfwerte) in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) existieren (Teil 2): Selen, Zink und Zinn (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	282
Tabelle 69:	Ergebnisse der Vorversuchsreihe zur künstlichen Beregnung von Waldrestholzhackschnitzeln (WG ca. 45 m-%) in 220-l-Kunststofffässern.....	317
Tabelle 70:	Klassifizierung von Niederschlagsintensitäten (Regen) gemäß dem Deutschen Wetterdienst [23].....	317
Tabelle 71:	Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasserversuche (Teil 1) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	318
Tabelle 72:	Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasserversuche (Teil 2) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	318
Tabelle 73:	Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasserversuche (Teil 3) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	319
Tabelle 74:	Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasserversuche (Teil 4) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	319
Tabelle 75:	Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasserversuche (Teil 5) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) .....	320

# 1 Einleitung

KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; RIEBLER, M.; HARTMANN, H.; BORCHERT, H.

Die verlustfreie und qualitätserhaltende Lagerung stellt einen wesentlichen Bestandteil in der Bereitstellungskette von Holzhackschnitzeln dar. Angebot und Nachfrage nach Holzhackschnitzeln schwanken sowohl regional, saisonal als auch zwischen unterschiedlichen Betrachtungsjahren. Diese Schwankungen sind von vielen Rahmenbedingungen abhängig, beispielsweise der Waldbewirtschaftung, der Energiepolitik oder weiteren äußeren Einflüssen (z. B. Windwurf oder Borkenkäferbefall der Bestände) und lassen sich insgesamt schwierig voraussehen. Die starken räumlichen und zeitlichen Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage von Holzbrennstoffen stellen die Land- und Forstwirtschaft jedoch häufig vor große, teilweise existenzgefährdende Herausforderungen. Als Folge sind Arbeitsplätze im ländlichen Raum, aber auch die nachhaltige, regionale Energieerzeugung und die Klimaschutzziele des Freistaats gefährdet.

Eine optimale Nutzung ist für begrenzte Ressourcen wie Holzhackschnitzel zwingend erforderlich, um ihren Beitrag zu Wärmewende, zum Klimaschutz und zur Wertschöpfung im ländlichen Raum unter Berücksichtigung aller Aspekte der Nachhaltigkeit voll ausschöpfen zu können. Holzhackschnitzel sind ein Produkt der Forstwirtschaft, dessen Erzeugung bisher stets im Grenzbereich der Wirtschaftlichkeit erfolgt. Deshalb sollten Verluste an Trockenmasse (und damit an nutzbarer Energie) und an Brennstoffqualität bei Lagerung und Logistik möglichst vermieden werden. In beiden Fällen kann es zu erheblichen ökonomischen Einbußen für den Produzenten und Händler kommen. Auch bei der Eigenversorgung muss eine effiziente Nutzung angestrebt werden. Praxistaugliche, wirtschaftliche Lagermethoden werden benötigt, um Verluste möglichst gering zu halten. Ziel muss sein, auch bei der längerfristigen Lagerung den Erhalt einer hohen Brennstoffqualität und geringe Verlustraten zu gewährleisten.

Daneben besteht ein öffentliches Interesse an umfangreichen Untersuchungen zur Lagerung von Holzhackschnitzeln, da große Lagermieten mitunter kritisch bewertet werden könnten. Der forstwirtschaftlichen Praxis wird dabei beispielsweise vorgeworfen, dass über das Sickerwasser grundwassergefährdende Stoffe ausgewaschen werden könnten. Eine regionale Einschränkung der Lagerung in sensiblen Regionen, z. B. in Trinkwasserschutzgebieten, oder Zusatzkosten verursachende Auflagen, z. B. die Abdeckung von Lagermieten mit einem Vlies, werden als Abhilfemöglichkeit diskutiert. Inwieweit hier allerdings tatsächlich Handlungsbedarf besteht und welche Abhilfen angemessen und praxistauglich sind, konnte bisher noch nicht abschließend geklärt werden.



## 2 Problem- und Zielstellung

KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; RIEBLER, M.; HARTMANN, H.; BORCHERT, H.

Während der Bearbeitung des Vorgängerprojekts „Qualitätserhaltende Hackschnitzellaagerung“ (veröffentlicht als TFZ-Bericht 55 [60]) zeigten sich offene Fragen zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln. Diese umfassen einerseits einige bisher ungelöste Grundsatzfragen, z. B. die Vergleichbarkeit der Lagerung von Holzhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb (KUP) mit der Lagerung von Waldhackschnitzeln. Neue, für die Praxis interessante Konservierungsmethoden, z. B. die Erprobung einer Holzhackschnitzelsilage oder eine Kalkbeimischung, sind für eine längerfristige Vorratswirtschaft ebenfalls von Interesse. Die Optimierung der bereits gängigen Lagerpraxis könnte weiter unterstützt werden, beispielsweise durch Versuche zur Lagerung qualitativ hochwertiger, technisch gesiebter Holzhackschnitzel, bei denen aufgrund des höheren Porenvolumens voraussichtlich eine bessere Haufenbelüftung erzielt wird. Ebenso soll der Wassergehalt, bei dem Holzhackschnitzel als lagerstabil angesehen werden, für bayerische Sortimente ermittelt werden. Andere Fragestellungen umfassen die Lagerung von ungehacktem Holz im Polter mithilfe einer Abdeckung, die qualitätserhaltende Lagerung technisch getrockneter Holzhackschnitzel mit einer Vliesabdeckung oder die zu erwartenden Sickerwasserausträge aus Holzhackschnitzelmieten im Freiland.

Neben der Lagerung werden in dem Projekt Optimierungsmöglichkeiten bei der einfachen technischen Trocknung in Satzrockneranlagen aufgezeigt, die eine ausreichende Verbesserung der Brennstoffqualität für die Einhaltung der strengen Emissionsgrenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV [18] gewährleisten sollen. Ergänzend erfolgt die Bewertung der Fließ- und Verbrennungseigenschaften gelagerter und technisch getrockneter Holzhackschnitzel.

Somit ergibt sich eine große Bandbreite an Fragestellungen mit dem Ziel, den Prozessschritt der Lagerung von Holzhackschnitzeln praxisgerecht zu verbessern. Ziel dieser Studie war daher die Erarbeitung detaillierter Verfahrensdaten zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln. Dabei sollen bisher geleistete Arbeiten sinnvoll ergänzt, offen gebliebene Fragen beantwortet und gezielt auf aktuelle Problemstellungen eingegangen werden.



### 3 Aufbau des Berichts

KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; RIEBLER, M.; HARTMANN, H.; BORCHERT, H.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in zehn Arbeitspakete. Tabelle 1 gibt diese wieder und verweist auf die Kapitel, zu denen Teilstudien ausgeführt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den Kapiteln 5 bis 13 dargestellt. Eine ausführliche Erörterung zum Stand des Wissens (Kapitel 4) und eine abschließende Zusammenfassung runden den Bericht ab.

*Tabelle 1: Arbeitspakete (AP) für das Projekt „Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel“ und deren dazugehörige Kapitel im Bericht*

AP	Kurzbezeichnung des Arbeitspakets	Kapitel im Bericht
1	Sickerwasserqualität bei der Lagerung von Hackschnitzeln im Freien	13
2	Energieeffiziente technische Trocknung für einen homogenen Wassergehalt	8, 9
3	Identifikation des maximalen Wassergehalts für volle Lagerstabilität	10
4	Qualitätserhalt vorgetrockneter Hackschnitzel bei der Lagerung im Freien mittels Vliesabdeckung als Alternative zur Hallenlagerung	11
5	Lagerung von Hackholz im ungehackten Zustand mit und ohne Abdeckung	5
6	Besondere Konservierungsmethoden für die qualitätserhaltende Lagerung von Holzhackschnitzeln	7
7	Fließ- und Verbrennungsverhalten von gelagerten und technisch getrockneten Hackschnitzeln	12
8	Verbesserte Lagerbedingungen durch Siebung von Holzhackschnitzeln	6
9	Lagerung von frischen Holzhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb	7
10	Berichterstattung und Wissenstransfer	–

Kapitel 5 befasst sich zunächst nicht mit der Lagerung von Holzhackschnitzeln, sondern mit der Lagerung von ungehacktem Holz im Freiland. Hierbei wurden in einem mehrmonatigen Feldversuch Hackholzpolter aus Waldrestholz mit und ohne Abdeckung gelagert. Neben einer Verbesserung der Trocknung und einer potenziellen Verringerung der Trockenmasseverluste verspricht diese Art der Lagerung eine Verbesserung weiterer Brennstoffparameter wie beispielsweise des Aschegehalts. Als Abdeckmaterial kam ein Laminat auf Papierbasis zum Einsatz.

Kapitel 6 befasst sich mit der Veränderung der Lagerbedingungen durch mechanische Manipulation des Brennstoffs. In einem mehrmonatigen Freilandversuch wurden Holzhackschnitzel in Freilandmieten gelagert, wobei in der Hälfte der Fälle Brennstoffe zum Einsatz kamen, bei denen vorab der Feinanteil maschinell abgesiebt worden war. Hierdurch wurden eine bessere Belüftbarkeit der Haufwerke und gleichzeitig eine Verringerung des Nährstoffangebots für mikrobielles Wachstum angestrebt.

In Kapitel 7 werden zwei Versuchsreihen zu alternativen Lagerungsmethoden dargestellt. Untersucht wurde die Beimischung von Kalk als Additiv, wodurch der pH-Wert der Schüttung angehoben und dadurch die mikrobielle Aktivität verringert werden sollte. Ebenso kam die anaerobe Lagerung, d. h. die Lagerung unter Luftabschluss, zum Einsatz, wodurch ebenfalls das Wachstum holzersetzender Mikroorganismen verringert werden sollte. Untersucht wurden sowohl Brennstoffe aus Waldrestholz als auch aus Kurzumtriebsplantagen, die jeweils in Behältern, in abgedichteten Silos und in einer Miete gelagert wurden.

Sowohl durch die Lagerung in Freilandmieten als auch durch die technische Trocknung kann es zu einer erhöhten Inhomogenität der Brennstoffe kommen. Vor allem hinsichtlich des Wassergehalts können durch Trocknungs- und Kondensationsprozesse große Unterschiede innerhalb einer Charge entstehen. In Kapitel 8 wurde daher untersucht, in welchem Umfang eine an die Lagerung anschließende manuelle Homogenisierung der Brennstoffe tatsächlich notwendig ist und inwieweit diese durch typische Verlade- und Transportprozesse von sich aus bereits eintritt.

Kapitel 9 behandelt zwei Untersuchungen zur technischen Trocknung von Holzhackschnitzeln in Satzrocknerboxen als Alternative zur Freilandlagerung. Neben den Energieverbräuchen (Gebläse, Wärmequelle) und der Brennstoffhomogenität wird die technische Trocknung hinsichtlich ihres Wirkungsgrads bewertet. Hierdurch sollen die wichtigsten Stellgrößen dieser Trocknungsart analysiert und Empfehlungen für die Praxis gewonnen werden.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zum lagerstabilen Wassergehalt, der unterschritten sein muss, damit die mikrobielle Aktivität in Holzhackschnitzeln zum Erliegen kommt. Die teils sehr großen Streubreiten in den Literaturangaben ermöglichen Brennstoffproduzenten und Anlagenbetreibern nur bedingt, ihre Prozesse auf einen Zielwassergehalt hin zu optimieren. In Kapitel 10 wird daher eine Studie vorgestellt, die den tatsächlich als lagerstabil zu bewertenden Wassergehalt für typische bayerische Holzhackschnitzelsortimente ermittelt hat.

Ausgehend von den Daten aus Kapitel 9 (technische Trocknung) und Kapitel 10 (lagerstabiler Wassergehalt) wurde in Kapitel 11 die Lagerung vorgetrockneter Holzhackschnitzel im Freien mittels Vliesabdeckung als günstigere und einfachere Alternative zur Hallenlagerung untersucht. Der Schwerpunkt lag hier auf dem Erhalt der Brennstoffqualität. In Nebenversuchen wurden das Regenrückhaltevermögen sowie das Wasseraufnahme- und -abgabeverhalten der Vliesabdeckung experimentell untersucht.

Durch die mehrmonatige Lagerung von Holzhackschnitzeln verändern sich möglicherweise deren Fließ- und Verbrennungsverhalten. In Kapitel 12 wurden daher Holzhackschnitzel aus der Freilandlagerung hinsichtlich ihrer Brückenbildungsneigung untersucht sowie im Rahmen von Feuerungsversuchen in einer Kleinf Feuerungsanlage verbrannt. Zum Einsatz kamen dabei Holzhackschnitzel aus den Freilandversuchen der Kapitel 6 und 7, die teilweise technisch vorgetrocknet, in den meisten Fällen jedoch frisch eingelagert worden waren. Die Lagerung fand in Mieten, aber auch in abgedichteten Betonsilos statt.

In Kapitel 13 werden Untersuchungen bezüglich des Sickerwasseraustrags aus Freilandmieten dargestellt. Hierbei wurden unter anderem Holzhackschnitzel realer Mieten in einem mehrmonatigen Praxisversuch beprobt und unter kontrollierten Bedingungen be- regnet. Das dabei entstehende Sickerwasser wurde aufgefangen und die darin enthal- tenen Stoffe analysiert. Die Ergebnisse fließen direkt in Handlungsempfehlungen, bei- spielsweise zur VDI 3464 Blatt 2, ein.



## 4 Stand des Wissens

KUPTZ, D.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; SCHULMEYER, F.; RIEBLER, M., HARTMANN, H.; BORCHERT, H.

Im Folgenden werden zunächst wesentliche Aspekte zur Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln wiedergegeben (siehe Unterkapitel 4.1). Danach wird auf die Produktion der Brennstoffe eingegangen und vor allem die Lagerung als Prozessschritt inklusive der in größeren Lagermieten ablaufenden Prozesse und der dadurch entstehenden umwelt-, gesundheits- und sicherheitsrelevanten Herausforderungen dargestellt (siehe Unterkapitel 4.2).

### 4.1 Brennstoffqualität

Bei der Betrachtung der Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln zur energetischen Nutzung ergeben sich je nach Herkunft und Produktion teils große Unterschiede zwischen den einzelnen Sortimenten. Verschiedene Qualitätsparameter haben einen Einfluss auf die Lagerung und die thermische Nutzung der Brennstoffe. In Tabelle 2 sind einige der wichtigsten (physikalischen) Qualitätsparameter inklusive der dazugehörigen aktuell gültigen Prüfnorm aufgelistet.

*Tabelle 2: Auswahl relevanter physikalischer Qualitätsparameter und deren Einfluss sowie die anzuwendende Prüfnorm (gekürzt aus [52])*

Qualitätsparameter	Einfluss des Parameters	Gültige Prüfnorm
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, CO-Emissionen, Brennstoffmasse, Verbrennungstemperatur	DIN EN ISO 18134
Aschegehalt	Rückstandsbildung und -verwertung, Partikelemissionen	DIN EN ISO 18122
Heizwert	Energieertrag des Brennstoffs	DIN EN ISO 18125
Partikelgröße	Trocknungseigenschaften, Brückenbildung, Verstopfen der Mechanik, Glutbett	DIN EN ISO 17827-1
Feinanteil	Aschegehalt, Emissionen (CO, Gesamtstaub), Staubbildung im Lagerraum	DIN EN ISO 17827-1
Schüttdichte	Transport- und Lagerungsdichte	DIN EN ISO 17828

In den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.5 werden zunächst die Qualitätsparameter Wassergehalt, Schüttdichte, Aschegehalt, Heizwert, Partikelgröße, Partikelform und Feinanteil, die bei der energetischen Verwendung von Holzhackschnitzeln Relevanz haben, beschrieben. In Abschnitt 4.1.6 wird anschließend auf die aktuell gültige Anforderungsnorm von Holzhackschnitzeln eingegangen, in der anhand der beschriebenen Qualitätsparameter hochwertige Brennstoffspezifikationen definiert wurden.

### 4.1.1 Wassergehalt

Ein entscheidendes Qualitätsmerkmal von Holzhackschnitzeln ist der Wassergehalt (in m-%). Er beeinflusst direkt die tatsächlich nutzbare Wärmemenge der Brennstoffe, deren Emissionsverhalten und Aschebildung während ihrer Verbrennung sowie ihre Lagerfähigkeit [5] [52]. Der Wassergehalt bezeichnet das Verhältnis zwischen der Masse des Wassers im Brennstoff und seiner Gesamtmasse (siehe Formel (4.1)).

$$w = \frac{m_w}{m_b + m_w} \times 100 \quad (4.1)$$

Hierbei gibt  $w$  den Wassergehalt in m-%,  $m_w$  die Masse des im Brennstoff enthaltenen Wassers und  $m_b$  die Masse der trockenen Biomasse (jeweils in g) wieder.

Der Wassergehalt beeinflusst die Menge an gewonnener Energie bei einer Verbrennung, da das enthaltene Wasser bei der Wärmeerzeugung zunächst verdampft werden muss (siehe Abschnitt 4.1.4). Neben der erzeugbaren Wärme hat der Wassergehalt einen Einfluss auf die Lagerfähigkeit des Materials, da er ausschlaggebend für mikrobielles Wachstum ist (siehe Abschnitt 4.2.3).

Der Wassergehalt frischer Waldrestholzhackschnitzel liegt bei ca. 50 m-%. Aufgrund dieses hohen Werts kommen diese Brennstoffe ohne vorhergehende Trocknung nur für große Heiz-(Kraft-)Werke infrage. Geringere Werte von 10 bis 35 m-%, die je nach Kessel als optimal für die Verbrennung in kleineren Biomasseanlagen angesehen werden, setzen eine Trocknung voraus. Möglichkeiten hierzu bieten technische oder natürliche Trocknungsverfahren [60] [61]. Für Wassergehalte unter 25 m-% empfiehlt sich die technische Trocknung unter Zufuhr externer Wärme, beispielsweise durch Belüftung der Brennstoffe mit der Abwärme aus einer Biogasanlage [45] [75].

### 4.1.2 Schüttdichte

Die Schüttdichte (engl. „Bulk Density“ BD in  $\text{kg m}^{-3}$ ) beschreibt das Verhältnis zwischen der Masse eines Brennstoffs und seinem Schüttvolumen inklusive der dazugehörigen freien Luftporen zwischen den Partikeln. In der Praxis verwendet man diese Kennzahl, um Rückschlüsse zwischen dem Volumen des Brennstoffs und seiner Masse bzw. – unter Einbezug des Heizwerts – dem angelieferten Energiegehalt pro Volumen zu ziehen. Daneben dient die Schüttdichte zur Auslegung von Holzhackschnitzellagern und Brennstoffbunkern.

Die Schüttdichte ist von der Holzart und der Form der einzelnen Partikel, d. h. von der Partikelgrößenverteilung abhängig. Ebenso wird die Schüttdichte stark vom Wassergehalt des Materials beeinflusst, weswegen sie zumeist zusammen mit diesem als „ar“ (engl. „as recieved“, d. h. im Anlieferungszustand) oder bezogen auf einen festen Wassergehalt (beispielsweise 15 m-% oder wasserfrei) angegeben wird.

### 4.1.3 Aschegehalt

Ein weiterer wichtiger Qualitätsparameter ist der Aschegehalt der Brennstoffe. Unter dem Aschegehalt ( $A$  in m-%) ist die Masse an Asche zu verstehen, die nach der vollständigen Verbrennung einer Brennstoffprobe bei 550 °C als Rückstand in einer Probenschale verbleibt (siehe Formel (4.2), [52]).

$$A = \frac{(m_3 - m_2)}{(m_1 - m_2)} \times \frac{100}{(100 - w_a)} \times 100 \quad (4.2)$$

Hierbei stellt  $m_3$  die Masse des verbleibenden mineralischen Rückstands (inkl. Probenschale),  $m_2$  die Masse der leeren Schale und  $m_1$  die Masse des unverbrannten Brennstoffs (inkl. der Schale) dar. Die Variable  $w_a$  bezeichnet den analysefeuchten Wassergehalt, d. h. den Wassergehalt einer gemahlene Laborprobe, die auch für die Bestimmung des Aschegehalts verwendet wird.

Bei der nach der Verbrennung anfallenden Asche gibt es große Unterschiede in ihrer Masse, ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung und daraus resultierend in ihren Eigenschaften. Ein hoher Ascheanteil kann als problematisch angesehen werden, da die Asche meist kostenpflichtig entsorgt werden muss. Weiterhin können hohe Mengen hochreaktiver Elemente (z. B. Chlor) in der Asche zu Korrosion und Verschleiß der Feuerungen und der nachgeschalteten Bauteile führen. Vor allem ein Aufschmelzen der Asche bei hohen Brennraumtemperaturen und die daraus resultierende Schlackebildung können mechanische Störungen bis hin zum Ausfall der Anlage bedingen. Das Ascheschmelzverhalten wird durch hohe Gehalte an Kalium und Silizium im Brennstoff negativ beeinflusst.

Der für Waldrestholzhackschnitzel typische Aschegehalt liegt durchschnittlich bei ca. 2 bis 3 m-%. Holzhackschnitzel aus Energierundholz weisen aufgrund geringerer Anteile an Rinde oder Nadeln bzw. Blättern meist niedrigere Werte von ca. 1 bis 1,5 m-% auf. Bei starker Verschmutzung durch mineralische Anhaftungen kann ein Aschgehalt > 10 m-% entstehen [40] [52].

### 4.1.4 Heizwert

Bei der Verbrennung von Biomasse wird Energie freigesetzt, die meist in Form von Wärme genutzt wird. Wie viel Energie ein Brennstoff bei der Verbrennung freisetzen kann, wird durch den Heizwert ( $H_u$  in MJ kg<sup>-1</sup>) angegeben. Hierbei unterscheidet man zwischen dem unteren und dem oberen Heizwert, wobei der untere Heizwert ( $H_u$ ) die nutzbare Energie darstellt, ohne den Anteil, der bei der Verbrennung für die Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers notwendig ist. Der obere Heizwert, auch Brennwert genannt, schließt diese im Wasserdampf enthaltene Kondensationswärme mit ein. Da sie jedoch nur mit der sogenannten Brennwerttechnik genutzt werden kann, die

aktuell nur einen geringen Marktanteil aufweist, wird im Folgenden vor allem auf den unteren Heizwert eingegangen.

Der untere Heizwert ( $H_u$ ) ist linear abhängig vom Wassergehalt der Brennstoffe. Er wird deshalb üblicherweise auf eine absolut trockene, wasserfreie Bezugsbasis angegeben ( $H_{u.wf}$ ), da er so für jeden beliebigen Wassergehalt umgerechnet werden kann [52] [75] [80]:

$$H_u = \frac{H_{u.wf} \times (100 - w_a) - 2,443 \times w_a}{100} \quad (4.3)$$

Dabei steht 2,443 für die Konstante, resultierend aus der Verdampfungswärme des Wassers in  $\text{kJ kg}^{-1}$  bezogen auf  $25^\circ\text{C}$  [52] und  $w_a$  für den analysefeuchten Wassergehalt (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Typische wasserfreie Heizwerte für Holzhackschnitzel liegen bei ca. 18,5 bis 19,8  $\text{MJ kg}^{-1}$ . Nadelholz hat i. d. R. höhere Heizwerte als Laubholz. Ebenso hat Waldrestholz häufig einen höheren Heizwert als Energierundholz. Dies lässt sich auf die Anteile an Nadeln und Rinde bzw. auf höhere Gehalte an Harz und Lignin zurückführen, die tendenziell höhere Heizwerte als beispielsweise Zellulose oder Hemizellulose aufweisen.

In vorangegangenen Untersuchungen und Forschungsprojekten von TFZ und LWF hat sich gezeigt, dass der untere Heizwert von Holzhackschnitzeln auf wasserfreier Bezugsbasis ( $H_{u.wf}$ ) abhängig von der Baumart (Laub- oder Nadelholz), dem Sortiment (Energierundholz, Waldrestholz) und dem Grad der Verschmutzung mit Mineralboden ist. Während der Lagerung der Brennstoffe in Mieten ändert sich der Heizwert i. d. R. nicht [60] [61].

#### 4.1.5 Partikelgrößenverteilung, Partikelform und Feinanteil

Die Partikelgröße, die Partikelform und der Feinanteil beeinflussen zunächst die Förderfähigkeit der Brennstoffe. So kann es beispielsweise aufgrund hoher Anteile an Überlängen zur Brückenbildung im Lager oder zu Blockaden der Förderschnecken vom Bunker in die Feuerung kommen. Zudem beeinflussen die Parameter direkt das Verbrennungsverhalten, da sie sich unmittelbar auf die Ausformung des Glutbetts auswirken können. Auch die Lagerfähigkeit der Brennstoffe wird über die Partikelgröße und die Partikelform beeinflusst. Beispielsweise ist die Belüftung von Lagermieten abhängig von der Grobkörnigkeit der Partikel und damit von der Porigkeit der Schüttung. Eine raue Partikeloberfläche führt zu einer zusätzlichen Erhöhung des Belüftungswiderstands. Ebenso bieten kleine, zerfaserte Partikel größere Angriffsflächen für holzersetzende Mikroorganismen als grobe, scharfkantige Holzstücke.

Die Größe und die Form von Holzhackschnitzeln hängen zunächst vom Rohmaterial ab. Hohe Nadelanteile im Brennstoff bedingen beispielsweise häufig hohe Feinanteile, wo-

hingegen hohe Anteile an feinen Ästen beim Hacken häufig zu einem hohen Anteil an Überlänge führen. Vor allem jedoch die Art der verwendete Hackmaschine (Trommel-, Scheibenrad- oder Schneckenhacker), der Maschinentyp (Hersteller, Modell) sowie die Maschineneinstellungen (Messerschärfe, Austragssystem, Siebkorb etc.) sind maßgeblich für die Größe und die Form der Partikel verantwortlich. Entsprechend weit streut die Partikelgrößenverteilung in der Praxis [80].

#### 4.1.6 Qualitätsnorm für Holzhackschnitzel

Die aktuell gültige Produktnorm für biogene Festbrennstoffe ist die DIN EN ISO 17225 aus dem Jahr 2014. Durch ihre Veröffentlichung verloren Normen wie die die ÖNORM M 7133 [96] und die DIN EN 14961 ihre Gültigkeit. Die DIN EN ISO 17225 ist in sieben Teile untergliedert. In Teil 1 (DIN EN ISO 17225-1) werden verwendbare Rohmaterialien hinsichtlich Pflanzenart, Herkunft und Sortiment klassifiziert. Daneben werden typische Werte für die Brennstoffeigenschaften der Rohstoffe, wie der Heizwert, der Aschegehalt oder die inhaltsstoffliche Zusammensetzung, angeben. In Teil 1 der Norm erfolgt zudem die Definition allgemeiner Spezifikationen für die unterschiedlichen Brennstoffarten.

Eine Einordnung von Holzhackschnitzeln als Brennstoff in verschiedene, hochwertige Produktklassen (Klasse A1, A2, B1 und B2) ist in Teil 4 der Norm (DIN EN ISO 17225-4) beschrieben. Genau definiert werden hier unter anderem die Partikelgrößenverteilung, der Aschegehalt, der Wassergehalt, die Schüttdichte oder die inhaltsstoffliche Zusammensetzung. Fokus von Teil 4 ist die Definition hochwertiger Brennstoffklassen für die Anwendung in kleinen bis mittelgroßen Feuerungen. Durch Anwendung der DIN EN ISO 17225-4 soll Brennstoffproduzenten, Kesselherstellern und Anlagenbetreibern eine Hilfestellung gegeben werden, um sich auf einheitliche Brennstoffqualitäten für einen störungsfreien und emissionsarmen Feuerungsbetrieb zu einigen. Die DIN EN ISO 17225-4 dient u. a. als Grundlage für moderne Brennstoffzertifizierungen (beispielsweise „ENplus Holzhackschnitzel“). Ihre Anwendung ist grundsätzlich zunächst immer freiwillig. Eine gesetzliche Verpflichtung besteht derzeit nicht.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 3, Tabelle 4) ist ein Auszug der geltenden Produktklassen der DIN EN ISO 17225-4 und der darin enthaltenen Grenzwerte für ausgewählte Brennstoffparameter wiedergegeben.

*Tabelle 3: Partikelgrößenklassen für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug ohne maximale Querschnittsfläche)*

	Hauptanteil ( $\geq 60$ m-%) in mm	Feinanteil ( $< 3,15$ mm) in m-%	Grobanteil in m-% (Länge der Partikel in mm)	Maximale Partikellänge in mm
P16S	3,15 mm – 16 mm	$\leq 15$ m-%	$\leq 6$ m-% ( $> 31,5$ mm)	$\leq 45$ mm
P31S	3,15 mm – 31,5 mm	$\leq 10$ m-%	$\leq 6$ m-% ( $> 45$ mm)	$\leq 150$ mm
P45S	3,15 mm – 45 mm	$\leq 10$ m-%	$\leq 10$ m-% ( $> 63$ mm)	$\leq 200$ mm

**Tabelle 4:** Brennstoffspezifikationen A1 bis B2 für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (Auszug ohne chemische Inhaltsstoffe) (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)

Eigenschafts- klasse	A1	A2	B1	B2
Herkunft und Quelle nach DIN EN ISO 17225-1	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrest- holz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrest- holz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes naturbelassenes Holz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes naturbelassenes Holz 1.2 Industrie- restholz 1.3.1 Chemisch unbehandeltes Gebrauchtholz
Partikelgröße $P$ (mm)	Siehe DIN EN ISO 17225-4 „Partikelgrößenklassen“ (Tabelle 3)			
Wassergehalt $M$ (m-%)	M10 $\leq$ 10 M25 $\leq$ 25	M35 $\leq$ 35	Höchstwert ist anzugeben	
Aschegehalt $A$ (m-%, wf)	A1.0 $\leq$ 1,0	A1.5 $\leq$ 1,5	A3.0 $\leq$ 3,0	
Schüttdichte $BD$ (kg m <sup>-3</sup> , ar)	BD150 $\leq$ 150 BD200 $\leq$ 200 BD250 $\leq$ 250	BD150 $\leq$ 150 BD200 $\leq$ 200 BD250 $\leq$ 250 BD300 $\leq$ 300	Höchstwert ist anzugeben	
Heizwert $H_u$ (MJ kg <sup>-1</sup> oder kWh kg <sup>-1</sup> , ar)	Kleinster Wert ist anzugeben		Kleinster Wert ist anzugeben	

## 4.2 Bereitstellung und Lagerung von Holzhackschnitzeln

In diesem Unterkapitel soll ein Überblick über gängige Prozessketten für die Produktion von Waldhackschnitzeln mit dem Schwerpunkt auf typischen Holzhackschnitzel-Lagerungsarten, wie sie in der Praxis anzutreffen sind, gegeben werden. Daneben wird auf die in der Lagermiete ablaufenden Prozesse und auf mögliche Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltrisiken eingegangen.

### 4.2.1 Bereitstellungsketten für Holzhackschnitzel aus Waldholz

Holzhackschnitzel aus Waldholz durchlaufen mehrere Prozessschritte, bis sie als Brennstoff für den Endabnehmer zur Verfügung stehen (Abbildung 1). Die Aneinanderreihung dieser Arbeitsschritte nennt man Bereitstellungskette. Für Holzhackschnitzel ist eine Vielzahl an Bereitstellungsketten in der Praxis anzutreffen, bedingt durch die unterschiedlichen Rohmaterialien, Maschinen und die Reihenfolge der Prozessschritte.

Im Folgenden soll exemplarisch auf die typische Holzhackschnitzelbereitstellung im Rahmen einer Durchforstung eingegangen werden. Diese Prozessketten sind häufig in bayerischen Wäldern anzutreffen [80].

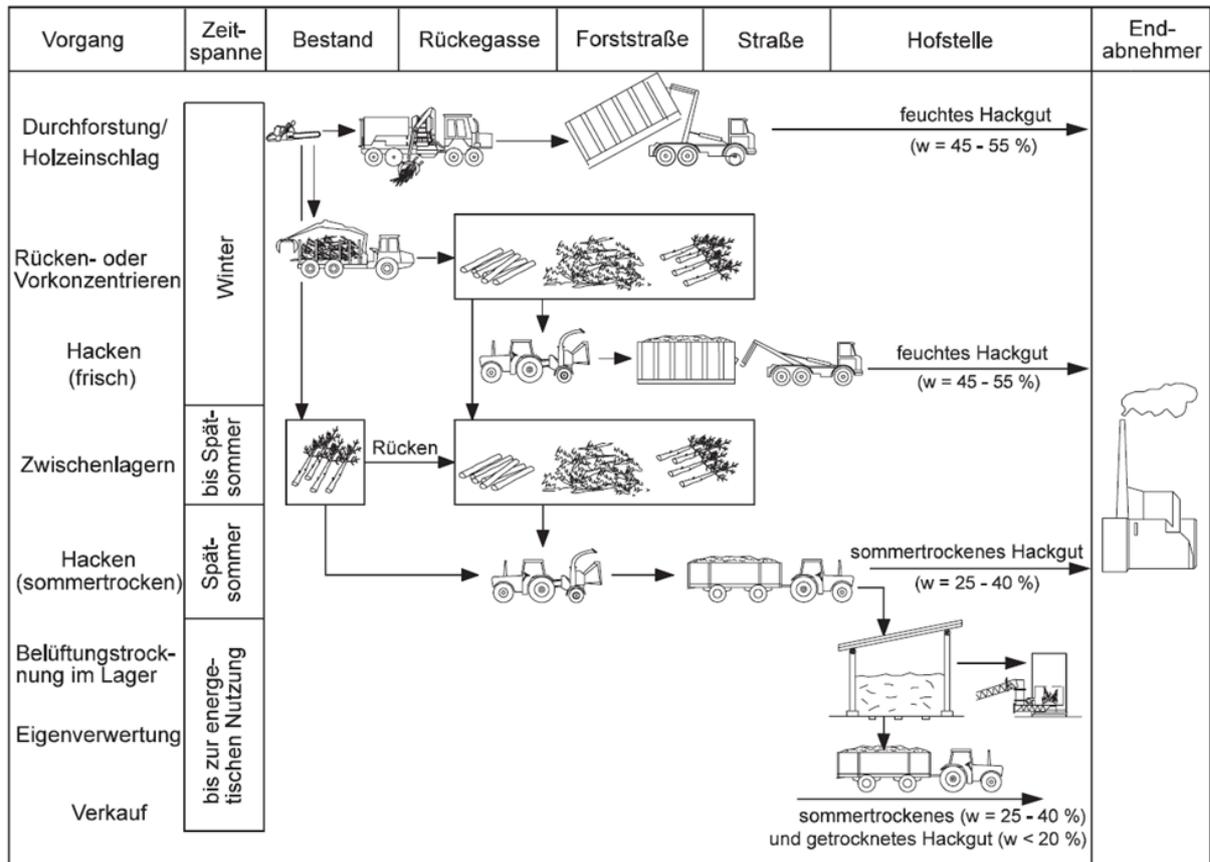


Abbildung 1: Beispiele für Verfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln [54]

Zu Beginn erfolgt die Ernte der Bäume, beispielsweise motormanuell, d. h. mittels einer Motorsäge, oder vollautomatisiert, beispielsweise mit einem Harvester. Die gefällten und teilweise schon aufgearbeiteten Holzsortimente werden zu einem Sammelplatz (Polter) transportiert (Rückung). Hierbei handelt es sich um Lagerplätze direkt an einer mit Lkw befahrbaren Waldstraße. Die Sortimente, die nicht für eine stoffliche Nutzung vorgesehen sind, werden meist separat in sogenannten Hackholzpoltern gesammelt. Häufig werden sie direkt vor Ort gehackt [46] [39] [80]. Zum Einsatz kommen v. a. mobile Trommelhacker, seltener dagegen Scheibenrad- und Schneckenhacker. Vor dem Hacken besteht die Möglichkeit, das ungehackte Material über einen gewissen Zeitraum, teilweise bis zu mehrere Monate, am Stück zu lagern, um eine Vortrocknung der Brennstoffe zu erreichen und den Anteil an Blättern, Nadeln, Rindenpartikeln oder mineralischen Anhaftungen durch Abfallen zu verringern [39] [61]. Dabei muss jedoch die regionale Borkenkäferbefall-Situation im Einzelfall beachtet werden. Im Zweifel muss das Hacken aus Waldschutzgründen der Poltertrocknung vorgezogen werden.

Nach dem Hacken kann der Brennstoff entweder zu einem Lagerplatz, zu einer Aufbereitungsanlage (beispielsweise für eine anschließende Siebung oder technische Trocknung) oder direkt zu einem Endabnehmer geliefert werden.

#### **4.2.2 Lagerung von Holzhackschnitzeln in Mieten und Gebäuden**

Die Lagerung ist oft ein wesentlicher Bestandteil der Bereitstellungskette von Holzhackschnitzeln. Sie ermöglicht beispielsweise den zeitlichen Versatz zwischen der Erzeugung und der Nutzung der Brennstoffe. Ebenso erlaubt sie ein ökonomisches Reagieren auf schwankende Brennstoffpreise. Weitere Gründe für die Lagerung von Holzhackschnitzeln ist eine mögliche Qualitätssteigerung der Brennstoffe, beispielsweise durch natürlich ablaufende Trocknungsprozesse im Haufwerk [60] [84].

Bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln lässt sich zunächst zwischen der Lagerung im Freien (beispielsweise auf Schotter oder einer versiegelten Fläche) und der Lagerung in Gebäuden unterscheiden. Bei einer Lagerung im Freien kann das Material mit einem Regenschutz, z. B. mit einem diffusionsoffenen Vlies, abgedeckt oder ohne eine solche Abdeckung gelagert werden (Abbildung 2) [39] [60] [61]. Bei der Lagerung in Gebäuden ist die Verwendung eines Vlieses dagegen nicht üblich. Daneben unterscheidet man Lagermieten hinsichtlich ihrer Größe, Ausrichtung oder Form, aber auch hinsichtlich der Dauer der Lagerung, der Lagersaison (Winter, Sommer) sowie des Lagerorts, beispielsweise im Wald, auf einer landwirtschaftlichen Freifläche, am Betriebshof von Brennstoffhändlern oder direkt am Heizwerk [60].

Vor allem bei einer Lagerung im Freien sollte auf einen befestigten, aber nicht versiegelten Boden geachtet werden, um die Holzhackschnitzel nicht mineralisch durch einen Bodeneintrag zu verschmutzen, sowie auf eine wind- und sonnenexponierte Lage für eine bessere Brennstofftrocknung. Zudem bietet sich für Lagermieten eine dachförmige Form an, um Niederschlag bestmöglich seitlich ableiten zu können und eine effektive Konvektion (= Durchlüftung) zu erzielen.



*Abbildung 2: Freilandlagerung von Holzhackschnitzeln in Lagermieten (links) und von ungehacktem Waldrestholz (rechts) in einem Feldversuch von TFZ und LWF. Die Brennstoffe wurden teilweise abgedeckt.*

Die einzelnen Varianten unterscheiden sich teils deutlich hinsichtlich der bei der Lagerung entstehenden Kosten und hinsichtlich der Veränderung der Brennstoffqualität durch die in der Lagermiete ablaufenden Prozesse. Die Wahl der Methode richtet sich häufig nach ökonomischen Aspekten, den Gegebenheiten vor Ort sowie nach den Ansprüchen an den Brennstoff nach der Lagerung.

### **4.2.3 Prozesse in Lagermieten**

Bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln kommt es je nach Baumart, Sortiment und Wassergehalt zu einem Abbau der Biomasse aufgrund mikrobieller Wachstumsprozesse. Gleichzeitig erwärmt sich die Miete durch die mikrobielle Aktivität. Als Folge verringert sich die eingelagerte Trockenmasse und es kommt zu einer Änderung der Brennstoffqualität [39] [52]. Dies kann unter ungünstigen Bedingungen zu Trockenmasseverlusten von 3 bis 4 m-% pro Monat führen [39] [60] [84].

Die mikrobielle Aktivität in der Lagermiete hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst ist der Wassergehalt des Brennstoffs relevant. Der optimale Wassergehalt für mikrobielles Wachstum liegt laut Literatur bei 30 bis 50 m-% [68] (Abbildung 3). Folglich ist bei der Lagerung frischer Holzhackschnitzel mit einer höheren mikrobiellen Aktivität als bei getrockneten Brennstoffen zu rechnen. Als zweiter Faktor ist das verfügbare Nährstoffangebot zu nennen. Waldrestholzhackschnitzel mit hohen Gehalten an Nadeln, Blättern

oder Rinde weisen höhere Anteile leicht verfügbarer Nährstoffe auf als beispielsweise reines Energierundholz [39]. Gleichzeitig bieten viele kleine Partikel eine große Oberfläche im Verhältnis zum Volumen für die Zersetzung durch Bakterien und Pilze. Dies begünstigt vor allem schnellwachsende Mikroorganismen (sogenannte Rapid-Growth-Strategen, auch r-Strategen genannt), wohingegen bei geringen Nährstoffangeboten vor allem k-Strategen („continuous growth“, d. h. kontinuierlich wachsende Arten) begünstigt sind. Je nach Aktivität kommt es dabei zu einem schnellen, jedoch eher kurzen Anstieg der Miettemperatur auf ca. 60 bis 70 °C (v. a. r-Strategen) oder einem langsamen und niedrigeren Temperaturanstieg (v. a. k-Strategen). Als optimale Temperatur für mikrobielles Wachstum wird in der Literatur ein Wertebereich zwischen 20 und 35 °C angegeben (Abbildung 3). Weitere das mikrobielle Wachstum beeinflussende Parameter sind beispielsweise der pH-Wert oder das Sauerstoffangebot (vgl. Unterkapitel 7.2).

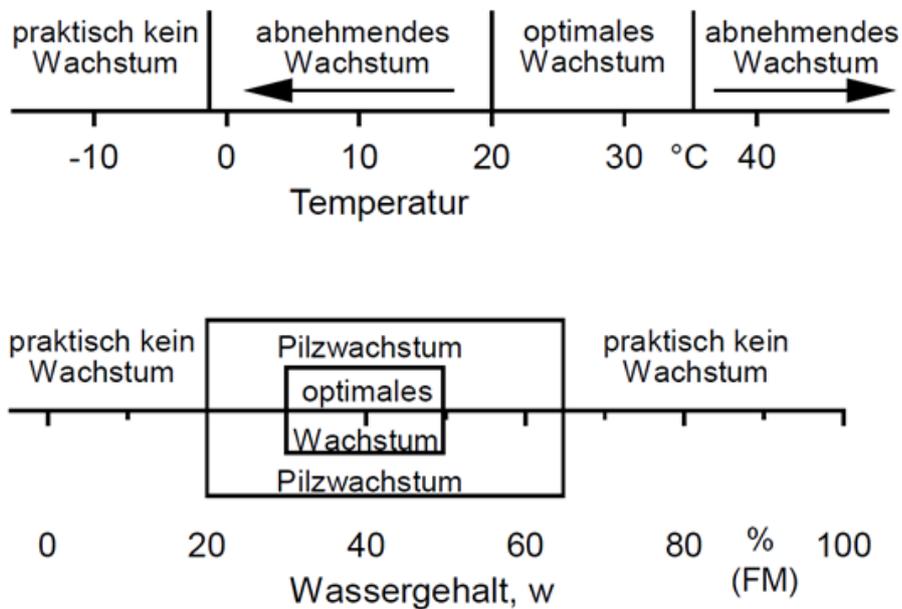


Abbildung 3: Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (nach [68])

Das mikrobielle Wachstum beeinflusst neben Trockenmasseverlusten direkt die Qualität der Brennstoffe. Durch den Temperaturanstieg in der Miete kann es zu einer Trocknung der Holzhackschnitzel kommen. Diese kann unter optimalen Bedingungen die Energieverluste durch die Zersetzung der Holzhackschnitzel teilweise sogar kompensieren [61]. Daneben können sich je nach Zersetzungsgrad der Aschegehalt, der Heizwert, die Partikelgrößenverteilung, die Partikelform oder die Gehalte chemischer Inhaltsstoffe durch den Abbau der Biomasse verändern [83] [84].

Neben dem Verlust an Trockenmasse und der Änderung der Brennstoffqualität kann es bei der Lagerung frischer Holzhackschnitzel zu einer Reihe von umwelt-, gesundheits- und sicherheitsrelevanten Risiken kommen. Hierunter fallen u. a.:

- Selbstentzündung der Miete,
- Freisetzung von Bioaerosolen (z. B. Pilzsporen),
- Stauffreisetzung bei Verladeprozessen,
- Freisetzung klimarelevanter Emissionen,
- Geruchsbelästigung,
- Sickerwasserausträge.

Bei der Lagerung frischer Holzhackschnitzel besteht das Risiko der **Selbstentzündung**. Kann die durch mikrobielle Aktivität auf ca. 60 bis 70 °C erwärmte Luft aus der Miete nicht entweichen, beispielsweise aufgrund hoher Schütthöhen oder aufgrund einer Verdichtung der Miete durch Befahrung, kommt es mittelfristig zu einer langsamen, aber konstanten zusätzlichen Temperaturerhöhung aufgrund physikalischer und chemischer Prozesse, wie Wassertransport, Adsorption, Hydrolyse, chemische Oxidation und Verkohlung. Die Oxidation von Holzbestandteilen beginnt ab 40 °C und wird im Allgemeinen zum dominierenden Prozess bei Temperaturen über 50 °C. So können langfristig Temperaturen von über 100 °C erreicht werden, wodurch es zum Schwelbrand und (bei Sauerstoffzutritt, z. B. beim Abbau der Miete) zur Selbstentzündung kommen kann [39].

Durch das Wachstum von Pilzen und anderen Mikroorganismen entstehen potenziell toxische **Bioaerosole**, beispielsweise Pilzsporen, die über die Atemwege von Menschen aufgenommen deren Gesundheit negativ beeinträchtigen können [39]. Auch feine Holzpartikel (**Staub**) können bei Verladeprozessen aufgewirbelt und über die Lunge aufgenommen werden.

Beim Abbau von Biomasse durch Mikroorganismen entstehen **klimarelevante Gase**. Neben CO<sub>2</sub> als Hauptprodukt des aeroben Abbaus, können vor allem beim anaeroben Abbau andere Produkte, beispielsweise Methan (CH<sub>4</sub>), freigesetzt werden. Methan ist, bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren, 28 Mal klimaschädlicher als CO<sub>2</sub>. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Methanbildungsraten in Biomasselagermieten sich teils deutlich unterscheiden und u. a. von der Temperatur, dem Lagerort und dem Zeitpunkt der Lagerung abhängig sind [65] [10] [116]. Verantwortlich für die Methanbildung sind sogenannte methanogene, also methanbildende Mikroorganismen. Diese sind meist thermophil und haben ihr Optimum bei 40 bis 65 °C. Die Methanogenese läuft vor allem im anaeroben Bereich, beispielsweise im Mieteninneren ab [3] [65]. Verschiedene Forschungsvorhaben sind in der Vergangenheit jedoch zu dem Schluss gekommen, dass die in der Mitte großer Lagermieten stattfindende Methanbildung keine hohe Relevanz hat, da das auftretende Methan beim Ausströmen aus der Miete durch sogenannte methanotrophe Bakterien, unter der Bedingung, dass O<sub>2</sub> vorhanden ist, fast vollständig zu CO<sub>2</sub> oxidiert wird [3] [65].

Neben klimarelevanten Gasen kann es bei der Lagerung zur Emission flüchtiger Bestandteile, beispielsweise von Monoterpenen aus Rinde, kommen. Dies kann eine **Geruchsbelästigung** v. a. in bewohnten Gebieten bedingen.

Bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln können organische und mineralische Stoffe in gelöster oder fester Form mit dem **Sickerwasser** aus Lagermieten ausgetragen werden und in den Boden, möglicherweise auch in Oberflächengewässer oder in das Grundwasser gelangen. Bei der gewerblichen Lagerung auf dem Betriebshof von Brennstoffproduzenten, -aufbereitern und -händlern könnte Sickerwasser zudem als Abwasser in die öffentliche Kanalisation gelangen und sich dort mit anderen Abwässern vermischen. Inwieweit die Austräge aus Holzhackschnitzelmieten aus Sicht des Umweltschutzes als bedenklich einzuordnen sind, ist noch nicht abschließend geklärt.

Um umwelt-, gesundheits- und sicherheitsrelevante Risiken bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln zu minimieren, wird aktuell an einer VDI-Norm (VDI 3464 Blatt 2: „Lagerung, Aufbereitung und Umschlag von Holzhackschnitzeln für die energetische Nutzung im privaten und gewerblichen Bereich – Anforderungen unter Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekten“) gearbeitet. Darin sollen praxisorientierte Lösungen für die genannten Herausforderungen dargestellt werden. Die Ergebnisse der Studien aus dem vorliegenden Bericht gehen direkt in diese Normungsarbeit ein.

## 5 Hackholzlagerung mit und ohne Abdeckung

HOFMANN, N.; SCHULMEYER, F.; RIEBLER, M.; KUPTZ, D.; BURGER, F.

### 5.1 Problem- und Zielstellung

Viele Waldbesitzer lagern ihr Energieholz zunächst in ungehacktem Zustand, wie eine Umfrage der LWF im Vorgängerprojekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzzellagerung“ (EW/15/53) bestätigt hat [60]. Die Lagerungsdauer dieser Hackholzpolter beläuft sich demnach i. d. R. auf einen Sommer (im Mittel vier Monate). Die Vorteile des Lagerns im ungehackten Zustand liegen in der besseren Hackerauslastung durch die Vorkonzentrierung des Hackholzes, in der im Vergleich zur Lagerung von Holzhackschnitzeln potenziell schnelleren Trocknung, falls die Polter an einer sonnigen, windexponierten Stelle gelagert werden, sowie in einer geringeren Trockenmassezersetzung des Holzes durch Mikroorganismen. Außerdem können während der Lagerung Nadeln, Feinreisig, Rinde oder Mineralbodenanhaftungen abfallen, wodurch sich der Feinanteil und der Aschegehalt der Brennstoffe verringern und die Brennstoffqualität zusätzlich gesteigert wird [60].

Erfahrungen v. a. aus Skandinavien zeigen, dass der Trocknungseffekt verstärkt werden kann, wenn die Polter auf der Oberseite mit einer Folie bedeckt werden, die den Niederschlag weitgehend abhält. Solche hauptsächlich aus Papier bestehenden Abdeckfolien werden beispielsweise von der finnischen Firma Walki Group hergestellt. Wissenschaftliche Studien mit Polterabdeckpapieren wurden bisher hauptsächlich in Skandinavien durchgeführt. In den dortigen Studien nahm der Wassergehalt während einer Lagerungsdauer von acht bis elf Monaten unter Abdeckfolie um elf bis 15 Prozentpunkte stärker ab als ohne Abdeckung [94] [66]. Eine Studie aus Österreich, bei der jedoch Energieholzgebündel im Gebirge gelagert wurden, führte ebenfalls zu einer besseren Trocknung unter Abdeckfolie [69]. Für bayerische Verhältnisse gibt es nur eine einzelne Fallstudie der Technischen Universität München [44]. Mit den Ergebnissen dieser Studie lassen sich einige relevante Fragestellungen jedoch noch nicht ausreichend beantworten, da der Fokus vorrangig auf die Wassergehaltsunterschiede zwischen abgedeckten und nicht abgedeckten Poltern gerichtet war. Trockenmasseverluste, Aschegehalt, Heizwert etc. wurden nicht erfasst. Zudem legen die inzwischen gewonnenen Erfahrungen mit ungehackten Poltern nahe, dass die Methode der Probenahme zur Bestimmung des Wassergehalts durch Heraussägen einzelner Aststücke als nicht repräsentativ anzusehen ist.

Ziel dieses Arbeitspakets war es daher, die Wirkung eines kommerziell erhältlichen Abdeckpapiers auf die Änderung der Brennstoffqualität und die Trockenmasseverluste von Hackholzpoltern während der Lagerung mit einem möglichst umfassenden und repräsentativen Versuchsdesign zu untersuchen. Etwaige Vorteile, beispielsweise eine verbesserte Trocknung, sollten den höheren Kosten gegenübergestellt werden.

## 5.2 Material und Methoden

Die Versuche wurden von Mitte Mai bis Mitte Dezember 2017 auf einem Lagerplatz der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. nahe der Ortschaft Putzbrunn (südöstlich von München) durchgeführt. Das Versuchsmaterial war Waldrestholz (überwiegend Fichte), das aus der Jungdurchforstung eines rund 25-jährigen Fichtenbestands stammte. Insgesamt wurden sechs Hackholzpolter mit einem Volumen von jeweils ca. 60 m<sup>3</sup> angelegt, die zu drei Paaren mit je einem offen gelagerten und einem mit „Walki Biomass Cover“ abgedeckt gelagerten Polter angeordnet wurden (Abbildung 4). Das untersuchte Abdeckpapier ist ein Laminat auf Papierbasis der finnischen Fima Walki Group Oy.



*Abbildung 4: Lagerplatz in Putzbrunn nach dem Aufbau der Polterversuche. Jeweils drei Polter ohne Abdeckung und zum Vergleich drei Polter mit Abdeckung (Abdeckpapier: Walki Biomass Cover, Walki Group Oy)*

Bei der Einlagerung wurde in einem aufwendigen Verfahren Referenzmaterial zur Beprobung des Ausgangszustands für jedes Polter gewonnen. Mithilfe eines Baggers wurden die ausgewählten Polter im Wald zangenweise abwechselnd in zwei Container geladen (Abbildung 5), wobei das Material aus dem einen Container auf dem Lagerplatz für den Versuch wieder gepoltert und das Material aus dem anderen Container direkt gehackt, homogenisiert und hinsichtlich Wassergehalts, Schüttdichte, Partikelgrößenverteilung, Aschegehalts und Heizwerts nach aktuellen ISO-Normen für Holzhackschnitzel [32] [29] [30] [31] [35] analysiert wurde (vgl. Unterkapitel 4.1 und Abschnitt 6.2.3). Mit diesem Verfahren konnte sichergestellt werden, dass der Einlagerungszustand des Hackholzes für jeden Polter so genau wie möglich bestimmt wurde.



*Abbildung 5: Aufladen des Waldrestholzes im Wald mit einem Bagger zangenweise abwechselnd in zwei Hakenliftcontainer mit je 40 m<sup>3</sup> Volumen*

Alle Container mit einzulagerndem Waldrestholz wurden auf der Fahrt zum Lagerplatz mit einer geeichten Überfahrwaage (Messauflösung: 20 kg) beim nahegelegenen Kieswerk gewogen, um auch die Trockenmasse der Polter berechnen zu können. Nach zehn Wochen wurde das erste Polterpaar (abgedeckt/offen) gehackt, gewogen, homogenisiert und wie bei der Einlagerung beprobt. Bei allen Probenahmeterminen wurde derselbe 395 kW starke Lkw-Aufbauhacker (HEM 582 R, Jenz GmbH) mit einem 80 mm × 80 mm Siebkorbeinsatz, scharfen Messern und einem Förderbandaustag verwendet. Das von den Poltern abgefallene bzw. nicht vom Lkw-Ladekran des Hackers aufgegriffene Material (hauptsächlich Zweige und Nadeln) wurde zusätzlich getrennt händisch aufgesammelt und gewogen (Abbildung 6). Um dies zu erleichtern, wurden alle Polter beim Aufbau auf einem wasserdurchlässigen Bodenschutzgewebe platziert.



**Abbildung 6:** Lagerplatz in Putzbrunn während der ersten Probenahme. Oben: Hacken mitsamt Walki Biomass Cover. Unten links: Aufsammeln der abgefallenen bzw. liegen gebliebenen Biomasse für separates Verwiegen. Unten rechts: „gesäuberter“ Lagerplatz nach der ersten Probenahme. Das Verfahren der Probenahme erfolgte somit analog zu dem Vorgehen im bereits abgeschlossenen Projekt [60].

Die beiden weiteren Polterpaare wurden ebenfalls im Zehn-Wochen-Intervall, das letzte Mitte Dezember 2017, beprobt. Hierbei wurden zusätzlich Wassergehaltsanalysen am händisch aufgesammelten Material durchgeführt, um den Trockenmasseverlust in Verlust durch Zersetzung und Verlust durch Abfallen/Liegenlassen unterscheiden zu können. Das Beprobungsintervall wurde von ursprünglich geplanten vier bis sechs Wochen auf zehn Wochen verlängert, da die Wirkung der Abdeckung auch bei kühlerer und eventuell feuchterer Witterung im Herbst untersucht werden sollte (Verhinderung einer Wiederbefeuchtung nach dem Sommer).

Entsprechend dem Versuchsdesign wurden die drei Polter je Variante als fortlaufende Reihe behandelt. Es wurde davon ausgegangen, dass sich innerhalb der Varianten alle Polter weitgehend gleich entwickelten und sich das Ausgangsmaterial kaum unterschied.

Ein unbenutztes Stück des Abdeckpapiers wurde inhaltsstofflich analysiert (Eurofins Umwelt Ost GmbH und LWF-eigenes Labor), um herauszufinden, ob mit Auswirkungen auf die Emissionen bei der Verbrennung zu rechnen ist.

### 5.3 Ergebnisse und Diskussion

#### 5.3.1 Witterung

Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug im Versuchszeitraum  $12,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die Niederschlagssumme  $688,4\text{ mm}$  (Abbildung 7). Dies entsprach relativ genau den Werten des langjährigen Mittels, wie der Vergleich mit Daten der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Oberhaching-Laufzorn,  $11\text{ km}$  entfernt) zeigte [24]. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag auf dem Lagerplatz bei  $0,2\text{ m s}^{-1}$  und die maximale Windgeschwindigkeit bei  $3,7\text{ m s}^{-1}$ , was eine relativ windgeschützte Lage kennzeichnet.

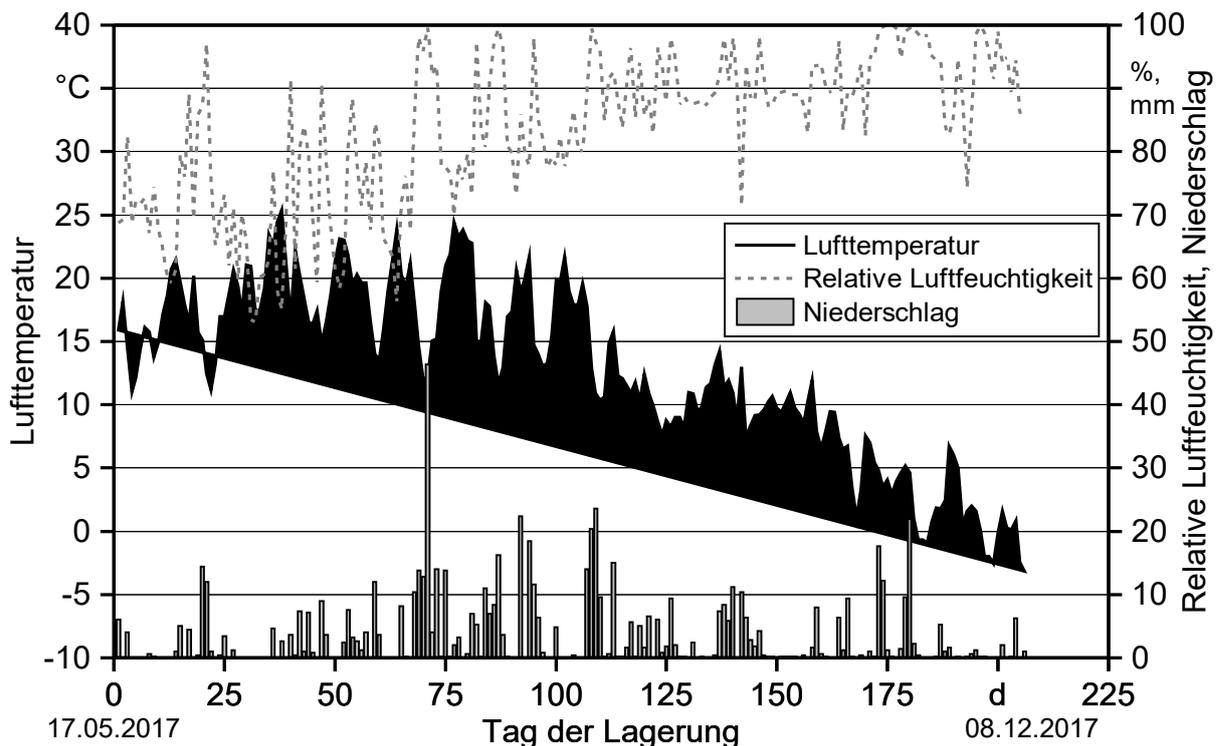


Abbildung 7: Witterungsdaten während des Polterlagerungsversuchs auf dem Lagerplatz Putzbrunn

Die Witterung unterschied sich im Zeitraum zwischen den jeweiligen Beprobungsintervallen hinsichtlich der Lufttemperatur und des Niederschlags (Tabelle 5). Die höchste mittlere Lufttemperatur wurde zwischen der Einlagerung und der ersten Probenahme in den

Monaten Mai bis Juli gemessen. Gleichzeitig war es in diesem Zeitraum verhältnismäßig trocken. Die höchste Niederschlagsmenge fiel zwischen der ersten und zweiten Probenahme in den Monaten Juli bis September. Die mittlere Lufttemperatur sank in dieser Phase bereits etwas. Von Oktober bis Dezember, zwischen der zweiten und dritten Probenahme, kam es schließlich zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Lufttemperatur bei einer etwas niedrigeren Niederschlagssumme als im ersten Intervall. Während der Wassergehalt bei den offen gelagerten Poltern sowohl durch den Niederschlag als auch durch die Lufttemperatur beeinflusst wurde, war bei den abgedeckten Poltern die Lufttemperatur die bestimmende Größe (siehe Abschnitt 5.3.2).

*Tabelle 5: Niederschlagssummen und mittlere Lufttemperaturen auf dem Lagerplatz zwischen den Probenahmeterminen. Einlagerung = 17.05.2017, PN 1 = 24.07.2017, PN 2 = 05.10.2017, PN 3 = 11.12.2017*

	Niederschlagssumme in mm	Mittlere Lufttemperatur in °C
Einlagerung bis PN 1	163,4	18,2
PN 1 bis PN 2	391,8	14,5
PN 2 bis PN 3	133,2	4,6

### 5.3.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Einlagerung lag mit knapp über 50 m-% bei allen sechs Poltern in einem normalen Bereich für waldfisches Holz [80]. Der Vergleich der Wassergehalte zwischen Ein- und Auslagerung zeigte bei allen Poltern statistisch signifikante Verringerungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test,  $p \leq 0,05$ ), außer beim offen gelagerten und erst im Dezember gehackten Polter (Abbildung 8).

In den ersten zehn Wochen der Lagerung nahm der Wassergehalt aufgrund der geringen Niederschlagsmenge und der hohen Lufttemperatur deutlich ab. Beim offen gelagerten Polter sank er auf  $35,0 \pm 1,1$  m-%, beim abgedeckt gelagerten Polter sogar auf  $27,8 \pm 1,0$  m-% (Abbildung 8). In den folgenden zehn Wochen führten hohe Niederschlagsmengen beim offen gelagerten Polter zu einer starken Wiederbefeuchtung (Wassergehalt nach insgesamt 20 Wochen:  $44,5 \pm 2,1$  m-%), wohingegen das abgedeckt gelagerte Polter nahezu keine Wassergehaltsänderungen zeigte.

Im Vergleich mit den Polterlagerungsversuchen, die im Zuge des Vorgängerprojekts im Sommer 2015 durchgeführt wurden, zeigte sich im aktuellen Versuch nach fünf Monaten Lagerungsdauer (hier PN 2) beim offen gelagerten Waldrestholz eine etwas schwächere Trocknung. Dies dürfte an den sehr trockenen Witterungsbedingungen im Versuchsjahr 2015 liegen, im Gegensatz zu der normal feuchten Witterung während des hier dargestellten Versuchs.

In den letzten zehn Wochen der Lagerung erreichte der offen gelagerte Polter trotz abnehmender Niederschläge wieder den Einlagerungswassergehalt. Dies kann auf die niedrige Lufttemperatur und somit geringe Verdunstung zurückgeführt werden. Beim abgedeckt gelagerten Hackgut stieg der Wassergehalt hingegen nur leicht an. Bei der letzten Beprobung im Dezember ergab sich somit eine Wassergehaltsdifferenz von beinahe 20 Prozentpunkten zwischen dem offen und dem abgedeckt gelagerten Waldrestholz.

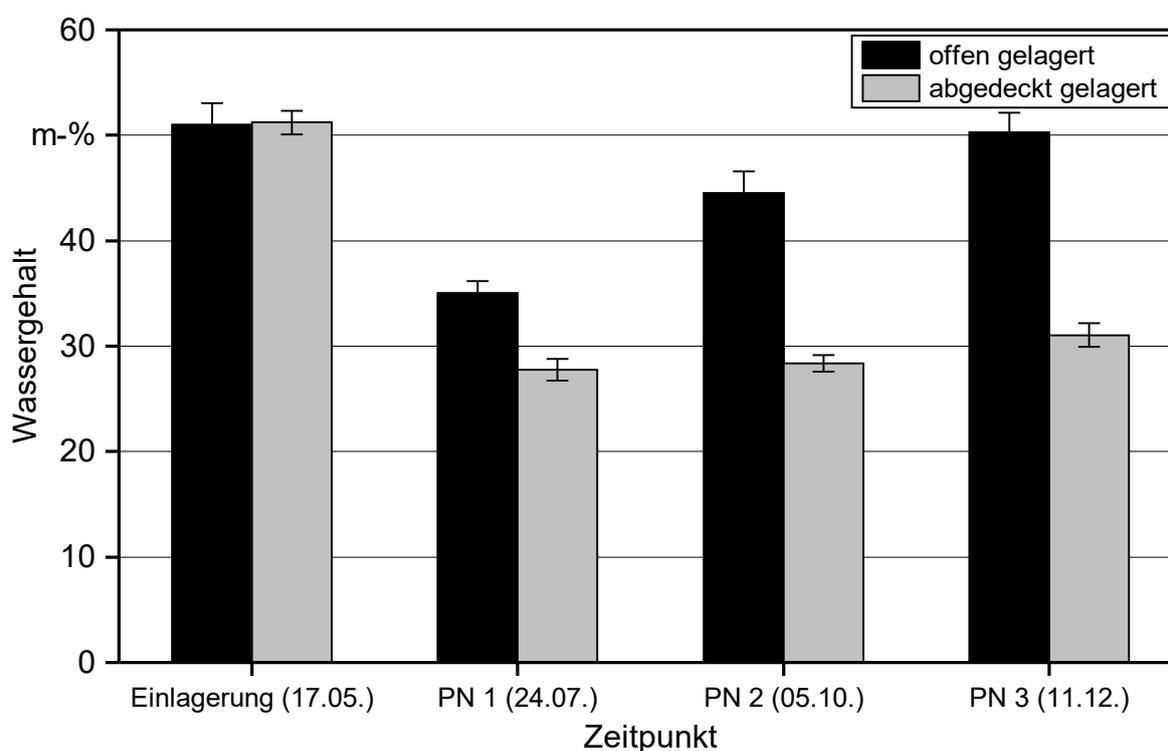


Abbildung 8: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$  Standardabweichung) der Referenzhackschnitzel beider Varianten (offen/abgedeckt) zum Zeitpunkt der Einlagerung sowie der sechs ungehackt gelagerten Waldrestholzpolter bei Auslagerung (PN 1 bis PN 3)

Der Regenschutz kann demnach als sehr effektiv bewertet werden. Durch Verwendung des Abdeckpapiers könnten folglich aus im Sommer vorgetrocknetem ungehacktem Material auch im Winter direkt im Wald trockene Holzhackschnitzel produziert werden, die direkt auch in kleineren und mittelgroßen Anlagen eingesetzt werden können. Bei der Lagerung der Polter ist jedoch auf eine ganzjährige Befahrbarkeit der Waldwege zu achten. Diese kann im Winter regional aufgrund von Schneelage oder Eisbildung eingeschränkt sein.

### 5.3.3 Trockenmasseverlust

Ein Trockenmasseverlust entsteht bei der Lagerung von ungehacktem Waldrestholz aus zwei Gründen: zum einen durch die Zersetzung der Biomasse durch Mikroorganismen,

zum anderen durch das Abfallen von Nadeln, Feinreisig und Ästen, die dann beim Hacken auf dem Waldboden zurückbleiben.

Wie die Ergebnisse des Lagerungsversuchs zeigten, war der Trockenmasseverlust in den ersten Wochen der Lagerung am größten (Abbildung 9). Nach zehn Wochen Lagerungsdauer lag der Trockenmasseverlust beim offen gelagerten Waldrestholz bereits bei 14,0 %, beim abgedeckt gelagerten Waldrestholz bei 10,9 %. Nach 20 Wochen Lagerdauer konnte nur beim abgedeckt gelagerten Waldrestholz eine weitere Zunahme des Trockenmasseverlusts gemessen werden, der nun beinahe das Niveau des offen gelagerten Waldrestholzes erreichte. Nach 30 Wochen sank der Trockenmasseverlust beim offen gelagerten Waldrestholz wieder, es kam also zu einer scheinbaren Trockenmassezunahme im Vergleich zu den beiden vorherigen Beprobungen. Beim abgedeckt gelagerten Waldrestholz setzte sich der Trend zu weiteren Verlusten bis zum Gesamthöchstwert von 15,6 % fort.

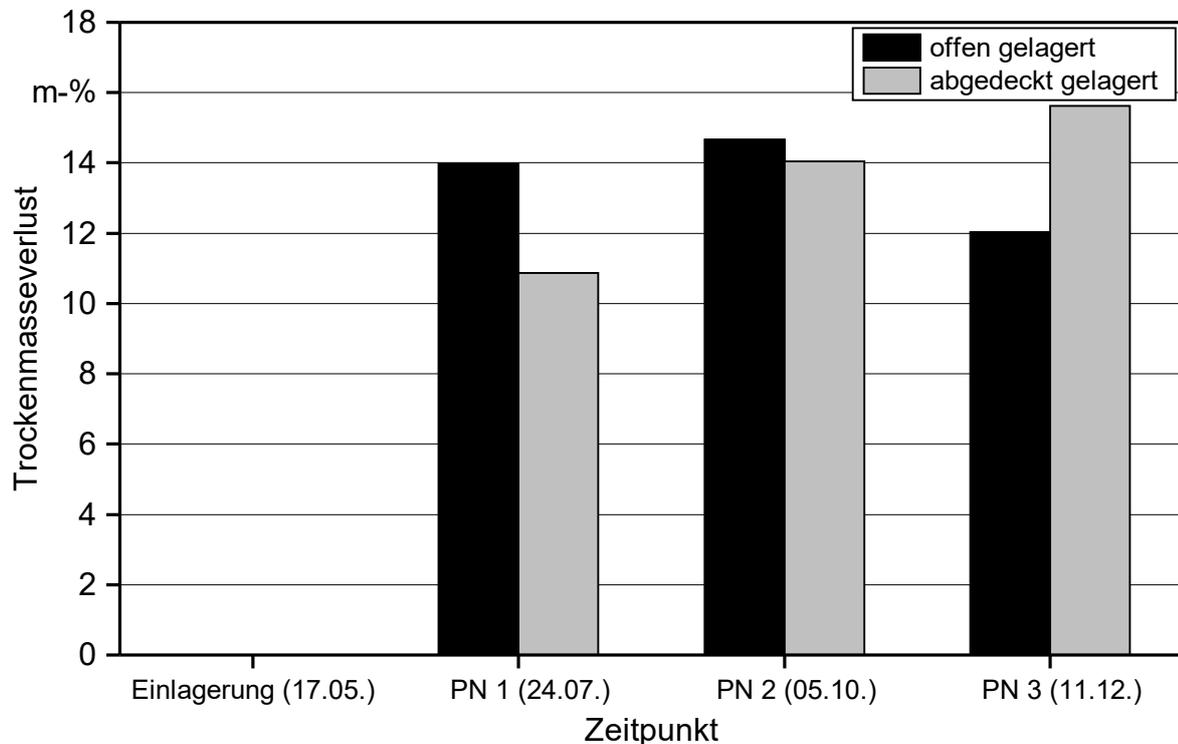


Abbildung 9: Trockenmasseverlust bei den sechs ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern

Um den Anteil des Trockenmasseverlusts durch abfallende und auf dem Boden liegen gebliebene Biomasse abschätzen zu können, wurde diese getrennt gewogen und ab der zweiten Probenahme zudem deren Wassergehalt bestimmt (Tabelle 6). Die Wassergehaltsbestimmung war jedoch aufgrund der starken Inhomogenität des abgefallenen Materials, die sich auch in der hohen Standardabweichung widerspiegelte, sehr unsicher. Diese Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wassergehalts führen zu einer annähernden Verdoppelung der Unsicherheit des daraus berechneten Trockenmasseverlusts.

Die Gesamtmassen und Trockenmassen des abgefallenen Materials deuteten allerdings darauf hin, dass diese Vorgänge in den ersten Wochen bereits weitestgehend abgeschlossen waren und der zusätzliche Verlust anschließend überwiegend durch mikrobielle Zersetzung verursacht worden war. Aus welchem Grund der mikrobielle Abbau bei den abgedeckten und relativ trockenen Poltern im weiteren Verlauf vergleichbar war mit dem der offen gelagerten und deutlich feuchteren Polter, bleibt unklar. Eventuell war dies, wie die angebliche Zunahme der Trockenmasse beim offen gelagerten Polter, eher den Messunsicherheiten bei der Bestimmung des Wassergehalts oder Unterschieden in der Materialzusammensetzung zwischen den Poltern geschuldet.

*Tabelle 6: Masse und Wassergehalt (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) des von den Waldrestholzpoltern abgefallenen und/oder nicht vom Ladekran des Hackers aufgegriffenen Materials (Rest). Die Masse der sechs Polter lag bei der Einlagerung zwischen 4800 und 6120 kg. WG = Wassergehalt, TM = Trockenmasse, n. g. = nicht gemessen*

Probenahme, Variante	Masse Rest in kg	WG Rest in m-%	TM Rest in kg	TM-Verlust durch Rest in %	TM-Verlust durch Abbau in %
PN 1, offen	360	n. g.	–	–	–
PN 1, abgedeckt	360	n. g.	–	–	–
PN 2, offen	300	55,6 $\pm$ 5,9 (n = 10)	133,2	5,3	9,4
PN 2, abgedeckt	280	50,5 $\pm$ 7,4 (n = 10)	138,6	5,2	8,8
PN 3, offen	460	66,3 $\pm$ 3,5 (n = 10)	155,0	6,4	5,6
PN 3, abgedeckt	320	54,8 $\pm$ 11,4 (n = 10)	144,6	5,0	10,6

Insgesamt lagen die Trockenmasseverluste in diesem Versuch jedoch in einem vergleichbaren Bereich wie bei den Versuchen des Vorgängerprojekts (TM-Verlust Sommerlagerung Waldrestholz: 11,8 %). Dort betrug die Lagerungsdauer fünf Monate, weshalb die Ergebnisse mit Probenahme 2 dieses Versuchs verglichen werden müssten. Die Annahme aus dem Vorgängerprojekt, dass die Trockenmasseverluste ab einer gewissen Lagerungsdauer abnehmen würde, scheint sich in diesem Projekt zu bestätigen. Im Vergleich zu den Trockenmasseverlusten bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln muss berücksichtigt werden, dass auch bei einer zeitnahen Holzhackschnitzelproduktion das Waldrestholz aus organisatorischen Gründen vor dem Hacken meistens zumindest für einige Tage bis wenige Wochen als Polter vorgelagert wird und es somit ebenfalls zunächst zu einem Verlust durch das Abfallen und/oder Liegenlassen von Biomasse

kommt. Allerdings lässt sich aus diesem Versuch nicht ableiten, wie hoch dieser Verlust beispielsweise bei einer zweiwöchigen Vorlagerung ausfallen würde.

### 5.3.4 Aschegehalt und Heizwert

Der Aschegehalt von Waldrestholz liegt i. d. R. zwischen 1,5 und 4 m-% (wf) [68]. Bei den Polterlagerversuchen in der vorliegenden Studie bewegten sich die Aschegehalte mit 2,8 bis 6,5 m-% somit in einem normalen bis etwas erhöhten Bereich (Tabelle 7). Ursächlich für einen leicht erhöhten Aschegehalt könnte ein verhältnismäßig hoher Nadel-, Feinreisig- und Rindenanteil gewesen sein, der sich auch im hohen Feinanteil (Partikel  $\leq 3,15$  mm) der Siebanalysenproben zeigte (siehe Abschnitt 5.3.5). Bei den offen gelagerten Poltern nahm der Aschegehalt zwischen Einlagerung und Probenahme tendenziell zu, bei den abgedeckt gelagerten Poltern sank der Aschegehalt zwischen Einlagerung und Probenahme teilweise statistisch signifikant. Hinsichtlich der Lagerungsdauer konnte jedoch bei keiner der beiden Varianten ein klarer Trend beobachtet werden. Ein Anstieg des Aschegehalts während der Lagerung könnte durch starke mikrobielle Zersetzung hervorgerufen worden sein, da nur die organischen Holzbestandteile abgebaut werden und somit der anorganische Anteil steigt. Eine Verringerung des Aschegehalts könnte dagegen durch den Verlust von Biomasse mit hohen spezifischen Aschegehalten (Nadeln, Feinreisig und Rinde) während der Lagerung verursacht worden sein. Beide Vorgänge konnten während des Versuchs gemessen werden (siehe Abschnitte 5.3.3 und 5.3.5). Allerdings erklärten diese nicht den Unterschied zwischen den beiden Varianten, da sowohl die Zersetzung als auch der Rückgang des Feinmaterials bei den offen gelagerten und bei den abgedeckt gelagerten Poltern in ähnlicher Höhe auftraten.

*Tabelle 7: Aschegehalte der Holzhackschnitzel (in m-%, wf) aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Statistisch signifikante Änderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test,  $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme (PN) fettgedruckt (wf = wasserfreie Bezugsbasis)*

Zeitpunkt	offen gelagert	abgedeckt gelagert
Einlagerung (15.05.2017)	4,1 $\pm$ 1,0 (n = 5)	<b>4,0 <math>\pm</math> 0,6 (n = 10)</b>
PN 1 (24.07.2017)	4,5 $\pm$ 1,1 (n = 10)	<b>2,8 <math>\pm</math> 0,9 (n = 10)</b>
Einlagerung (15.05.2017)	3,1 $\pm$ 0,8 (n = 10)	<b>4,4 <math>\pm</math> 1,3 (n = 10)</b>
PN 2 (05.10.2017)	4,4 $\pm$ 1,9 (n = 10)	<b>3,4 <math>\pm</math> 1,9 (n = 10)</b>
Einlagerung (15.05.2017)	4,1 $\pm$ 1,4 (n = 10)	6,5 $\pm$ 3,1 (n = 10)
PN 3 (11.12.2017)	4,5 $\pm$ 1,0 (n = 9)	5,3 $\pm$ 2,0 (n = 8)

Der typische Heizwert (wasserfreie Bezugsbasis) von Waldrestholz aus Nadelholz liegt bei 19,2 MJ kg<sup>-1</sup> [27] [78]. Die Heizwerte des für den Versuch verwendeten Waldrestholzes waren durchweg etwas höher (Tabelle 8). Hohe Heizwerte werden z. B. durch einen

hohen Gehalt an Rinde und Nadeln verursacht, da diese einen höheren spezifischen Heizwert besitzen als Holz [68]. Eine Zersetzung durch Mikroorganismen kann den Heizwert verringern, da diese nur organisches Material abbauen und sich der Anteil der (nicht brennbaren) Asche somit erhöht. Theoretisch kann der Heizwert durch Abbauprozesse jedoch auch ansteigen, wenn die niederkalorischen Holzbestandteile (Zellulose, Hemizellulose) selektiv abgebaut werden. Im Versuch kam es nur beim offen gelagerten Waldrestholzpolter, das zum zweiten Probenahmetermin gehackt wurde, zu einer nennenswerten Absenkung des Heizwerts um 2,4 %. Bei diesem Polter wurde auch die höchste Aschegehaltszunahme gemessen (Tabelle 7). Die Veränderung der Heizwerte zwischen Einlagerung und Probenahme war ansonsten mit durchgängig unter einem Prozent sehr gering. Solch minimale Veränderungen können allein schon durch die Beprobungsmethode oder Messunsicherheiten bei der Analyse hervorgerufen werden.

*Tabelle 8: Heizwerte ( $\text{kJ kg}^{-1}$ , wf) der Hackschnitzel aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. In Klammern die prozentuale Veränderung im Vergleich zum jeweiligen Einlagerungswert. Analysen an repräsentativen Mischproben ( $n = 1$ ) (wf = wasserfreie Bezugsbasis)*

Zeitpunkt	offen gelagert	abgedeckt gelagert
PN 1 (24.07.2017)	20 116 (+0,6)	20 146 (-0,9)
PN 2 (05.10.2017)	19 908 (-2,4)	20 329 (+0,8)
PN 3 (11.12.2017)	19 829 (-0,7)	19 846 (+0,7)

### 5.3.5 Partikelgrößenverteilung und Schüttdichte

Die Partikelgrößenverteilung der Waldrestholzhackschnitzel aus den ungehackt gelagerten Poltern sowie der Referenzhackschnitzel wies im Vergleich zu den anderen Versuchen dieser und weiterer Studien einen erhöhten Feinanteil (Partikel  $\leq 3,15$  mm) und auch einen relativ großen Anteil an überlangen Partikeln ( $> 100$  mm) auf (Abbildung 10). Ursächlich hierfür dürfte eine verhältnismäßig schlechte Qualität des Ausgangsmaterials mit sehr vielen feinen Ästen, Zweigen und Nadeln gewesen sein. Dies spiegelte sich auch im hohen Aschegehalt wider (Abschnitt 5.3.4). Die Hauptfraktion ( $\geq 60$  m-%) lag zur Auslagerung bei allen sechs Poltern zwischen 3,15 mm und 31,5 mm, zur Einlagerung abgesehen von den abgedeckten Poltern von den Probenahmen 1 und 2 ( $3,15 < P \leq 45$  mm) ebenfalls (Tabelle 9). Dennoch war bei Auslagerung eine Einteilung nach DIN EN ISO 17225-1 [27] in die Klasse P31 nicht möglich, da die maximale Partikellänge ( $\geq 200$  mm) bei allen Poltern überschritten wurde. Bei Einlagerung war zumindest bei den abgedeckten Poltern von den Probenahmen 1 und 2 eine Einteilung in Klasse P45, aufgrund der dort großzügiger ausgelegten maximalen Partikellänge, möglich. Eine Einteilung in die strengeren Klassen P31S bzw. P45S gemäß DIN EN ISO 17225-4 [28] war bei allen Poltern aufgrund der regelmäßigen Überschreitung des maximal zulässigen Feinanteils ( $\leq 10$  m-%) und der maximalen Partikellänge nicht möglich.

**Tabelle 9:** *Feinanteil, Partikel  $\leq 8$  mm, Medianwert der Größenverteilung, Hauptfraktion und Klassifizierung der Waldrestholz hackschnitzel aus der ungehackten Polterlagerung. Veränderungen ( $\Delta$ ) im Vergleich zur ungehackten Einlagerung in Klammern, k. V. = keine Veränderung, n. m. = nicht möglich, Mittelwerte mit jeweils  $n = 5$ . Statistisch signifikante Veränderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test,  $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme sind fettgedruckt.*

Parameter	Variante (ungehackte Lagerung)	Probenahme 1 ( $\Delta$ Einlagerung)	Probenahme 2 ( $\Delta$ Einlagerung)	Probenahme 3 ( $\Delta$ Einlagerung)
Partikel $\leq 3,15$ mm (Feinanteil) in m-%	offen	21,9 (-1,7)	13,7 ( <b>-8,6</b> )	13,7 ( <b>-7,1</b> )
	abgedeckt	13,7 ( <b>-9,9</b> )	20,0 ( <b>-7,1</b> )	16,6 (-3,3)
Partikel $\leq 8$ mm in m-%	offen	36,8 (-2,4)	26,4 ( <b>-11,9</b> )	26,0 ( <b>-9,0</b> )
	abgedeckt	26,6 ( <b>-11,2</b> )	35,4 ( <b>-7,6</b> )	35,0 (+0,9)
Medianwert der Größen- verteilung in mm	offen	13,0 (+1,3)	17,4 (+5,3)	18,2 (+5,0)
	abgedeckt	16,9 (+4,1)	13,4 (+2,9)	13,4 (k. V.)
Hauptfraktion ( $\geq 60$ m-%) in mm	offen	3,15 < P $\leq$ 31,5 (k. V.)	3,15 < P $\leq$ 31,5 (k. V.)	3,15 < P $\leq$ 31,5 (k. V.)
	abgedeckt	3,15 < P $\leq$ 31,5 (3,15 < P $\leq$ 45)	3,15 < P $\leq$ 31,5 (3,15 < P $\leq$ 45)	3,15 < P $\leq$ 31,5 (k. V.)
Klassifizierung nach DIN EN ISO 17225-1	offen	n. m. (k. V.)	n. m. (k. V.)	n. m. (k. V.)
	abgedeckt	n. m. (P45)	n. m. (P45)	n. m. (k. V.)

Eine Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen wäre somit hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung nicht empfehlenswert gewesen. Dennoch konnte die Qualität neben dem Wassergehalt auch bezüglich des Feinanteils durch die Polterlagerung teilweise deutlich gesteigert werden. Statistisch signifikante Verringerungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test,  $p \leq 0,05$ ) im Feinanteil zwischen Einlagerung und Probenahme traten auf bei:

- Probenahme 1 abgedeckt gelagert,
- Probenahme 2 offen und abgedeckt gelagert sowie bei
- Probenahme 3 offen gelagert.

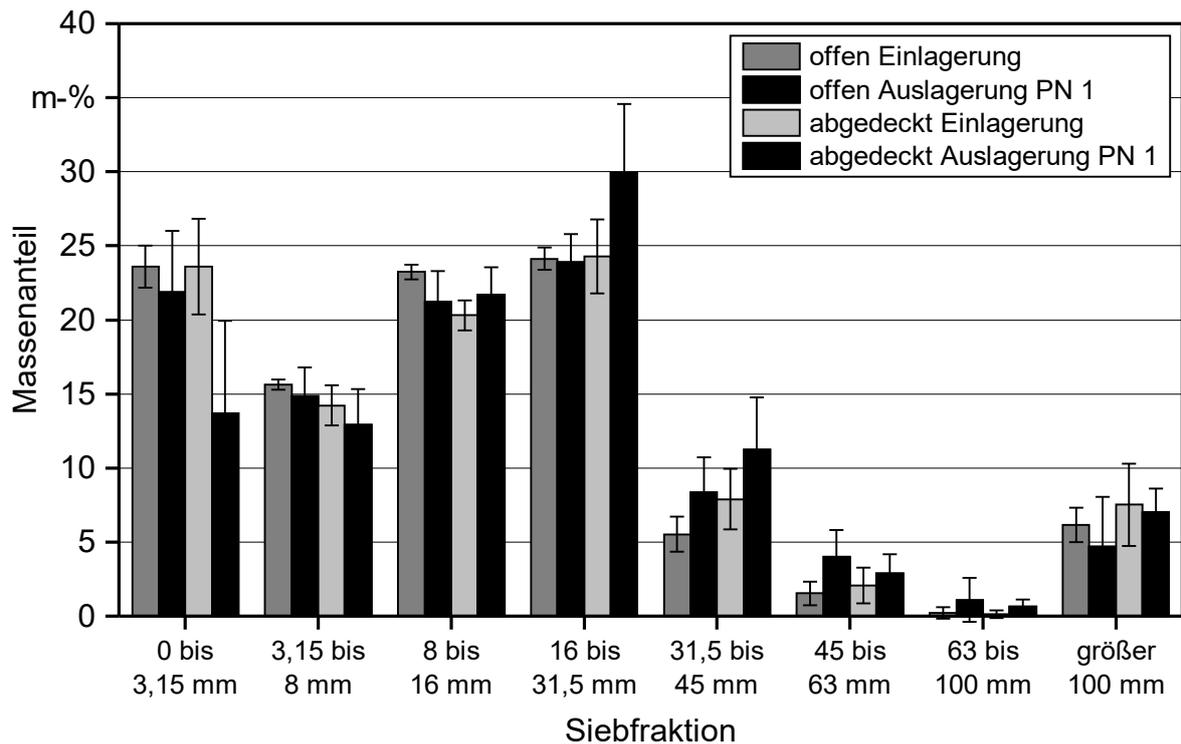


Abbildung 10: Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern nach zehn Wochen Lagerungsdauer am 24.07.2017 (PN 1). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ )

In der Fraktion  $\leq 8$  mm waren die Veränderungen gegenüber dem Einlagerungszustand bei denselben Poltern statistisch signifikant. Die Verringerung des Feinanteils bzw. der Fraktion  $\leq 8$  mm führte gleichzeitig zu einer Abnahme des Medianwerts der Größenverteilung (Tabelle 9). Ursache für den Rückgang im Feinanteil war das Abfallen von Nadeln, Feinreisig und Rindenpartikeln während der Lagerung, wie es auch schon im Vorgängerprojekt beobachtet worden war. Ein genereller Unterschied zwischen offener und abgedeckter Polterlagerung oder ein Trend über den gesamten Lagerzeitraum von sieben Monaten konnte nicht nachgewiesen werden.

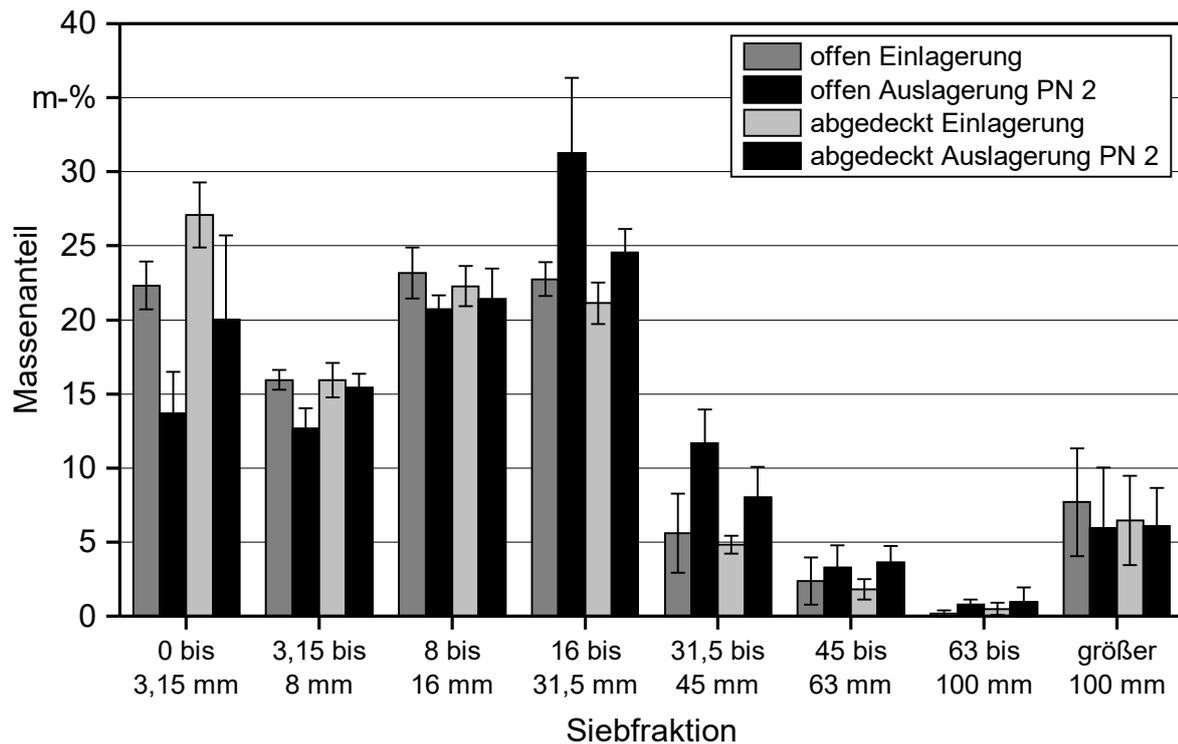


Abbildung 11: Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern nach 20 Wochen Lagerungsdauer am 05.10.2017 (PN 2). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ )

Die Schüttdichte der Holzhackschnitzel bezogen auf die Trockenmasse ( $\text{kg m}^{-3}$ , wf) erhöhte sich bei allen Poltern durch die Hackholzlagerung, bei vier Poltern statistisch signifikant (Tabelle 10). Die Ursache hierfür konnte nicht abschließend geklärt werden. Mit abnehmendem Feinanteil wäre eigentlich auch mit einer Abnahme der Schüttdichte zu rechnen gewesen, da der Feinanteil die Luftzwischenräume im Schüttgut auffüllt [80]. Allerdings hatte sich in den weiter unten beschriebenen Alterungsversuchen mit Holzhackschnitzeln generell eine verbesserte Brückenbildungsneigung eingestellt (vgl. Abschnitt 12.3.2), was auf eine verbesserte Fließfähigkeit und dadurch möglicherweise kompaktere und dichtere Lagerung hindeutet. Die Alterung im ungehackten Polter könnte somit ähnliche Veränderungen der Materialeigenschaften bewirkt haben.

Bei der technischen Trocknung von Holzhackschnitzeln kommt es hingegen oftmals zu einer deutlichen Zunahme der Schüttdichte, da einerseits der Reibungswiderstand der Holzhackschnitzel abnimmt [58], was zu einem engeren Gefüge der Brennstoffe im Haufen führt, und andererseits das Holz schrumpft, wodurch ebenfalls mehr Trockenmasse in dasselbe Volumen passt [8]. Diese Effekte scheinen jedoch beim Polterversuch nicht für die Zunahme der Schüttdichte verantwortlich gewesen zu sein. Mit Schrumpfungsprozessen muss erst unterhalb eines Wassergehalts von ca. 25 m-% (Fasersättigungspunkt) gerechnet werden [68], der nicht erreicht wurde, und auch bei den verhältnismäßig nassen Poltern (PN 2 und 3, offen gelagert) stieg die Schüttdichte signifikant an.

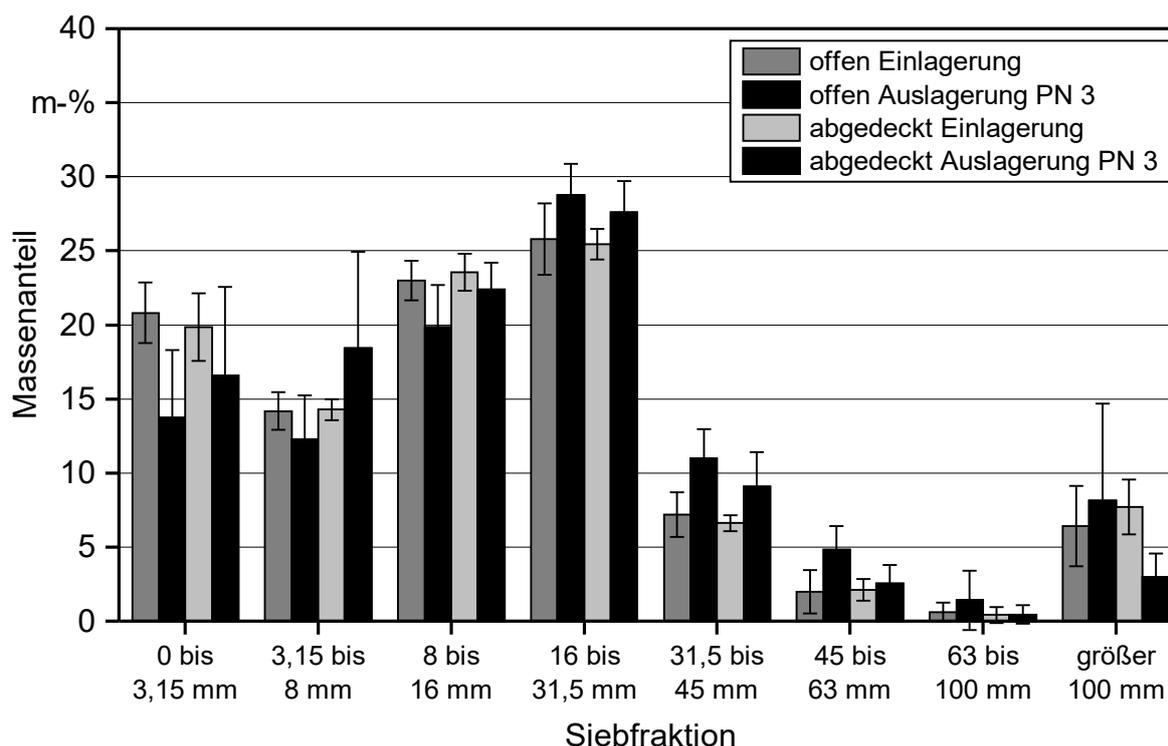


Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung der Referenzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung am 17.05.2017 und der Hackschnitzel aus den beiden (offen und abgedeckt) ungehackt gelagerten Waldrestholzpoltern nach 30 Wochen Lagerungsdauer am 11.12.2017 (PN 3). Mittelwerte und Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ )

Tabelle 10: Schüttdichte der Holzhackschnitzel (in  $\text{kg m}^{-3}$ , wf) aus dem ungehackt gelagerten Waldrestholz. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung. Statistisch signifikante Änderungen (Mann-Whitney-U-Test und T-Test,  $p \leq 0,05$ ) zwischen Einlagerung und Probenahme (PN) fettgedruckt (wf = wasserfreie Bezugsbasis)

Zeitpunkt	offen gelagert	abgedeckt gelagert
Einlagerung (17.05.)	155,2 $\pm$ 4,5 ( $n = 10$ )	<b>156,8 <math>\pm</math> 5,2 (<math>n = 9</math>)</b>
PN 1 (24.07.)	158,7 $\pm$ 5,5 ( $n = 10$ )	<b>168,9 <math>\pm</math> 5,8 (<math>n = 9</math>)</b>
Einlagerung (17.05.)	<b>155,4 <math>\pm</math> 3,0 (<math>n = 9</math>)</b>	157,7 $\pm$ 1,0 ( $n = 10$ )
PN 2 (05.10.)	<b>161,2 <math>\pm</math> 7,6 (<math>n = 10</math>)</b>	162,4 $\pm$ 6,9 ( $n = 9$ )
Einlagerung (17.05.)	<b>161,5 <math>\pm</math> 2,9 (<math>n = 10</math>)</b>	<b>160,9 <math>\pm</math> 4,1 (<math>n = 10</math>)</b>
PN 3 (11.12.)	<b>172,3 <math>\pm</math> 6,0 (<math>n = 10</math>)</b>	<b>175,4 <math>\pm</math> 8,7 (<math>n = 9</math>)</b>

### 5.3.6 Inhaltsstoffliche Analyse Walki Biomass Cover

Die Analyse des Abdeckpapiers Walki Biomass Cover ergab hinsichtlich des Aschegehalts (1,7 m-%) sowie der Konzentrationen der meisten Elemente vergleichbare oder geringere Werte als bei Holzhackschnitzeln.

Im Vergleich zu den Waldrestholzhackschnitzeln aus dem Sickerwasserversuch (vgl. Abschnitt 13.4.2.4) lagen die Werte im Abdeckpapier nur bei den Elementen Aluminium ( $613,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Quecksilber ( $22,7 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ ) und Natrium ( $436,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) teilweise deutlich höher: bei Aluminium ca. um den Faktor drei, bei Quecksilber ca. um den Faktor fünf und bei Natrium etwa um den Faktor 19. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass pro Polter nur etwa 13 kg Abdeckpapier benötigt wurden, die abgedeckten Polter jedoch eine mittlere Holz trockenmasse von ca. 2820 kg besaßen, also die 217-fache Masse aufwiesen. Zumindest bei Aluminium und Quecksilber war demzufolge kein messbarer Effekt auf die Verbrennung zu erwarten. Aber auch bei Natrium war der Anteil in der Folie gegenüber dem in der Gesamtmasse der Polter klein (8,7 %). Zudem besitzt Natrium bei der Verbrennung nur eine geringe Umweltrelevanz [5] [40] [77] [102].

Das Mithacken und -verbrennen des Abdeckpapiers stellt somit keine Gefahr für die Luftreinheit dar.

#### **5.4 Kosten der Polterabdeckung**

Durch das Abdecken der Polter entstehen Mehrkosten, die sich in der Praxis aus Maschinen-, Arbeits- sowie Materialkosten zusammensetzen. Demgegenüber stehen potenzielle Mehrerlöse durch eine bessere Trocknung und die Möglichkeit der Bereitstellung trockener Holzhackschnitzel über einen längeren Zeitraum im Jahr.

In der Praxis werden die Polter an der Waldstraße mithilfe eines Fahrzeugs mit Ladekran, beispielsweise einem Forwarder, abgedeckt. Mit dem Kran wird die Papierrolle auf einem speziellen Abrollbügel über die Polter geführt und das Papier anschließend mit kleinen Stammabschnitten oder dicken Ästen gegen Wind gesichert. Eine zweite Person kann den Maschinenführer unterstützen, indem sie das Papier festhält und am Ende abschneidet. Für einen 20 m langen Haufen werden laut Praxisinformation ca. 10 min Arbeitszeit benötigt [108].

Im Versuch waren die Polter aufgrund der vielen Varianten mit vier bis fünf Metern deutlich kürzer als in der Praxis. Somit konnten diese von Hand durch zwei Personen abgedeckt werden. Zum Befestigen des Abdeckpapiers wurden Seile an Sandsäcken über die Polter gespannt. Hierfür wurden pro Polter ca. 10 min benötigt.

Für die Kalkulation wurden folgende Kosten angenommen:

Forwarder	83,00 € h <sup>-1</sup> [80]
Hilfskraft Maschinenring	12,50 € h <sup>-1</sup> [60]
Walki Biomass Cover	1,00 € m <sup>-2</sup> (Aussage der Fa. Walki)
Abrollbügel	1100,00 € (angelehnt an [44])

Für die Berechnung der Kosten pro Schüttraummeter Holzhackschnitzel wurde angenommen, dass im Praxisbeispiel das Polter quaderförmig war und die Maße 20 × 6 × 4 m (L × B × H) mit einem Volumen von 480 m<sup>3</sup> aufwies. Im Versuch hatte das Polter die Maße 4,5 × 5,5 × 3 m (vereinfachter Zylinder) mit einem Volumen von 59 m<sup>3</sup>. Der mittlere Umrechnungsfaktor von Raummeter Waldrestholz zu Schüttraummeter Holzhackschnitzel beträgt 0,4 [104]. Daraus ergab sich im Praxisbeispiel ein Holzhackschnitzelvolumen von 192 Srm, im Versuch von 24 Srm pro Polter.

*Tabelle 11: Kostenübersicht (in €) beim Einsatz eines Polterabdeckpapiers. Vergleich eines Praxisbeispiels mit dem Lagerungsversuch im Forschungsprojekt*

Position	Praxisbeispiel	Versuch
Forwarder	13,83	–
Hilfskraft	2,08	4,16
Abdeckpapier	144,00	48,00
Summe	159,91	52,16
Summe pro Srm	0,83	2,17

Die benötigte Menge an Abdeckpapier wurde beim Praxisbeispiel auf 24 × 6 m = 144 m<sup>2</sup> geschätzt, beim Versuch wurden großzügig 8 × 6 m = 48 m<sup>2</sup> verwendet. Das Abdeckpapier ist nicht wiederverwertbar, somit wurde die Haltbarkeit mit einer Lagersaison beziffert. In der Summe ergaben sich für das Abdecken der Polter im Praxisbeispiel Kosten i. H. v. 0,83 € Srm<sup>-1</sup>, im Versuch 2,17 € Srm<sup>-1</sup> (Tabelle 11).

Hinzu kommt in der Praxis der Preis für den Abrollbügel. Dessen Kosten hängen stark von der Häufigkeit der Verwendung bzw. der damit abgedeckten Holzhackschnitzelmengen ab. Legt man eine Nutzungsdauer von zehn Jahren zugrunde und werden pro Jahr Polter mit einem Holzhackschnitzelvolumen von 500 Srm abgedeckt, ergäbe dies Zusatzkosten i. H. v. 0,22 € Srm<sup>-1</sup>, bei einer Holzhackschnitzelmengen von jährlich 5000 Srm entsprechend nur noch 0,02 € Srm<sup>-1</sup>. Die hohen relativen Kosten des Abdeckpapiers im Versuch hätten verringert werden können, wenn das Polter seitlich nicht ganz bis zum Boden abgedeckt worden wäre. Die Trocknung wäre dadurch wahrscheinlich nicht deutlich verlangsamt worden. Außerdem gilt die Regel, dass längere und v. a. hö-

here Polter aufgrund des günstigeren Verhältnisses von Oberfläche zu gelagertem Hackgutvolumen weniger Abdeckpapier benötigen und die relativen Kosten somit geringer werden.

Im Vergleich mit den Bereitstellungs- und Lagerungskosten sowie dem Verkaufspreis von Waldrestholzhackschnitzeln ergab sich folgendes Bild: Die Bereitstellungskosten (Fällen, Rückung, Hacken) von Holzhackschnitzeln sind abhängig von vielen Faktoren und liegen im Mittel bei rund 15 € Srm<sup>-1</sup> [80]. Die Zusatzkosten, die bei der Lagerung (Lagerplatz, Radlader, Lkw, Trockenmasseverluste etc.) von Waldrestholzhackschnitzeln entstehen, bewegen sich ebenfalls in einem weiten Bereich. Die Vorgängerstudie kommt bei einem Biomassehändler zu einem Ergebnis von 1,79 bis 3,12 € Srm<sup>-1</sup>, beim Privatverbraucher (z. B. Landwirt) auf 2,50 bis 5,29 € Srm<sup>-1</sup> [60]. Auch der Verkaufspreis von Holzhackschnitzeln ist starken regionalen und saisonalen Schwankungen unterworfen. Im vierten Quartal 2018 lag der Preis für Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 35 m-% in Süddeutschland bei 86,87 € t<sup>-1</sup> [19], was umgerechnet ca. 21,20 € Srm<sup>-1</sup> entspricht. Allerdings wird hier nicht zwischen Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzeln unterschieden.

Aus der Gesamtbetrachtung der Kosten zur Holzhackschnitzelbereitstellung ging hervor, dass das Abdecken von Poltern nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten darstellt. Jedoch wurde auch ersichtlich, dass bei der ohnehin relativ geringen Gewinnspanne in der Holzhackschnitzelbranche auch Mehrkosten von weniger als 1 € Srm<sup>-1</sup> ins Gewicht fallen können. Der potenzielle Mehrerlös durch eine bessere Trocknung und durch die Möglichkeit, über lange Zeiträume im Jahr trockene Holzhackschnitzel produzieren und anbieten zu können, ist jedoch schwierig zu beziffern.

## 5.5 Zusammenfassende Bewertung

Die Vorlagerung von Holz in noch nicht gehacktem Zustand ist ein in Bayern weitverbreitetes Verfahren. Bei der Lagerung von Waldrestholz in offenen Poltern bis über den Sommer hinaus kann es jedoch zu einer Wiederbefeuchtung und somit zu einem Verlust des Trocknungserfolgs kommen. Vor allem in Skandinavien ist deshalb das Abdecken solcher Holzpolter eine gängige Methode. Im dort herrschenden Klima spielt zudem der Schutz vor dem Eindringen von Eis und Schnee in die Polter eine wichtige Rolle, da dies das Hacken erschweren und den Wassergehalt weiter erhöhen würde.

Um die Effektivität eines Regenschutzes auch unter mitteleuropäischen Klimabedingungen beurteilen zu können, wurden nahe München von Mai bis Dezember 2017 Versuche mit sechs zu drei Paaren zusammengefassten Waldrestholzpoltern durchgeführt. Pro Polterpaar wurde jeweils einer teiloffen und einer mit Walki Biomass Cover abgedeckt gelagert. Insgesamt wurde zu drei Probenahmezeitpunkten jeweils ein Polterpaar zugleich gehackt und beprobt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Abdecken von Waldrestholzpoltern im Frühsommer zu einer starken, statistisch signifikanten Abnahme des Wassergehalts führte und der nied-

rige Wassergehalt anschließend bis in den Winter hinein erhalten blieb. Bei den offen gelagerten Poltern war der anfängliche Trocknungseffekt hingegen etwas geringer und im Herbst bzw. Winter stieg der Wassergehalt allmählich wieder bis auf den Einlagerungswert an.

Hinsichtlich des Trockenmasseverlusts konnten aufgrund von Messunsicherheiten keine klaren Unterschiede zwischen den beiden Varianten festgestellt werden. Jedoch trat bei beiden Varianten der größte Verlust in den ersten Wochen der Lagerung auf. Der Feinanteil der Holzhackschnitzel verringerte sich durch das Abfallen von Nadeln und Rindenpartikeln sowohl bei den abgedeckt gelagerten Poltern als auch bei den offen gelagerten Vergleichspoltern durchgehend und teilweise statistisch signifikant. Der Aschegehalt verringerte sich hingegen nur bei den abgedeckt gelagerten Poltern statistisch signifikant, beim offen gelagerten Hackgut nahm er tendenziell sogar zu. Die Ursache für die Unterschiede in der Aschegehaltsentwicklung konnte nicht abschließend geklärt werden, da bei beiden Varianten die Abnahme des Feinanteils und die Verluste durch Zersetzung vergleichbar waren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Waldrestholzpolter nur über den Sommer offen gelagert werden sollten, es sei denn, der Wassergehalt spielt bei der Verbrennung keine entscheidende Rolle. In diesem Fall ist auch eine längere Lagerung sinnvoll, da die höchsten Trockenmasseverluste innerhalb der ersten Wochen auftreten. Sollen auch im Herbst oder Winter noch trockene Holzhackschnitzel produziert werden, ist das Abdecken der Polter notwendig. Zudem kann sich die Abdeckung positiv auf den Aschegehalt der Holzhackschnitzel auswirken. In beiden Varianten ist durch das Abfallen von Nadeln und Feinreisig außerdem mit einer Qualitätsverbesserung hinsichtlich des Feinanteils zu rechnen.

Die rechnerischen Mehrkosten durch das Abdecken der Polter beliefen sich auf  $0,83 \text{ € Srm}^{-1}$  (Praxisbeispiel) bzw.  $2,17 \text{ € Srm}^{-1}$  (Versuch). Im Versuch wäre durch die Einsparung von Papiermenge noch eine Kostensenkung möglich gewesen. Im Vergleich zu den Bereitstellungskosten von Holzhackschnitzeln waren diese Mehrkosten eher gering, jedoch ist die Gewinnspanne in der Holzhackschnitzelbranche ohnehin klein und somit können auch geringe Kostensteigerungen einen deutlichen Effekt haben. Der potenzielle Mehrerlös durch eine bessere Trocknung und die Option einer im Jahresverlauf gleichmäßigeren Bereitstellung trockener Holzhackschnitzel ist schwierig zu beziffern und muss fallweise unter Berücksichtigung der Absatzmöglichkeiten bewertet werden.



## 6 Veränderte Lagerung durch Siebung von Holzhackschnitzeln

KUPTZ, D.; MENDEL, T.; HARTMANN, H.

Mechanisch gesiebte Holzhackschnitzel besitzen eine gleichförmige Partikelgröße, einen sehr geringen Feinanteil und wenig Überlängen [75]. Hierfür kommen in der Praxis häufig unterschiedliche Maschinen, z. B. Sternsiebe, Trommelsiebe oder Plan- bzw. Schwingsiebe zum Einsatz. Durch die Siebung der Brennstoffe soll der störungsfreie und emissionsarme Betrieb von Holzhackschnitzelfeuerungen sichergestellt werden. Nach aktuell gängiger Praxis werden dabei vornehmlich vorgetrocknete Holzhackschnitzel gesiebt, da hier eine geringere Anhaftung feuchter Partikel und somit eine vollständigere Siebung erwartet wird.

Als Nebeneffekt der technischen Siebung besitzen Haufwerke aus gesiebten Holzhackschnitzeln ein größeres Porenvolumen, da der Anteil feiner Partikel größtenteils entfernt wurde. Gerade für die Holzhackschnitzellagerung in Freilandmieten mit dem Ziel der natürlichen Trocknung könnte somit die in der Praxis aktuell weniger gängige Siebung von frischen Brennstoffen große Vorteile mit sich bringen. Durch das größere Porenvolumen sollte der Luftaustausch mit der Außenluft erleichtert sein [83]. Mit Wasser gesättigte Luft könnte somit schneller aus dem Mieteninneren abtransportiert und dadurch die natürliche Trocknungsleistung erhöht werden. Hinweise auf einen solchen Effekt ergaben sich u. a. aus den Ergebnissen der Behälterversuche im Projekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzellagerung“. Hier waren alle Partikel < 8 mm Durchmesser durch Siebung mechanisch entfernt worden [60]. Als Folge verbesserte sich die natürliche Trocknung der Brennstoffe und Trockenmasseverluste konnten verringert werden. Der höhere Luftaustausch könnte jedoch auch negative Folgen auf die Lagerung frischer Brennstoffe haben, falls durch ein erhöhtes Sauerstoffangebot das mikrobielle Wachstum in der Miete gefördert oder durch den begünstigten Wärmeabfluss die Verdunstung reduziert wird [55] (vgl. hierzu jedoch Sauerstoffzehrung in Abschnitt 10.4.4).

### 6.1 Problem- und Zielstellung

Bisherige Versuche in kleinen Lagerboxen haben gezeigt, dass die Siebung von Holzhackschnitzeln bei der Lagerung nicht nur zu einer besseren Trocknung, sondern auch zu geringeren Trockenmasseverlusten führen kann [60]. Zudem wurde 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 Holzhackschnitzel (z. B. dem Feinanteil), abhängen.

Ziel der hier dargestellten Studie ist die Untersuchung der Trocknungseffekte und Trockenmasseverluste von gesiebten im Vergleich zu ungesiebten Holzhackschnitzeln bei der Lagerung in Freilandmieten.

## 6.2 Material und Methode

Für die Versuche wurden zwei für Bayern typische Rohmaterialien gewählt: Waldrestholz und Energierundholz aus Nadelholz. Das Material stammte aus Durchforstungsmaßnahmen der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. und wurde erntefrisch zur Verfügung gestellt. Das Energierundholz bestand aus reinen Fichtenstämmen, wohingegen das Waldrestholz zusätzlich über einen hohen Laubbaumanteil verfügte und auch größere Stammabschnitte beinhaltete. Dieses Material fiel im Zuge einer Jungdurchforstung an, wobei im vorliegenden Fall insgesamt der Nadel- und Rindenanteil gering war (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Ausgangsmaterial für die Lagerungsversuche: Energierundholz (Bilder oben) und Waldrestholz (Bilder unten)

Die Sortimente wurden mit einem Jenz A 582 R gehackt. Hierfür wurden ein 30 × 30 mm Siebkorbeinsatz, scharfe Messer und ein Förderbandaustrag verwendet.

Die Versuchsmieten wurden im Mai 2017 auf einem Lagerplatz der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. angelegt. Der Lagerplatz befindet sich bei Putzbrunn im Landkreis München (Koordinaten: 48.06° N, 11.74° E). Der Untergrund des Lagerplatzes war nicht geert oder geschottert, sondern ein mit festgefahrenen Althackschnitzeln bedeckter

Waldboden. Für die Probenvorbereitung stand eine Lagerhalle zur Verfügung, um einen möglichen Bodeneintrag oder eine Verschmutzung der Holzhackschnitzel zu vermeiden. Es handelt sich um denselben Lagerplatz, der auch für die Untersuchungen zu Kapitel 5 und Kapitel 11 verwendet wurde.

### 6.2.1 Siebung der Holzhackschnitzel und Versuchsdesign

Bei Einlagerung der Holzhackschnitzel wurden jeweils die Hälfte der Waldrestholzhackschnitzel und die Hälfte der Energierundholzhackschnitzel bei einem nahegelegenen Biomassehof gesiebt, bevor sie zum Lagerplatz transportiert wurden. Dabei wurde jeweils die Feinfraktion (Partikel < 10 mm Durchmesser) mit einem Schwingsieb abgetrennt (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Verwendetes Schwingsieb zur Absiebung der Feinfraktion (Partikel < 10 mm)

Zur Bestimmung der Masse des ausgesiebten Feinmaterials wurden die Containermassen (in kg) bei Anlieferung zur Siebung und beim Transport der gesiebten Brennstoffe an den Lagerplatz festgehalten. Zur Bilanzierung wurde neben der Masse auch der Wassergehalt jedes Holzhackschnitzelcontainers überprüft. Hierfür wurden nach dem Abladen pro Container zehn Wassergehaltproben genommen und nach DIN EN ISO 18134-2 [32] bestimmt (vgl. Abschnitt 6.2.3). Die Menge der ausgesiebten Fraktion entspricht somit der Differenz zwischen den Containermassen der Anlieferung zur Siebung und des Rücktransports an den Lagerplatz.

Durch die Siebung der Energierundholz- und Waldrestholzhackschnitzel entstanden zwei weitere Sortimente, die neben den Referenzmieten eingelagert wurden. Somit wurden insgesamt vier Holzhackschnitzellagermieten mit je einem Volumen von circa 100 Srm in Form von Dreiecksmieten (10 × 6 × 3 m) aufgeschüttet (siehe Abbildung 15). Damit die

Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden konnte, wurden die vier Mieten direkt nebeneinander angelegt. Die Ausrichtung der Seitenflanken jeder Miete erfolgte in Nord-Ost-Richtung, um die maximale Wirkung von Sonneneinstrahlung und Wind für Trocknungszwecke zu nutzen.

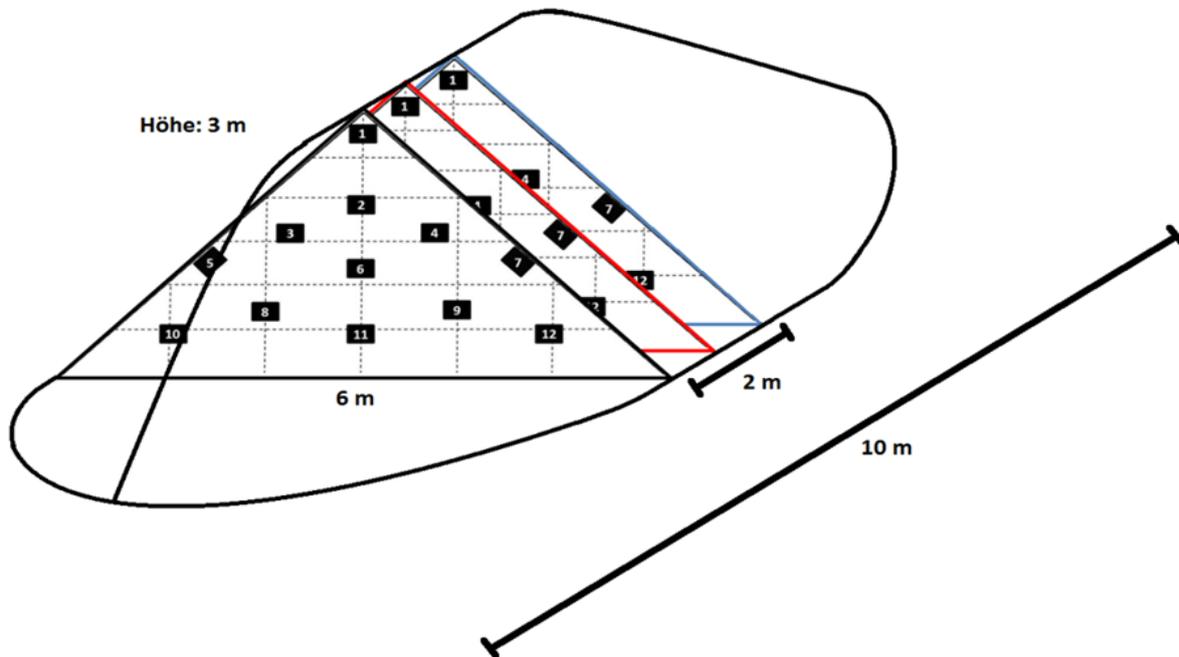


Abbildung 15: Aufbau der Holzhackschnitzellagermieten und Verteilung der Bilanzbeutel im Querschnitt

Die Probenahme nach der Lagerung erfolgte mittels Bilanzbeuteln. Diese Methode hatte sich im Vorgängerprojekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzellagerung“ als am besten geeignet erwiesen [60]. In jede Lagermiete wurden beim Aufbau zwölf Bilanzbeutel je Querschnitt eingebaut. Um die Bildung unterschiedlicher Schichten in den Holzhackschnitzellagermieten während der Lagerung nachzuweisen, wurden für den Mietenquerschnitt drei verschiedene Schichten bzw. Zonen definiert. 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 (siehe Abbildung 15 und Anhang B, Abbildung 144). Die Holzhackschnitzel zur Befüllung der Bilanzbeutel wurden zunächst intensiv mit einem Radlader homogenisiert, um für alle Proben einer Miete übereinstimmende Ausgangsvoraussetzungen zu schaffen und eine geringe Streuung der Einlagerungswerte zu erreichen. Um statistische Berechnungen zu ermöglichen und die Datenqualität weiter zu erhöhen, wurden zwei weitere vollständige Probensegmente mit jeweils zwölf Beuteln als Messwiederholungen angelegt (siehe Abbildung 15). Jede Miete wurde mit einem diffusionsoffenen Vlies (PolyTex, 200 g m<sup>-2</sup>, Zill GmbH & Co. KG) abgedeckt, um sie vor Niederschlag zu schützen (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Darstellung der vier abgedeckten Lagermieten zum Zeitpunkt der Einlagerung

Zur Aufzeichnung der Wetterdaten während des gesamten Lagerzeitraums wurde in direkter Nähe zu den Mieten eine Wetterstation installiert. Die Wetterstation iMETOS pro (Pessl Instruments) misst unter anderem die Lufttemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ), die relative Luftfeuchte (%) und den Niederschlag (mm). Zusätzlich ist die Wetterstation mit vier Sensorketten ausgestattet, mit denen die Temperaturen der Holzhackschnitzel für jede Miete jeweils auf den Höhen 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über dem Boden zentral in den Mieten gemessen wurden.

## 6.2.2 Probenahme

Der Ausgangszustand aller vier Lagerungssortimente wurde repräsentativ während der Einlagerung und Bilanzbeutelherstellung beprobt und analysiert. Während der Befüllung jedes zweiten Beutels wurde eine Wassergehaltprobe genommen, zu jedem dritten Beutel eine Probe zur Aschegehalt- und Heizwertanalyse und zur Analyse der chemischen Inhaltsstoffe. Des Weiteren erfolgten beim Aufbau jeder Miete die Bestimmung der Schüttdichte ( $n = 6$ ) und der Partikelgrößenverteilung ( $n = 3$ ) (siehe Abschnitt 6.2.3).

Nach der Siebung wurde das ausgesiebte Feinmaterial beprobt. Pro Sortiment wurden dabei fünf Wassergehaltproben ( $n = 5$ ) und drei Proben zur Laboranalyse von Aschegehalt, Heizwert und der chemischen Inhaltsstoffe ( $n = 3$ ) genommen.

Bei Auslagerung der Mieten nach einer Lagerungsdauer von 22 Wochen wurde eine weitere Beprobung der Holzhackschnitzel vorgenommen. Die Beprobung erfolgte mittels der eingebauten Bilanzbeutel. Diese wurden händisch bzw. mit dem Radlader über das Zugseil vorsichtig aus der Miete gezogen. Da während des Zugvorgangs feines Material aus den Bilanzbeuteln rieseln kann, wurden auch bei diesen Versuchen Zugverluste einbezogen. Diese orientierten sich an den Ergebnissen des Vorgängerprojekts [60]. Bei den ungesiebten Waldrestholzhackschnitzeln wurden zur Masse bei Auslagerung 2,3 g und bei den ungesiebten Energierundholzhackschnitzeln 3,1 g addiert. Für die gesiebten Varianten wurden keine Verluste durch das Ziehen einberechnet, da der Feinanteil dieser Varianten vernachlässigbar gering war.

Zur Bilanzierung der Trockenmasseverluste wurde neben den Zugverlusten auch die Leermasse der Beutel bei Auslagerung bestimmt, um durch anhaftende Feuchtigkeit am Bilanzbeutel keine Fehlmessungen zu generieren. Die Trockenmasseverluste berechneten sich somit aus der Differenz der Trockenmasse der Auslagerung zur Einlagerung unter Berücksichtigung möglicher Zugverluste und anhaftender Feuchtigkeit an den Beuteln.

### 6.2.3 Brennstoffanalysen

Die Brennstoffqualität wurde über internationale Normen zur Analyse biogener Festbrennstoffe bestimmt (siehe Tabelle 12).

*Tabelle 12: Liste der verwendeten Normen für biogene Festbrennstoffe und deren Bezeichnungen*

Norm	Inhalt	Verweis
DIN EN ISO 17225-1	Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen	[27]
DIN EN ISO 17225-4	Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln	[28]
DIN EN ISO 14780	Probenherstellung	[34]
DIN EN ISO 17827-1	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe – Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber	[29]
DIN EN ISO 17828	Bestimmung der Schüttdichte	[30]
DIN EN ISO 18122	Bestimmung des Aschegehaltes	[31]
DIN EN ISO 18125	Bestimmung des Heizwertes	[35]
DIN EN ISO 18134-2	Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren	[32]
DIN EN ISO 18135	Probenahme	[36]

Zur Bestimmung des Ausgangswassergehalts wurde während des Befüllens der Bilanzbeutel zu jedem zweiten Beutel eine Wassergehaltprobe gewonnen und im Feld eingewogen (Präzisionswaage 470-36, Kern & Sohn GmbH; Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  g). Die Holzhackschnitzel wurden im Trockenschrank (Trockenschrank FED720, Binder GmbH) bei  $105 \pm 2$  °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Der Wassergehalt ergibt sich dabei aus der Masse der Brennstoffe vor und nach der Trocknung (vgl. Unterkapitel 4.1).

Die Bestimmung der Schüttdichte (in  $\text{kg m}^{-3}$ ) wurde an den homogenisierten Haufen vor Einlagerung der Mieten nach DIN EN ISO 17828 [30] durchgeführt. Hierzu kam ein 50 l fassender Messzylinder aus Edelstahl zum Einsatz. Die Schüttdichte ergibt sich aus der Masse der Brennstoffe bezogen auf das Füllvolumen (inkl. Verdichtung der Brennstoffe durch dreimalige Stoßanwendung aus definierter Höhe).

Für die Bestimmung des Aschegehalts und des Heizwerts wurden zunächst die gewonnenen Proben bei Raumtemperatur luftgetrocknet. Anschließend wurde eine Teilchengrößenreduktion vorgenommen, indem das Probenmaterial mit einer Schneidmühle (Pulverisette 19, Fritsch GmbH) mit schwermetallfreien Schneidwerkzeugen gemahlen wurde. Die Probengefäße wurden anschließend gasdicht verschlossen. Der Aschegehalt wurde nach DIN EN ISO 18122 [31] in einem Muffelofen (LT15, Nabertherm) analysiert. Der Heizwert wurde nach DIN EN ISO 18125 [35] in einem Bombenkalorimeter (C 2000 basic, IKA Analysetechnik) bestimmt.

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte mittels eines horizontalen Siebverfahrens (AS400, Retsch GmbH & Co. KG) mit Rundlochsieben (Lochdurchmesser: 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm, 63 mm) nach DIN EN ISO 17827-1 [29]. Daneben müssen für die Bestimmung der Partikelgrößenklasse nach DIN EN ISO 17225-4 die maximale Partikellänge und die maximale Querschnittfläche der überlangen Partikel händisch bestimmt werden.

Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgte durch das Prüflabor Eurofins Umwelt Ost GmbH. Folgende Elemente wurden dabei untersucht: Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor, Aluminium, Kalzium, Kalium, Magnesium, Natrium, Phosphor und Silizium. Die Bestimmung erfolgt ebenfalls nach aktuellen DIN-EN-ISO-Normen für biogene Festbrennstoffe.

## **6.3 Ergebnisse und Diskussion**

### **6.3.1 Charakterisierung des Ausgangsmaterials**

Der Wassergehalt lag bei beiden Sortimenten nach dem Hacken über 50 m-% (siehe Tabelle 13). Dies ist ein typischer Wassergehalt erntefrischer Waldhackschnitzel [80]. Folglich kam es zu keiner Vortrocknung des Materials vor Beginn der Versuchsreihe. Nach der mechanischen Siebung mittels Schwingsiebs war der Wassergehalt der Hauptfraktion jeweils etwas niedriger, da das ausgesiebte Feinmaterial insgesamt einen höheren Wassergehalt aufwies (siehe Tabelle 14). Bei der Klassifizierung der Holzhack-

schnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 war der Wassergehalt der limitierende Faktor. Alle Brennstoffe konnten maximal in die Klasse B1 eingeordnet werden.

*Tabelle 13: Charakterisierung des Ausgangsmaterials der vier Lagermieten (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)*

Parameter	Variante	Mittelwert ( $\pm$ Standardabweichung)
Wassergehalt (m-%)	Wrh-HS ungesiebt	50,8 $\pm$ 0,5 [ $n = 24$ ]
	Wrh-HS gesiebt	47,0 $\pm$ 0,6 [ $n = 24$ ]
	Er-HS ungesiebt	50,3 $\pm$ 0,5 [ $n = 24$ ]
	Er-HS gesiebt	49,6 $\pm$ 1,0 [ $n = 24$ ]
Partikelgrößenklasse	Wrh-HS ungesiebt	P31S [ $n = 3$ ]
	Wrh-HS gesiebt	P45S [ $n = 3$ ]
	Er-HS ungesiebt	P31S [ $n = 3$ ]
	Er-HS gesiebt	P31S [ $n = 3$ ]
Siebfraction $\leq 8$ mm (m-%)	Wrh-HS ungesiebt	17,7 $\pm$ 2,6 [ $n = 3$ ]
	Wrh-HS gesiebt	4,8 $\pm$ 0,2 [ $n = 3$ ]
	Er-HS ungesiebt	15,7 $\pm$ 0,4 [ $n = 3$ ]
	Er-HS gesiebt	3,4 $\pm$ 0,6 [ $n = 3$ ]
Aschegehalt (m-%, wf)	Wrh-HS ungesiebt	1,0 $\pm$ 0,1 [ $n = 12$ ]
	Wrh-HS gesiebt	0,7 $\pm$ 0,1 [ $n = 12$ ]
	Er-HS ungesiebt	0,9 $\pm$ 0,1 [ $n = 12$ ]
	Er-HS gesiebt	0,9 $\pm$ 0,1 [ $n = 12$ ]
Heizwert (MJ kg <sup>-1</sup> , wf)	Wrh-HS ungesiebt	18,6 $\pm$ 0,1 [ $n = 6$ ]
	Wrh-HS gesiebt	18,3 $\pm$ 0,1 [ $n = 6$ ]
	Er-HS ungesiebt	18,7 $\pm$ 0,2 [ $n = 6$ ]
	Er-HS gesiebt	18,7 $\pm$ 0,1 [ $n = 6$ ]
Schüttdichte (kg m <sup>-3</sup> , ar)	Wrh-HS ungesiebt	362,0 $\pm$ 5,0 [ $n = 6$ ]
	Wrh-HS gesiebt	373,0 $\pm$ 4,0 [ $n = 6$ ]
	Er-HS ungesiebt	314,0 $\pm$ 6,0 [ $n = 6$ ]
	Er-HS gesiebt	291,0 $\pm$ 7,0 [ $n = 6$ ]

Der Aschegehalt der untersuchten Sortimente lag bei allen Varianten unter 1 m-% (wf) (Tabelle 13). Typische Aschegehalte bei Waldrestholz schwanken i. d. R. zwischen 2,0 und 3,0 m-% (wf) und bei Energierundholz zwischen 1,0 und 1,5 m-% (wf) [27] [52] [80] [95] [98]. Der Aschegehalt lag somit beim Energierundholz nahe dem typischen Wertebereich, beim Waldrestholz aber deutlich darunter. Dies deutet auf eine untypisch gute Qualität des Ausgangsmaterials mit einem hohen Holzanteil und nur geringen Anteilen

an Nadeln, Rinde oder Verschmutzung mit Mineralboden hin (vgl. hierzu Abbildung 13). In Bezug auf den Aschegehalt konnten alle Sortimente (auch das Waldrestholz) in die qualitativ höchste Aschegehaltsklasse A1.0 nach DIN EN ISO 17225-4 eingeordnet werden.

In Bezug auf die Partikelgrößenverteilung konnten die ungesiebten Wrh-HS sowie die gesiebten und ungesiebten Er-HS nach DIN EN ISO 17225-4 als P31S eingeordnet werden (Tabelle 13). Die gesiebten Wrh-HS waren aufgrund unterschiedlicher Massenverhältnisse nach der Siebung der nächsthöheren Klasse (P45S) zuzuordnen.

Die Heizwerte der Waldrestholzhackschnitzel waren etwas geringer als Angaben aus der Literatur (Tabelle 13) und lagen auf dem Niveau von Energierundholz. Ein typischer Heizwert (auf wasserfreier Bezugsbasis) wird häufig mit  $19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  für Waldrestholz [27] und mit  $18,8$  bis  $18,9 \text{ MJ kg}^{-1}$  für Energierundholz [52] angegeben. Höhere Heizwerte werden vor allem durch einen höheren Anteil an Rinde und Nadeln verursacht (Rinde: ca.  $19,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ , Nadeln: ca.  $20,0 \text{ MJ kg}^{-1}$ , reines Holz: ca.  $18,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) [40] [52]. Niedrigere Heizwerte können allerdings auch durch einen hohen Anteil anorganischer Sekundärverunreinigungen bzw. nicht brennbaren Materials verursacht werden [40] [52].

Die Schüttdichten im Anlieferungszustand wurden primär durch den Wassergehalt eines jeden Sortiments beeinflusst (Tabelle 13). Der Unterschied zwischen den gesiebten und ungesiebten Varianten war dabei gering und nicht signifikant. Zwischen den Sortimenten war der Unterschied dagegen deutlich größer und auch statistisch signifikant (t-Test:  $p \leq 0,01$ ), was hauptsächlich auf die unterschiedliche Dichte des Ausgangsmaterials aufgrund variierender Anteile an Laub- und Nadelholz zurückzuführen ist.

*Tabelle 14: Charakterisierung des ausgesiebten Feinmaterials (Partikel  $\leq 10 \text{ mm}$ ) beider Sortimente (wf = wasserfreie Bezugsbasis)*

Parameter	Variante	Mittelwert ( $\pm$ Standardabweichung)
Wassergehalt (m-%)	Wrh-HS Feinmaterial	$55,4 \pm 2,5$ [ $n = 5$ ]
	Er-HS Feinmaterial	$54,3 \pm 2,6$ [ $n = 5$ ]
Aschegehalt (m-%, wf)	Wrh-HS Feinmaterial	$2,7 \pm 0,2$ [ $n = 3$ ]
	Er-HS Feinmaterial	$2,4 \pm 0,6$ [ $n = 3$ ]
Heizwert ( $\text{MJ kg}^{-1}$ , wf)	Wrh-HS Feinmaterial	$18,7 \pm 0,2$ [ $n = 3$ ]
	Er-HS Feinmaterial	$18,8 \pm 0,1$ [ $n = 3$ ]

Die Analysewerte des ausgesiebten Feinmaterials (siehe Tabelle 14) erklären die Unterschiede in der Brennstoffqualität zwischen den gesiebten und ungesiebten Holzhackschnitzeln (vgl. Tabelle 13). Durch das Aussieben der feinen Partikel (bestehend vornehmlich aus Nadeln sowie feinen Rinden- und Holzstücken)  $< 10 \text{ mm}$  wurden Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert der gesiebten Holzhackschnitzel jeweils verringert, da die Werte des Feinmaterials über den Werten der ungesiebten Brennstoffe lagen. Be-

sonders groß war der Unterschied zwischen den gesiebten und ungesiebten Waldrestholzhackschnitzeln. Dieser war beim Aschegehalt und Heizwert sogar signifikant (t-Test: Aschegehalt:  $p \leq 0,01$ , Heizwert:  $p \leq 0,01$ ).

Neben den Qualitätsparametern Aschegehalt und Heizwert wurden folgende Elementgehalte bei Einlagerung der Holzhackschnitzel über externe Labore bestimmt: Chlor (Cl), Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S), Aluminium (Al), Kalzium (Ca), Kalium (Ka), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Phosphor (P) und Silizium (Si) (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16).

*Tabelle 15: Elementgehalte bei Einlagerung der Waldrestholzhackschnitzel (wasserfreie Bezugsbasis)*

Element, Einheit	Wrh-HS ungesiebt, Einlagerung	Wrh-HS gesiebt, Einlagerung	Wrh ausgesiebt, Feinmaterial, Einlagerung
C, m-%	50,1	49,4	50,6
H, m-%	6,1	6,2	6,0
N, m-%	0,35	0,33	0,5
S, m-%	0,011	0,007	0,016
Cl, m-%	0,008	0,008	0,019
Al, mg kg <sup>-1</sup>	61	43	420
Ca, mg kg <sup>-1</sup>	1700	1320	5380
K, mg kg <sup>-1</sup>	820	887	1550
Mg, mg kg <sup>-1</sup>	270	258	621
Na, mg kg <sup>-1</sup>	< 10	< 10	39
P, mg kg <sup>-1</sup>	131	121	350
Si, mg kg <sup>-1</sup>	499	286	3740

Beim Stickstoffgehalt konnte eine leichte Veränderung durch die Siebung festgestellt werden. Nadeln und Rinde haben i. d. R. höhere N-Gehalte als reines Holz [40]. Durch das Absieben von Nadeln und Rindenstücken wurde den Holzhackschnitzeln ein Teil des Stickstoffs entzogen.

Bei den übrigen Elementen waren vor allem Veränderungen von Kalzium- und Siliziumgehalten erkennbar. Dies lässt sich am ehesten durch eine Änderung im Rindenanteil erklären. Rinde weist meist höhere Kalziumgehalte als reines Holz auf [40], weshalb dieses Element durch die Siebung im Feinmaterial angereichert wurde. Das ausgesiebte Feinmaterial wies zudem siebenmal höhere Siliziumgehalte als das Ausgangsmaterial auf. Insgesamt sind jedoch alle Siliziumgehalte als gering zu bewerten. In der Literatur werden Gehalte zwischen 200 (Minimum für Er-HS) und 4000 mg kg<sup>-1</sup> (Maximum für Wrh-HS) genannt [52]. Eine Verschmutzung der Brennstoffe mit Mineralboden, die eben-

falls eine Änderung im Ca- und Si-Gehalt bei der Siebung erklären könnte, wird aufgrund der geringen Aschegehalte als unwahrscheinlich bewertet.

*Tabelle 16: Elementgehalte bei Einlagerung der Energierundholzhackschnitzel (wasserfreie Bezugsbasis)*

Element, Einheit	Er-HS ungesiebt, Einlagerung	Er-HS gesiebt, Einlagerung	Er ausgesiebt, Feinmaterial, Einlagerung
C, m-%	48,1	50,8	50,9
H, m-%	6	6	5,9
N, m-%	0,16	0,12	0,21
S, m-%	0,006	0,011	0,008
Cl, m-%	< 0,005	< 0,005	0,006
Al, mg kg <sup>-1</sup>	98	64	520
Ca, mg kg <sup>-1</sup>	1980	1780	2820
K, mg kg <sup>-1</sup>	617	568	824
Mg, mg kg <sup>-1</sup>	290	290	454
Na, mg kg <sup>-1</sup>	15	<10	45
P, mg kg <sup>-1</sup>	105	90	150
Si, mg kg <sup>-1</sup>	706	782	4950

HARTMANN [52] beschreibt die Auswirkungen chemischer Inhaltsstoffe auf das Verbrennungsverhalten von Holzhackschnitzeln. Ausgehend hiervon sollten bei der Verbrennung der untersuchten Holzhackschnitzel in Biomassefeuerungen Unterschiede in den NO<sub>x</sub>-Emissionen, ggf. auch in den Partikelemissionen sowie im Ascheerweichungsverhalten zwischen den gesiebten und ungesiebten Holzhackschnitzeln messbar sein. Zum Beispiel führen geringere N-Gehalte im Brennstoff zu geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionen. Höhere Ca-Gehalte begünstigen dagegen beispielsweise das Ascheschmelzverhalten [52].

### 6.3.2 Klimabedingungen und Entwicklung der Miettemperaturen

Am Lagerplatz fielen während der 22 Wochen 570 mm Niederschlag, die mittlere Lufttemperatur lag bei 15,8 °C und die relative Luftfeuchte bei 80,3 % (siehe Abbildung 17).

Im Vergleich zu einer nahegelegenen Wetterstation in Ebersberg entsprachen die gemessenen Durchschnittstemperaturen dem Langzeitmittel (Mai bis Oktober 2004 bis 2016: 15,6 °C [24]). Speziell die Monate Mai und Juni 2017 waren jedoch wärmer und trockener als in den vorangegangenen zwölf Jahren. Dies spiegelt sich auch in dem hohen Sättigungsdefizit der Luft wider, das in dieser Zeit ein hohes Wasseraufnahmevermögen der Luft mit sich brachte (siehe Abbildung 18). Die Maximaltemperatur während der La-

gerung betrug  $35,9\text{ °C}$  (01.08.17), die maximale Niederschlagsmenge fiel knapp eine Woche zuvor und betrug  $46\text{ mm}$ .

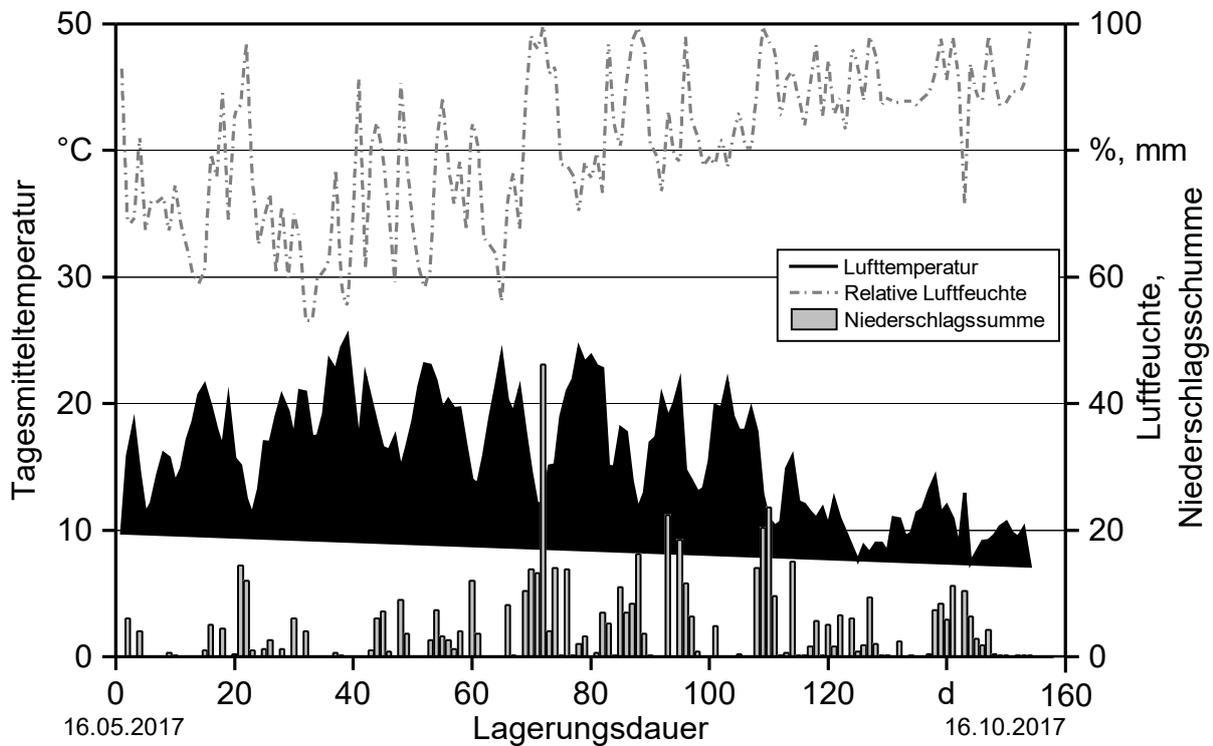


Abbildung 17: Verlauf der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Niederschlagsmenge während der gesamten Lagerungsdauer

Die Maximaltemperaturen in den Lagermieten wurden nach fünf (Wrh-HS ungesiebt), 16 (Er-HS ungesiebt), 19 (Wrh-HS gesiebt) bzw. 99 Tagen (Er-HS gesiebt) erreicht. Die ungesiebten Varianten zeigten dabei jeweils höhere Maximaltemperaturen. Diese entstanden vermutlich durch das bessere Nährstoffangebot des nicht ausgesiebten Feinanteils (siehe Tabelle 13). Als Folge dessen führt das begünstigte Wachstum der Mikroorganismen zu höheren Temperaturen. Gleichzeitig kann ein höherer Feinanteil einen stärkeren Wärmestau bzw. eine schlechtere Durchlüftung verursachen. Dies traf vor allem auf die ungesiebte Wrh-HS-Miete zu. Diese erreichte in kürzester Zeit eine Maximaltemperatur von  $63,1\text{ °C}$ . Ein Einfluss der Lufttemperatur auf die Mietentemperatur war hierbei vergleichsweise gering. Somit waren tageszeitliche Schwankungen der Temperatur nicht erkennbar.

Abbildung 18 zeigt, dass die Siebung beider Sortimente jeweils zu einer geringeren Mietentemperatur und gleichzeitig zu größeren tageszeitlichen Schwankungen führte, was auf die bessere Durchlüftung durch den geringeren Feinanteil zurückzuführen ist. Die ungesiebte Wrh-HS-Miete zeigte den typischen raschen Anstieg in der Temperatur und daraufhin ein kontinuierliches Abkühlen, wohingegen die Temperatur in der ungesiebten Er-HS-Miete über den gesamten Lagerungszeitraum konstant um ca.  $30\text{ °C}$  schwankte. Die Temperatur der gesiebten Er-HS-Miete lag währenddessen durchschnittlich unter

25 °C, weshalb davon auszugehen ist, dass bei dieser Miete die mikrobielle Aktivität auf einem eher niedrigen Niveau lag.

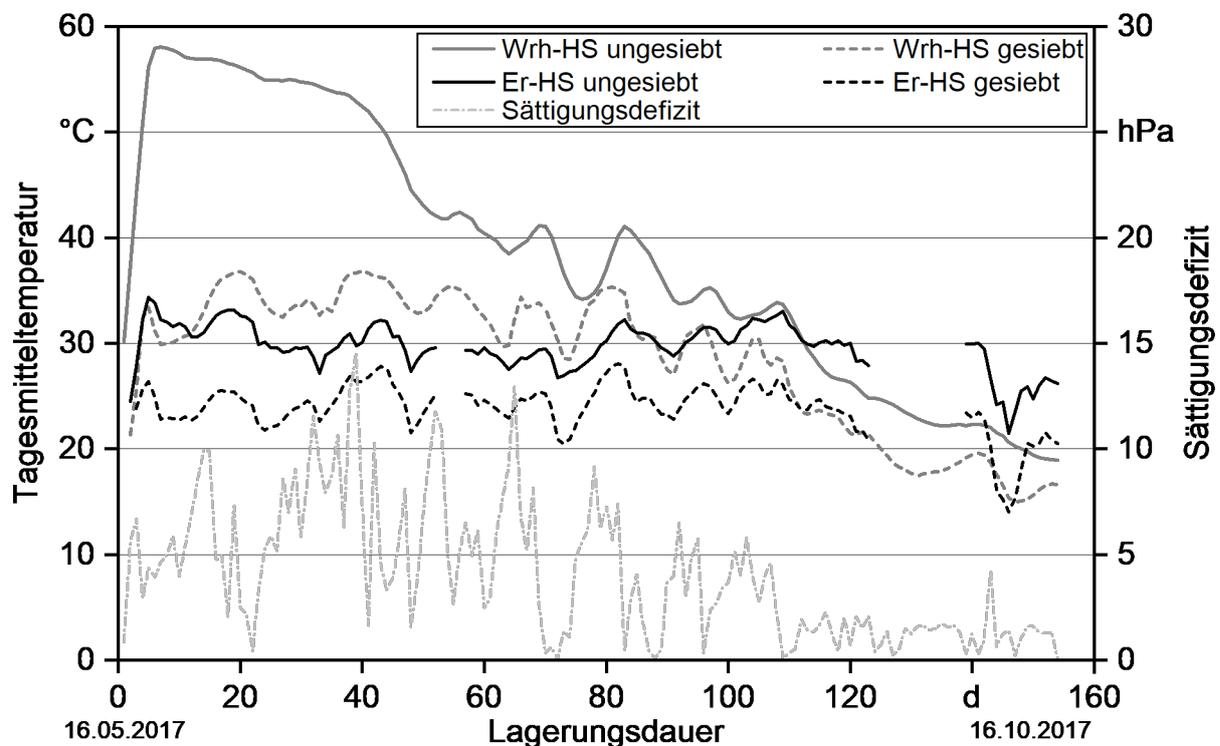


Abbildung 18: Verlauf der Mietentemperaturen (Tagesmittelwerte der drei Sensoren je Miete) und des Sättigungsdefizits während der gesamten Lagerungsdauer

### 6.3.3 Trocknungseffekte und Trockenmasseverluste

Insgesamt trockneten die Holzhackschnitzel in allen Mieten um einen Wert von 14,8 bis 20,9 Prozentpunkten (Tabelle 17). Dabei trocknete die gesiebte Wrh-HS-Miete am stärksten. Der Wassergehalt dieser Miete unterschied sich bei Auslagerung signifikant von den drei übrigen Varianten (ANOVA mit Tukey-Test:  $p \leq 0,05$ ).

Bei den gesiebt Varianten trocknete jeweils die Deckschicht signifikant stärker als die Zwischenschicht oder Kernzone (ANOVA mit Tukey-Test:  $p \leq 0,05$ ). Bei den gesiebt Waldrestholzhackschnitzeln lag der Wassergehalt in der Deckschicht nach 22 Wochen bei  $19,8 \pm 7,3$  m-% und bei den gesiebt Energierundholzhackschnitzeln bei  $21,4 \pm 11,1$  m-%.

Bei den ungesiebt Varianten lag dagegen der Wassergehalt der Beutel am höchsten Punkt der Deckschicht (Beutel Nr. 1) deutlich höher als der Wassergehalt der restlichen Miete. Bei den ungesiebt Waldrestholzhackschnitzeln lag dieser bei  $64,5 \pm 0,5$  m-% und bei den ungesiebt Energierundholzhackschnitzeln bei  $51,6 \pm 4,4$  m-% (siehe Abbildung 145 bis Abbildung 148 im Anhang, Abschnitt B). Es ist davon auszugehen, dass durch den höheren Feinanteil (siehe Tabelle 13) der entstandene Wasserdampf auf-

grund einer schlechteren Durchlüftung in den oberen Schichten der jeweiligen Miete wieder kondensierte und dadurch zu höheren Wassergehalten in dieser Schicht führte.

*Tabelle 17: Mittlere Wassergehalte (in m-%,  $\pm$  Standardabweichung), Wassergehaltänderungen und Trockenmasseverluste der Hackschnitzelmieten nach einer Lagerungsdauer von 22 Wochen. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) zeigen signifikante Unterschiede im Mittel (ANOVA mit Tukey-Test:  $p \leq 0,05$ ).*

Sortiment	Wassergehalt nach 22 Wochen	Änderungen des Wassergehalts $\Delta$	Trockenmasseverluste nach 22 Wochen
Wrh-HS ungesiebt	35,4 $\pm$ 11,8 <sup>b</sup>	-15,4	7,3
Wrh-HS gesiebt	26,1 $\pm$ 5,5 <sup>a</sup>	-20,9	8,6
Er-HS ungesiebt	35,0 $\pm$ 10,6 <sup>b</sup>	-15,3	7,0
Er-HS gesiebt	34,8 $\pm$ 10,3 <sup>b</sup>	-14,8	5,4

Bei der gesiebten Wrh-HS Miete wurden nicht nur die beste Trocknung sondern auch die höchsten Trockenmasseverluste von 8,6 m-% in 22 Wochen festgestellt (Tabelle 17). Über die gesamte Lagerungsdauer traten bei dieser Miete hohe Temperaturen auf. Das dadurch bedingte hohe Temperaturgefälle gegenüber der Außenluft sowie eine begünstigte Durchlüftung durch den verringerten Feinanteil führten bei dieser Miete zu einem schnellen Abtransport der warmen, feuchten Luft aus dem Mieteninneren. Gleichzeitig führte jedoch die bessere Durchlüftung vermutlich zu einer höheren Sauerstoffverfügbarkeit in der Miete, was das Pilzwachstum begünstigte und die Trockenmasseverluste erhöhte.

Die geringste Trocknung (14,8 m-%) und gleichzeitig die geringsten Trockenmasseverluste (5,4 m-%) verzeichnete die gesiebte Er-HS-Miete. Diese Miete befand sich über den gesamten Lagerungszeitraum auf einem niedrigen Temperaturniveau. Die Durchschnittstemperaturen überstiegen nicht einmal 25 °C, d. h. die in der Literatur als optimal für das Pilzwachstum beschriebene Temperatur [39]. Gleichzeitig war das Temperaturgefälle gegenüber der Außenluft gering, weshalb die feuchtwarme Luft langsamer abtransportiert werden konnte und die Trocknungsleistung insgesamt geringer ausfiel.

Im Vergleich zu den bisher durchgeführten Lagerungsversuchen und der Literatur befinden sich die Trockenmasseverluste der Freilandmieten mit 1,0 bis 1,6 m-% pro Monat im unteren Bereich. Literaturwerte geben eine Spannweite der monatlichen Verlustrate von 0,4 m-% [56] bei der Hallenlagerung von Fichtenhackschnitzeln bis hin zu 4,5 m-% [4] bzw. 5,5 m-% [107] bei der Freilandlagerung von Pappel- bzw. Nadelholzhackschnitzeln an. Die hier gemessenen niedrigen Trockenmasseverluste sind offenbar der Tatsache geschuldet, dass es sich beim Lagergut um nährstoffarmes Energierundholz bzw. um ein „rundholzähnliches“ Material handelte.

### 6.3.4 Aschegehalt und Heizwert nach der Lagerung

Die Aschegehalte änderten sich während der Lagerung bei drei Lagermieten nicht signifikant. Nur der Aschegehalt der gesiebten Waldrestholzhackschnitzel verzeichnete einen signifikanten Anstieg (t-Test:  $p \leq 0,05$ , Tabelle 13 und Tabelle 18). Dieser korrelierte schwach positiv mit den Trockenmasseverlusten (Pearson-Korrelation:  $R = 0,43$ ;  $p \leq 0,16$ ).

Im Gegensatz zum Aschegehalt kam es während der Lagerung zu einem geringen, aber signifikanten Anstieg im Heizwert bei allen vier Lagermieten. Die Zunahme lag bei  $0,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  (Er-HS ungesiebt) bis  $0,4 \text{ MJ kg}^{-1}$  (Er-HS gesiebt). Die Heizwertsteigerung (1,1 bis 2,1 %) während der Lagerung könnte durch die Zersetzung leicht abbaubarer Holzbestandteile, wie beispielsweise Zellulose, erklärt werden. Zellulose besitzt einen 1,5-fach geringeren Heizwert als Lignin [39]. Durch den Abbau während der Lagerung erhöhte sich somit eventuell der Ligningehalt in der Brennstoffmasse und führte zu dem gemessenen Heizwertanstieg. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Trockenmasseverlusten und Heizwertänderungen konnte allerdings nicht festgestellt werden.

**Tabelle 18:** *Mittlere Aschegehalte und Heizwerte ( $\pm$  Standardabweichung) der Hackschnitzelmieten nach einer Lagerungsdauer von 22 Wochen. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei Auslagerung ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test) (wf = wasserfreie Bezugsbasis).*

Sortiment	Aschegehalt nach 22 Wochen in m-% (wf)	Heizwert nach 22 Wochen in $\text{MJ kg}^{-1}$ (wf)
Wrh-HS ungesiebt	1,0 + 0,2 <sup>b</sup>	18,9 + 0,1 <sup>b</sup>
Wrh-HS gesiebt	0,7 + 0,1 <sup>a</sup>	18,6 + 0,1 <sup>a</sup>
Er-HS ungesiebt	0,9 + 0,2 <sup>ab</sup>	18,9 + 0,1 <sup>b</sup>
Er-HS gesiebt	0,8 + 0,1 <sup>a</sup>	19,0 + 0,1 <sup>b</sup>

Bei Auslagerung der Holzhackschnitzelsortimente zeigten die gesiebten Wrh-HS signifikant niedrigere Aschegehalte und Heizwerte im Vergleich zu den anderen Sortimenten (siehe Tabelle 18).

Als zusammenfassende Qualitätsbewertung kann festgehalten werden, dass nach DIN EN ISO 177225-4 alle Holzhackschnitzel bis auf die ungesiebten Wrh-HS nach der Lagerung in die Produktklasse A2 eingeordnet werden konnten [28]. Bei einer weiteren Trocknung (Wassergehalt  $\leq 25 \text{ m-%}$ ) wäre sogar eine Qualitätsverbesserung bis A1 bei allen Sortimenten möglich gewesen. Der Wassergehalt der ungesiebten Wrh-HS war der Grund dafür, dass diese Holzhackschnitzel nach der Lagerung nur als B1 einzuordnen waren.

### 6.3.5 Änderung des Energieinhalts

Die tatsächliche Brennstoff-Energiemenge, die am Ende der Lagerung bei allen Mieten zur Verfügung stand, wird in Abbildung 19 dargestellt. Sie errechnet sich aus dem Heizwert (im Anlieferungszustand) und den gemessenen Trockenmasseverlusten. Der Energieinhalt bei Einlagerung stellt dabei 100 % dar.

Bei allen Lagermieten kam es zu einem geringen Energiegewinn während der Lagerung. Die durch die mikrobielle Zersetzung bedingten Trockenmasseverluste konnten bei allen Varianten durch die guten Trocknungsleistungen kompensiert werden. Der größte Energiegewinn von 2,7 % wurde bei der gesiebten Er-HS Miete festgestellt. Dieser wurde durch die insgesamt sehr geringen Trockenmasseverluste verursacht. Im Gegensatz dazu zeigte sich keine Verbesserung im Energieinhalt durch die Siebung des Waldrestholzes.

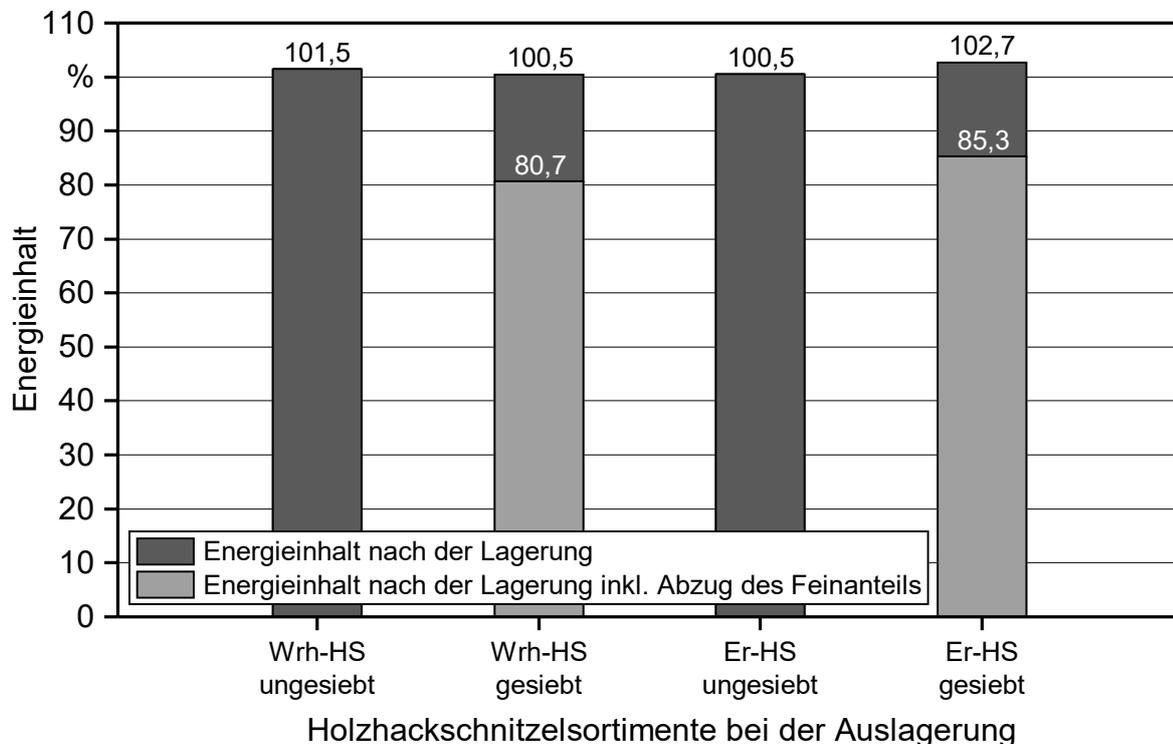


Abbildung 19: Änderungen des Energieinhalts bei der Lagerung, Einlagerung entspricht 100 %

Bezieht man die Brennstoffmasse ein, die als Feinanteil durch die Siebung verloren ging (Wrh-HS: 18 m-%; Er-HS: 16 m-%), sind bei den gesiebten Holzhackschnitzelmieten allerdings höhere Verluste im Energieinhalt zu verzeichnen (Wrh-HS: -19,3 %, Er-HS: -14,7 %). Wird der ausgesiebte Feinanteil nicht weiterverwendet, führt die Siebung somit zu einem hohen wirtschaftlichen Risiko. Passende Nutzungsmöglichkeiten, beispielsweise in der Kompostierung, als Einstreu oder als Substrat für die stoffliche Nutzung im Rahmen der Bioökonomie müssen identifiziert und erschlossen werden.

#### 6.4 Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der dargestellten Teilstudie waren stark abhängig vom gewählten Ausgangsmaterial und der jeweils untersuchten Variante. Die verwendeten Waldrestholzhackschnitzel hatten insgesamt eine sehr hohe Qualität. Der Feinanteil von Wrh-HS aus Nadelholz ist meist deutlich höher, als das bei dem hier verwendeten Material der Fall war. Somit hatte die hier dargestellte Siebung deutlich geringere Effekte als sie es wahrscheinlich bei durchschnittlichen Waldrestholzhackschnitzeln gehabt hätte. Die Energie- und Rundholzhackschnitzel waren dagegen typisch für dieses Sortiment und von insgesamt sehr guter Qualität.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor waren die Klimabedingungen während der Lagerungsperiode. Je trockener und wärmer es ist, desto besser sind auch die Trocknungserfolge der Holzhackschnitzel aufgrund eines hohen Sättigungsdefizits der Luft. Insgesamt waren die Klimabedingungen der ersten Monate günstig für die Trocknung aller vier Lagermieten. Da es zudem durch die Vliesabdeckung zu keiner Wiederbefeuchtung der Holzhackschnitzel kam, trockneten alle Mieten stark ab.

Aus den Erfahrungen der gezeigten Freilandversuche lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

- Die Siebung der Brennstoffe kann bei hochwertigem Energie- und Rundholz zu verringerten Trockenmasseverlusten und dadurch zu einem Energiegewinn führen.
- Die Siebung von Waldrestholz hat bei der Mietenlagerung keine lagerungstechnischen Vorteile im Vergleich zur ungesiebten Variante. Sie sollte nur durchgeführt werden, wenn die Partikelgrößenverteilung und der Aschegehalt für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen optimiert werden sollen, nicht jedoch zur Verbesserung der natürlichen Trocknung.
- Falls eine Mietenlagerung auf eine Siebung folgt, sollte die Miete abgedeckt oder unter Dach gelagert werden.
- Die Siebung verringert in allen Fällen die Mietentemperatur. Sie könnte somit als eine Maßnahme zur Vermeidung von Selbstentzündung dienen.

Zu beachten ist jedoch, dass die Siebung voraussichtlich nur dann wirtschaftlich darstellbar ist, wenn für das ausgesiebte Feinmaterial eine weitere, ökonomisch interessante Verwendung gefunden wird.



## 7 Neue Konservierungsmethoden für die Holzhackschnitzellagerung

KUPTZ, D.; LESCHE, S.; MENDEL, T.; HARTMANN, H.

Bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln kommt es zu Trockenmasseverlusten, die hauptsächlich durch den mikrobiellen Abbau der Biomasse erfolgen. Werden die Lebensbedingungen von Bakterien und Pilzen durch einfache Managementmethoden deutlich verschlechtert, so könnte es zu einer starken Verringerung der Verlustraten und damit zu einer höheren Energieausbeute sowie zu einem Erhalt der Brennstoffqualität bei der Lagerung kommen.

Die anaerobe Lagerung stellt eine potenzielle Möglichkeit dar, die Lebensbedingungen holzerstörender Mikroorganismen deutlich zu verschlechtern. Die meisten Mikroorganismen benötigen Sauerstoff für ein optimales Wachstum [20] [55]. Folglich könnte eine Verringerung des Sauerstoffangebots in Holzhackschnitzelschüttungen zu geringeren Verlustaten bei der Lagerung führen. Für die praxisnahe Realisierung der anaeroben Lagerung könnten sich ausgediente Fahrsilos anbieten. Die Holzhackschnitzeln könnten dabei mit einer luftundurchlässigen Silofolie abgedeckt und analog zu typischem Biogassubstrat „siliert“ werden. Besonders bei der verlustfreien Lagerung frischer Brennstoffe, bei denen kein Trocknungseffekt erwünscht ist, z. B. im Fall von Brennstoffen für große Biomasseheiz(kraft)werke, könnte die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln eine interessante wirtschaftliche Alternative für die Zwischenlagerung darstellen.

Neben der Verringerung des Sauerstoffangebots könnte der pH-Wert in Holzhackschnitzelmieten durch Additivzugabe verändert werden [39]. Für die meisten Pilzarten ist ein neutrales bis leicht saures Milieu (pH-Wert ca. 5,5) optimal. Die Beimischung von Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) als Additiv könnte den pH-Wert der Schüttung über den optimalen Wert für das Pilzwachstum anheben und somit die Abbauraten in frischen Holzhackschnitzellagern verringern. Die Additivierung von Kalk hätte zudem den Einfluss, dass signifikante Mengen an Kalzium (Ca) dem Brennstoff zugefügt würden. Dies könnte sich wiederum positiv auf das Ascheschmelzverhalten und somit auf die Bildung von Schlacke bei der Verbrennung auswirken. Inwieweit dadurch ebenfalls eine Verbesserung des Emissionsverhaltens bei der Verbrennung möglich ist, wurde bisher allerdings noch nicht untersucht.

### 7.1 Problem- und Zielstellung

Ziel der im Folgenden dargestellten Versuche war es, die Auswirkungen alternativer Konservierungsmethoden auf die Lagerstabilität und die Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln zu untersuchen. Im Fokus standen die anaerobe Lagerung, d. h. die Lagerung von Brennstoffen unter Sauerstoffmangel, sowie die Beimischung von Kalk als Additiv. Letzteres erfolgte, um den pH-Wert der Schüttungen anzuheben. Hierzu wurden zwei Versuchsreihen (A und B) in den Jahren 2017 und 2018 durchgeführt. Die Studien sind jeweils separat in den Unterkapiteln 7.3 und 7.4 beschrieben.

## 7.2 Theoretische Überlegungen zu neuartigen Konservierungsmethoden bei der Holzhackschnitzellagerung

Qualitätsveränderung und Trockenmasseverlust während der Lagerung frischer Waldrestholzhackschnitzel könnten sich durch neuartige Konservierungsmethoden (anaerobe Lagerung/Kalkbeimischung) vermeiden lassen. Die zugrunde liegenden Überlegungen sind im Folgenden dargestellt.

### 7.2.1 Anaerobe Lagerung

Die Freilandlagerung von Holzhackschnitzeln erfolgt i. d. R. in größeren Lagermieten und damit unter größtenteils aeroben Lagerbedingungen. Die meisten Bakterien und Pilze, die für den Biomasse-, d. h. für den Zellulose- und Ligninabbau bei der Holzlagerung verantwortlich sind, benötigen Sauerstoff [20] [39]. Der in den Luftporen der Lagermiete frei verfügbare Sauerstoff wird von den im Haufwerk lebenden Mikroorganismen „veratmet“, d. h., er wird bei dem ablaufenden Stoffwechselprozess der Mikroorganismen umgesetzt. Selbst im Inneren der Schüttungen kommt es dabei trotz der Respirationsprozesse nur selten zu komplett sauerstofffreien Zonen, da durch Luftbewegung und Diffusion im Haufwerk neuer Sauerstoff in die Mieten eingetragen wird.

In der Vergangenheit wurden bereits erste Forschungsvorhaben zu der anaeroben Lagerung von Holzhackschnitzeln durchgeführt. So haben beispielsweise KOFMAN *et al.* [71] die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln im Haufwerk oder MANZONE [87] [88] eine verpresste Lagerung von Holzhackschnitzeln in sogenannten Rundballen aus der Silagebereitstellung untersucht. Bei beiden Versuchsreihen konnten die Trockenmasseverluste deutlich unter die üblichen Verlustraten der aeroben Lagerung desselben Materials in Haufwerken gesenkt werden. So erreichten beispielsweise KOFMAN *et al.* einen Trockenmasseverlust von 3,1 m-% bei einer Lagerdauer von fünf Monaten. Vergleichswerte gehen für das verwendete Material von 4 bis 6 m-% je Monat aus [71]. MANZONE stellte bei Versuchen mit Robinien- und Pappelhackschnitzeln Verlustraten von nur 1,0 bis 2,0 m-% bei der zweijährigen anaeroben Lagerung der Brennstoffe in gepressten Ballen fest [88]. Diese lagen somit deutlich unter den typischen Zersetzungsraten frischer KUP-Hackschnitzel in Freilandmieten [83]. Die Lagerung in gepressten Ballen könnte zudem in Bezug auf das reduzierte Lagervolumen vorteilhaft sein. Allerdings ist sie aufgrund der dabei entstehenden Kosten für das Pressen und für das Einwickeln in Folie mit ca. 60 € t<sup>-1</sup> aus wirtschaftlicher Sicht unattraktiv. Darüber hinaus existieren Studien zur anaeroben Lagerung von Stammholz zur Vermeidung von Verlusten und Pilzbefall [91], die zu ähnlich positiven Ergebnissen kommen.

Trotz erster vielversprechender Ergebnisse ist die anaerobe Lagerung von Holzbrennstoffen in der Praxis aktuell nicht verbreitet. Sie könnte vor allem bei frischen Waldrestholzhackschnitzeln und Holzhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb (KUP) eine interessante Lösung darstellen, da diese beiden Sortimente im frischen Zustand einen hohen Wassergehalt, einen hohen Anteil an Blatt- und Nadelfragmenten und somit ein hohes Risiko von Trockenmasseverlusten aufweisen. Da beide Brennstoffe aufgrund ihrer Brennstoffqualität idealerweise in größeren Heiz(kraft)werken zum Einsatz kommen sollten, bei

denen der Wassergehalt häufig nicht sonderlich relevant ist, kommt der Trocknung der Brennstoffe während der Lagerung dagegen wenig Bedeutung zu. Durch eine anaerobe Lagerung könnte folglich der Zustand der Brennstoffe konserviert werden und so die bereitgestellte Energie erhalten bleiben [39].

Im Gegensatz zu Holzbrennstoffen ist die anaerobe Lagerung von Biomasse in der Landwirtschaft (z. B. als Futtermittel oder Biogassubstrat) gängige Praxis. So wird bei der sogenannten Silageerzeugung das gehäckselte pflanzliche Material mit einem definierten Wassergehalt gasdicht verschlossen (i. d. R. mit Kunststofffolien) und gelagert. Nach anfänglichen Respirationprozessen ist im Idealfall über den gesamten Lagerzeitraum kein Sauerstoff mehr für Mikroorganismen und Pilze verfügbar. Bei dieser Konservierungsform ist bei Häckselgut neben dem Sauerstoffmangel der biochemische Prozess der Säureentstehung entscheidend. Durch das sogenannte Ansäuern wird der pH-Wert deutlich abgesenkt, sodass Abbauprozesse im Material größtenteils verhindert und eine höhere Lagerstabilität erreicht werden [39].

Bei der im Rahmen der folgenden Versuchsreihen betrachteten anaeroben Lagerung handelt es sich aber nicht um eine solche typische landwirtschaftliche Silierung. Die anaerobe Lagerung wurde nicht gewählt, um ein Ansäuern der Holzhackschnitzel zu erreichen, sondern um den aerob stoffwechselnden Mikroorganismen und Pilzen den Sauerstoff zu entziehen. Es wird erwartet, dass durch die anaeroben Bedingungen das Bakterien- und Pilzwachstum deutlich verringert werden kann. Somit könnte durch eine Lageratmosphäre mit einem sehr geringen O<sub>2</sub>-Gehalt bzw. in einem sauerstofffreien Milieu der Trockenmasseverlust minimiert sein.

### 7.2.2 Lagerung mit CaCO<sub>3</sub> als Additiv

Neben der anaeroben Lagerung könnte die Lagerung von Holzhackschnitzeln unter zusätzlicher Beimischung von Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) als Additiv eine interessante Alternative darstellen [39]. Holzzeretzende Mikroorganismen benötigen für ihren Stoffwechsel i. d. R. ein leicht saures Milieu. Durch die Zugabe von CaCO<sub>3</sub>, das durch Bereitstellung eines Carbonat-Ions als Puffer reagiert, d. h. den pH-Wert in Richtung des neutralen Bereichs verschiebt, soll ein Milieu erzeugt werden, in dem sich die holzzerstörenden Mikroorganismen nicht mehr optimal vermehren können. Somit kann von einem geringeren Trockenmasseverlust durch die CaCO<sub>3</sub>-Additivierung ausgegangen werden [39].

Auch die Kalkbeimischung bei Holzhackschnitzeln wurde bereits in früheren Studien untersucht. Beispielsweise haben DUMFORT *et al.* [43] durch eine Zugabe von CaCO<sub>3</sub> in den Größenordnungen von 5 m-% und 10 m-% zu frischen Waldrestholzhackschnitzeln (bezogen auf die Frischmasse) eine Reduktion des monatlichen Trockenmasseverlusts von 3,1 m-% auf 1,8 m-% erreicht. Jedoch wurden diese Versuche in kleinen Glasreaktoren mit einer Holzhackschnitzelmenge von nur 500 bis 1000 g durchgeführt, weshalb eine Übertragung der Werte in die Praxis hinterfragt werden kann.

### 7.3 **Versuchsreihe A: Erste Erprobung der anaeroben Lagerung und der Additivierung von Holzhackschnitzeln mit CaCO<sub>3</sub> im Behälterversuch**

In Versuchsreihe A wurden zunächst die zwei alternativen Methoden zur Konservierung von Holzhackschnitzeln am Betriebshof des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in einem ersten Tastversuch getestet. Untersucht wurden dabei:

- (I) die anaerobe Lagerung unter Luftabschluss und
- (II) die Lagerung der Brennstoffe unter Beimengung von Calciumcarbonat.

Die Versuche der Versuchsreihe A fanden im Jahr 2017 statt. Aufbauend auf den Ergebnissen wurde im Jahr 2018 eine zweite Versuchsreihe mit umfassenderen Versuchen zur anaeroben Lagerung durchgeführt (Versuchsreihe B, siehe Unterkapitel 7.4).

Versuchsreihe A wurde mit offenen und gasdichten Lagerbehältern durchgeführt. Wie bereits im Vorgängerprojekt „Qualitätserhaltende Hackschnitzellagerung“ [60] demonstriert können Lagerprozesse größerer Haufwerke in Behälterversuche kostengünstig und praktikabel simuliert werden. Hierdurch kann zudem eine Vielzahl an Lagerungsvarianten zeitgleich und unter denselben Lagerungsbedingungen durchgeführt werden.

#### 7.3.1 **Material und Methoden aus Versuchsreihe A**

##### 7.3.1.1 **Ausgangsmaterial**

Für die Konservierungsversuche wurden frische Waldrestholzhackschnitzel aus Nadelholz verwendet. Das Material bestand hauptsächlich aus Fichtenwaldrestholz (*Picea abies*) und stammte aus Wäldern der Bayerischen Staatsforsten (BaySF). Zur Herstellung wurde ein mobiler Trommelhacker (Jenz A 582R) (Abbildung 20) verwendet. Dieser war mit einem 30 × 30 mm Siebkorb und scharfen Messern ausgestattet. Zur Austragung der erzeugten Holzhackschnitzel wurde das Förderband anstelle des Wurfgebläses genutzt, um ein zusätzliches Zerfasern oder Zerkleinern des Materials zu verhindern. Beim Ausgangsmaterial handelte es sich um dasselbe Material, das auch für die Waldrestholzmielen bei der Freilandlagerung in Kapitel 6 verwendet wurde.



Abbildung 20: Hacken des Brennstoffs mit dem Trommelhacker Jenz A 582R und Förderbandausttrag

### 7.3.1.2 Konservierungsmethoden

Die Holzhackschnitzel wurden in Behältern aus Kunststoff gelagert (Abbildung 21). Diese hatten ein Innenvolumen von etwa  $0,6 \text{ m}^3$  ( $0,94 \text{ m} \times 1,14 \text{ m} \times 0,57 \text{ m}$ ). In den Behältern war an den Außenwänden eine Isolationsschicht (Polyurethan, 30 mm) angebracht, um die Temperaturschwankungen im Inneren der Behälter, die durch den Tagesgang der Temperatur der umgebenden Außenluft entstehen können, zu minimieren. Die Behälter wurden auf eine Höhe von 0,52 m befüllt (Füllvolumen:  $0,5 \text{ m}^3$ ). Die Lagerdauer betrug 22 Wochen von Mai bis Oktober im Jahr 2017. Die Behälter waren in einem vor Wind und Regen geschützten Außenlager des TFZ untergebracht.

In jedem Behälter wurden Temperatursensoren (Datalogger testo 175-H1, Testo AG) im Zentrum der Holzhackschnitzel eingebaut. Diese zeichneten alle fünf Minuten die Temperatur innerhalb der Schüttung auf. Die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit der Außenluft wurden ebenso im Fünf-Minuten-Takt aufgezeichnet (Datalogger testo 175-H1, Testo AG).

Für alle Behälter wurde die Masse vor und nach dem Befüllen mit Brennstoff mit einer Kranwaage (DINI ARGEO MCW1500, AS-Wägetechnik GmbH, Genauigkeit  $\pm 0,2 \text{ kg}$ ) bestimmt (Abbildung 22). Alle Behälter wurden in einem regelmäßigen Turnus von 21 Tagen mit derselben Waage gewogen.



Abbildung 21: Wind- und regengeschützte Lagerung der Behälter



Abbildung 22: Regelmäßige Wiegung der Behälter mittels einer Kranwaage

Tabelle 19 listet die angewendeten Konservierungsmethoden bzw. untersuchten Varianten auf. Für die anaerobe Lagerung wurden zwei Behälter gasdicht verschlossen (siehe weiter unten). Die Behälter der aeroben Lagerung wurden offen gelagert. Hinzu kommt, dass alle aerob gelagerten Behälter mit einem perforierten Behälterboden ausgestattet waren, um Luftzirkulation zu erlauben.

*Tabelle 19: Auflistung der durchgeführten Konservierungsvarianten in Versuchsreihe A (FM = Frischmasse)*

Art der Konservierung	Variante der Konservierung
CaCO <sub>3</sub> -Additivierung (aerob gelagert)	0,5 m-% CaCO <sub>3</sub> -Zugabe (bezogen auf FM)
	1,0 m-% CaCO <sub>3</sub> -Zugabe (bezogen auf FM)
	2,5 m-% CaCO <sub>3</sub> -Zugabe (bezogen auf FM)
Anaerobe Lagerung	Gasdicht verschlossen
	N <sub>2</sub> -gespült und gasdicht verschlossen
Referenz (aerob gelagert)	Aerob ohne Behandlung gelagert

Bei der Lagerung mit **CaCO<sub>3</sub>-Additivierung** wurden die Brennstoffe mit drei verschiedenen Mengen CaCO<sub>3</sub> („Kohlensaurer Kalk 95“, 95 m-% CaCO<sub>3</sub>, Walhalla Kalk GmbH & Co KG) gemischt (vgl. Tabelle 19). Somit entstanden die drei Mischungsverhältnisse 0,5 m-%, 1,0 m-% und 2,5 m-% CaCO<sub>3</sub> (bezogen auf die Frischmasse der Holzhackschnitzel). Die Brennstoffe und das CaCO<sub>3</sub> wurden manuell mit einer Schaufel zusammengeführt. Die zuvor rechnerisch ermittelte Menge CaCO<sub>3</sub> wurde schrittweise zugegeben, um eine möglichst homogene Mischung zu garantieren (Abbildung 23). Der Grad der Homogenität der Mischung wurde mittels pH-Messungen ( $n = 9$ ) und durch Aschegehaltsbestimmungen ( $n = 3$ ) überprüft (siehe Abschnitt 7.3.2).

Um die **anaerobe Lagerung** von Holzhackschnitzeln zu analysieren, wurden zwei Varianten in Versuchsreihe A untersucht: Die einfache Lagerung in einem Behälter, der ausschließlich unter Luftabschluss gelagert wurde (1), sowie die Lagerung in einem ebenfalls gasdicht verschlossenen Behälter, der nach dem Einlagern einer zusätzlichen Stickstoffspülung unterzogen wurde (2). Letzteres wurde gewählt, um so den verbleibenden Sauerstoff innerhalb der Schüttung komplett zu verdrängen (Tabelle 19, Abbildung 24). Beide Behälter wurden mit einer Polycarbonat-Platte verschlossen, mit Silikon versiegelt und mit einem Gärspund ausgestattet. Auf diese Weise konnten entstehende Gase entweichen, und ein Überdruck im Behälter wurde vermieden. Das zusätzliche Leervolumen, das sich durch den Abstand der Polycarbonatplatte von den Holzhackschnitzeln ergab (Abstand: ca. 5 cm), betrug ca. 50 Liter.



Abbildung 23: Manuelle Beimischung von  $\text{CaCO}_3$  zu den Holzhackschnitzeln



Abbildung 24: Stickstoffspülung eines der anaerob gelagerten Behälter vor dem Einlagern (Einleiten des  $\text{N}_2$  unten links, Messung der  $\text{O}_2$ -Konzentration am oberliegenden Gärspund)

Für das Spülen des Behälters wurde  $N_2$  über ein Ventil an der Behälterunterseite und durch einen perforierten doppelten Boden in den Behälter eingeleitet (Abbildung 24). Um eine ausreichende Spülung zu gewährleisten, wurde die  $O_2$ -Konzentration im ausströmenden Gas am Gärspund gemessen. Die Messung erfolgte mit einem Fourier-Transformation-Infrarot-Spektrometer (FTIR, Ansyco GmbH). Das Spülen wurde als ausreichend eingestuft, sobald der Sauerstoffgehalt der am Gärspund ausströmenden Gas Mischung für mehrere Sekunden auf einem sehr geringen Niveau verblieb ( $c_{(O_2)} = 0,05 \text{ Vol.-%}$ ).

### 7.3.1.3 Brennstoffparameter

Für jeden Behälter erfolgte vor und nach der Lagerung eine Analyse der Brennstoffqualität (Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert, Schüttdichte). Die Analysen wurden anhand standardisierter Messmethoden für biogene Festbrennstoffe durchgeführt (vgl. Kapitel 4 und Tabelle 12 in Kapitel 6).

Je Behälter erfolgte zum Zeitpunkt der Einlagerung und Auslagerung die Messung des Wassergehalts nach DIN EN ISO 18134-2 [32] ( $n = 5$ ), des Aschegehalts nach DIN EN ISO 18122 [31] ( $n = 3$ ), des Heizwerts nach DIN EN ISO 18125 [35] ( $n = 3$ ) und der Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 [30] ( $n = 3$ ). Chemische Inhaltsstoffe des Ausgangsmaterials für die Analyse des Heizwerts wurden bereits in Kapitel 6 analysiert, weshalb hier auf diese Werte zurückgegriffen werden konnte. Trockenmasseverluste während der Lagerung ergeben sich aus der Masse der Brennstoffe und dem Wassergehalt vor und nach der Lagerung. Der Energieinhalt der gelagerten Teilchargen wurde rechnerisch aus den Daten zum Wassergehalt, Heizwert und Trockenmasse vor und nach der Lagerung bestimmt.

### 7.3.1.4 pH-Wert

Der pH-Wert der Holzhackschnitzeloberfläche ( $n = 9$ ) wurde auf Basis der DIN EN 15933 („Schlamm, behandelter Bioabfall und Schlamm – Bestimmung des pH-Wertes“) gemessen, da zum Zeitpunkt der Studie keine Norm für die pH-Messung biogener Festbrennstoffe verfügbar war. In Anlehnung an die DIN EN 15933 [37] wurden je Variante 150 ml Holzhackschnitzel im frischen Zustand (vor und nach der Lagerung) mit 750 ml demineralisiertem Wasser vermischt und für jeweils eine Stunde mechanisch mit einem Rührfisch homogenisiert. Nach dem Rühren wurde die Probe gasdicht verschlossen und für eine Stunde ruhig gelagert. Abschließend wurde der pH-Wert für jedes Sortiment mit einer pH-Elektrode (SenTix 41) gemessen (Abbildung 25).



Abbildung 25: Bestimmung des pH-Werts nach DIN EN 15933 [37]

### 7.3.1.5 Gasmessung bei der Auslagerung der anaerob gelagerten Sortimente

Zum Zeitpunkt der Auslagerung wurde in den beiden anaerob gelagerten Behältern mit einem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR DX4000N, Ansyco GmbH) die Gaszusammensetzung der sich in den Behältern befindenden Luft bestimmt. Das zu messende Gas wurde mit einem Volumenstrom von  $8 \text{ l h}^{-1}$  über die Messtrecke abgesaugt und über eine Gastrocknung (Silica Perlen) geleitet. Um ein Einströmen von Umgebungsluft in den Gärspond zu vermeiden, wurde über ein Ventil an der Unterseite der Behälter mit demselben Volumenstrom ( $8 \text{ l h}^{-1}$ ) Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) eingeleitet. Bei der Auswertung wurden die maximal gemessenen Konzentrationen angegeben.

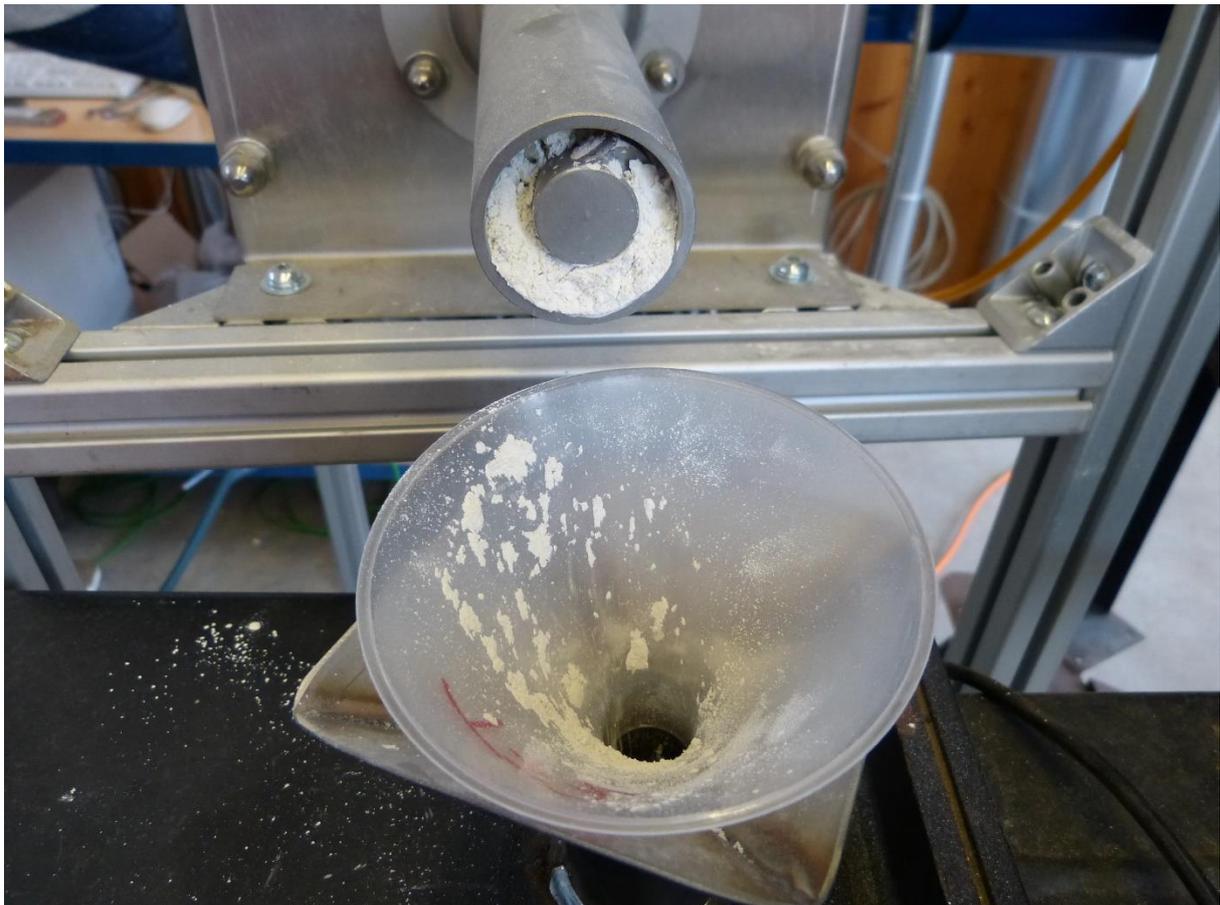
### 7.3.1.6 Emissionsmessungen bei der Verbrennung ausgewählter Sortimente

Mit ausgewählten Brennstoffen wurden in Versuchsreihe A Verbrennungsversuche an einem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel (Guntamatic Powerchip 20/30) durchgeführt. Der Kessel, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung am Feuerungsprüfstand des TFZ sind detailliert in Kapitel 12 beschrieben.

Die im Feuerungsversuch untersuchten Brennstoffe waren das Referenzmaterial und das Material aus dem Lagerbehälter mit 1,0 m-%  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe (bezogen auf Frischmasse). Zusätzlich wurde noch eine weitere Additivierungsvariante untersucht, indem 2,05 m-%  $\text{CaCO}_3$  (bezogen auf die Trockenmasse) zu einer zu Beginn von Versuchsreihe A technisch vorgetrockneten und ebenfalls fünf Monate gelagerten Probe des gleichen Ausgangsmaterials (vgl. Kapitel 12) zugegeben wurden. Die Zugabe erfolgte über eine Dosierschnecke (Abbildung 26), die das Additiv direkt in den Schneckenförderer

des Brennstoffzufuhrsystems zudosierte. Die Zugabe von 2,05 m-%  $\text{CaCO}_3$  wurde gewählt, weil 1,0 m-% Zugabe bei einem Wassergehalt von 49,3 m-% (zum Zeitpunkt der Einlagerung) in etwa 2,05 m-%, bezogen auf die Trockenmasse, entsprechen.

Die Zugabe des  $\text{CaCO}_3$  im Schneckenförderer wurde gewählt, um (a) zu testen, inwieweit die Lagerung mit  $\text{CaCO}_3$  das Emissionsverhalten im Vergleich zur ausschließlichen Mitverbrennung von Holzhackschnitzeln mit  $\text{CaCO}_3$  beeinflusst und (b) ob durch eine Additivierung der Holzhackschnitzel mit  $\text{CaCO}_3$  an sich eine Verbesserung des Emissionsverhaltens erreicht werden kann, ähnlich wie das bei der Zugabe von Kaolinit beobachtet worden war (vgl. EraNet-Projekt „BioFlex“, FKZ: 22404415 [86]).



*Abbildung 26: Zudosieren des  $\text{CaCO}_3$  über eine Dosierschnecke direkt in die Brennstoffzufuhr des Kessels*

Vor den Verbrennungsversuchen wurden alle Brennstoffe technisch auf einen Wassergehalt von 15 m-% mittels mobiler Satz Trocknungsboxen am TFZ getrocknet (vgl. Kapitel 9 [60]). So konnte eine Verfälschung der Ergebnisse durch den Einfluss unterschiedlicher Wassergehalte bei der Verbrennung vermieden werden.

### 7.3.2 Ergebnisse und Diskussion aus Versuchsreihe A

#### 7.3.2.1 Brennstoffqualität zu Beginn der Lagerung

Die verwendeten Holzhackschnitzel wiesen typische Werte für die Brennstoffqualität von Waldrestholzhackschnitzeln (Nadelholz) bezüglich des Wassergehalts, Aschegehalts, Heizwerts und der Schüttdichte auf (Tabelle 20) [61] [78].

*Tabelle 20: Brennstoffqualität bei Einlagerung in Versuchsreihe A (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)*

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung
Wassergehalt (m-%, $n = 5$ )	49,3	0,6
Aschegehalt (m-%, wf, $n = 3$ )	0,9	0,1
Heizwert (MJ kg <sup>-1</sup> , wf, $n = 3$ )	18,5	0,1
Schüttdichte (kg m <sup>-3</sup> , ar, $n = 3$ )	350,5	1,6

Der Wassergehalt lag bei ca. 50 m-% (Tabelle 20) und damit im typischen Bereich für frisch geerntete Waldhackschnitzel. Gleichzeitig war der Wassergehalt ausreichend hoch für die vorgesehenen Lagerungsversuche, da während der Lagerung der unbehandelten Holzhackschnitzel mikrobielle Aktivität nicht verhindert werden sollte.

Der Aschegehalt des Referenzmaterials war mit 0,9 m-% etwas niedriger als üblich bei Waldrestholz aus Nadelholz (2 bis 3 m-% bei nicht verschmutztem Material). Dies deutet auf einen erhöhten Stammholzanteil im Ausgangsmaterial hin, da andere Pflanzenteile wie beispielsweise kleinere Äste, Rindenfragmente oder Nadeln einen höheren Aschegehalt als reines Holz aufweisen (Tabelle 20) [40] [78]. Durch die Zugabe des CaCO<sub>3</sub> stieg der Aschegehalt auf Werte von 2 bis > 4 m-% (bezogen auf die Trockenmasse) (Abbildung 27). Er nahm damit sogar höhere Werte ein, als sich rein rechnerisch durch Addition der unterschiedlichen Massen (Aschegehalt im unbehandelten Brennstoff, Masse des zugegebenen CaCO<sub>3</sub>) ergeben. Theoretisch könnte CaCO<sub>3</sub> bei hohen Temperaturen während der Veraschung im Muffelofen nach DIN EN ISO 18122 [31] zu Calciumoxid (CaO) und CO<sub>2</sub> zerfallen. CaO kann in Anwesenheit von Holz verschiedenste feste Verbindungen, wie z. B. CaSiO<sub>3</sub>, eingehen. Diese Verbindungen können in der Asche verbleiben. Sie weisen i. d. R. höhere Molekulargewichte als reines CaCO<sub>3</sub> auf. So hat beispielsweise etwa CaCl<sub>2</sub> ein etwa 10 g mol<sup>-1</sup> höheres Molekulargewicht als CaCO<sub>3</sub>. Der Zerfall von CaCO<sub>3</sub> erfolgt allerdings vornehmlich bei Temperaturen von 900 bis 1200 °C, weshalb dieser Effekt als Erklärung kritisch hinterfragt werden muss.

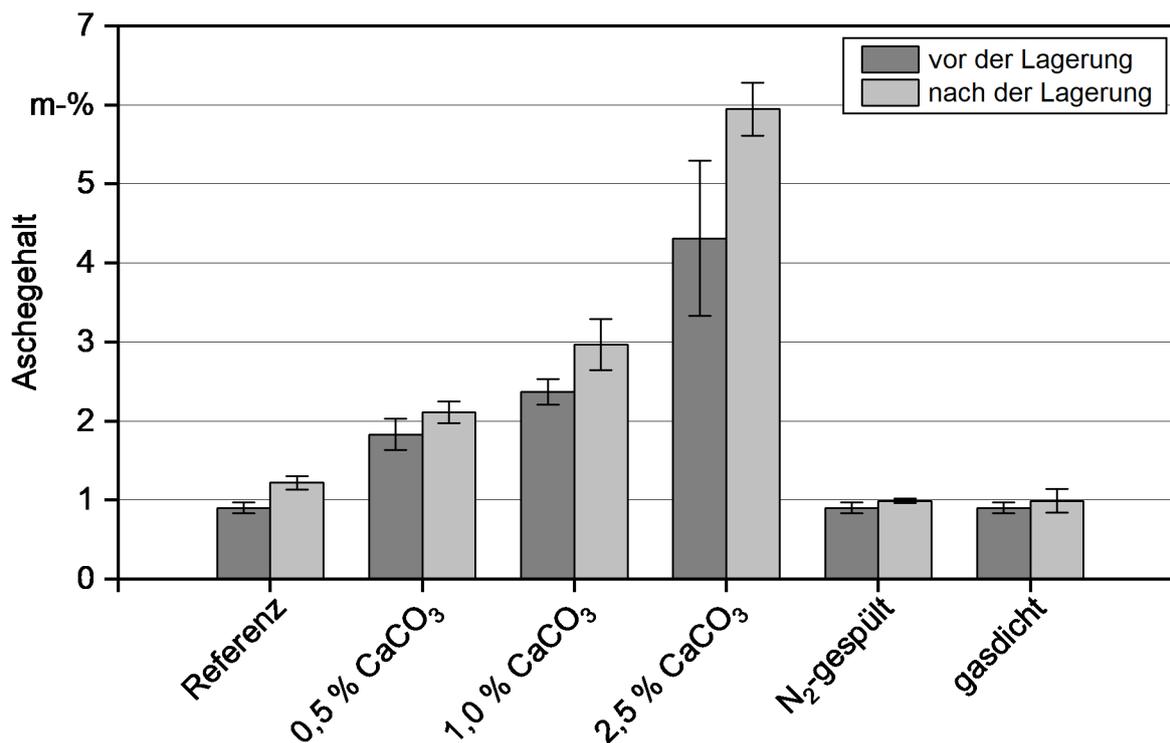


Abbildung 27: Mittlerer Aschegehalt der Sortimente vor und nach der Lagerung (in m-%, ± Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis) (n = 3, Versuchsreihe A)

Die pH-Werte zu Beginn der Lagerung lagen bei pH 5,6 und zeigten aufgrund der CaCO<sub>3</sub>-Additivierung eine Änderung hin zum neutralen Bereich (Tabelle 21). Die geringen Standardabweichungen der Mittelwerte demonstrieren, dass eine homogene Mischung erreicht wurde. Die Verschiebung des pH-Werts bestätigt die Eigenschaft von CaCO<sub>3</sub>, in diesem Versuch als Puffer zu reagieren.

Tabelle 21: Mittlere pH-Werte vor der Lagerung in Versuchsreihe A (n = 9)

Variante	Mittelwert	Standardabweichung
Referenz	5,6	0,3
0,5 m-% CaCO <sub>3</sub>	6,5	0,3
1,0 m-% CaCO <sub>3</sub>	6,7	0,1
2,5 m-% CaCO <sub>3</sub>	6,7	0,2

Abbildung 28 zeigt die Schüttdichten der jeweiligen Sortimente zu Beginn der Lagerung. Mit zunehmender CaCO<sub>3</sub>-Zugabe nahm auch die Schüttdichte zu, während das Referenzmaterial ohne Additiv den niedrigsten Wert aufwies. Interessanterweise erhöhte sich die experimentell gemessene Schüttdichte stärker als erwartet, verglichen mit der theoretischen Schüttdichte, die aus den Änderungen der Brennstoffmasse aufgrund der

CaCO<sub>3</sub>-Additivierung berechnet wurde. Es wird angenommen, dass aufgrund der mechanischen Belastung während der Zugabe von CaCO<sub>3</sub> und der Beimengung des feinen Pulvers die Oberfläche der Holzhackschnitzel glatter wurde. Durch eine glattere Oberfläche wird ein Verkanten der einzelnen Partikel gegeneinander vermindert, was vermutlich eine bessere Verdichtung des Materials ermöglicht hat [58].

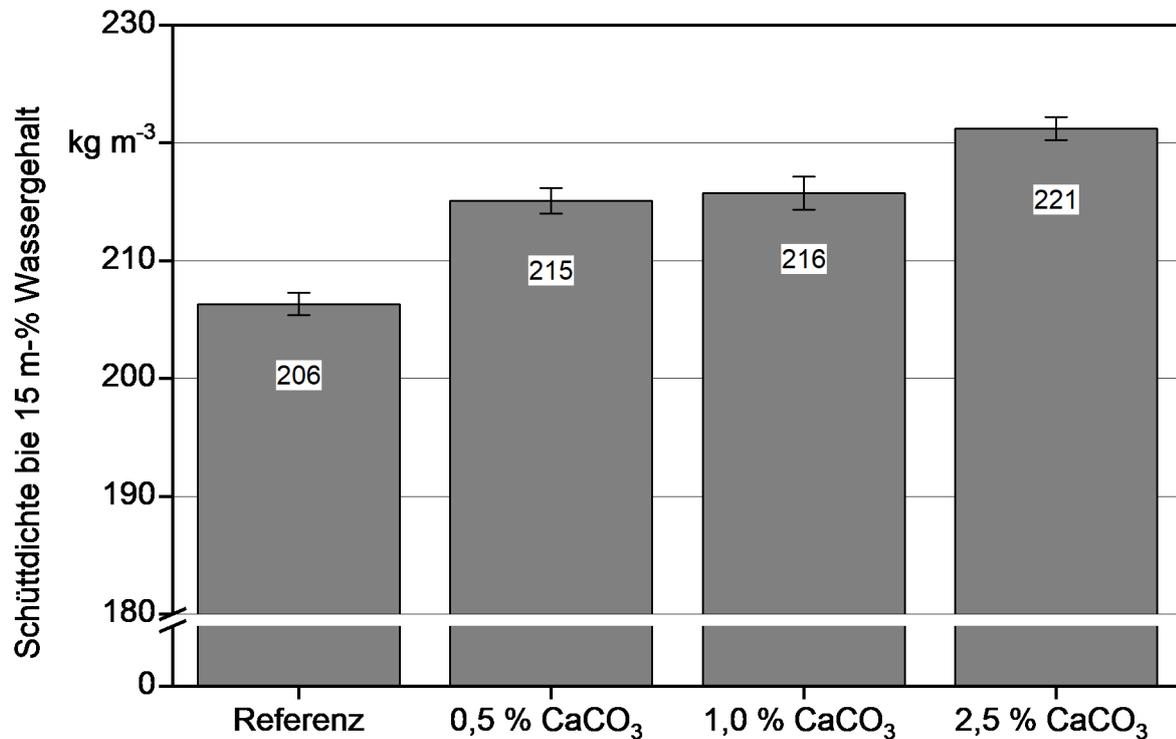


Abbildung 28: Mittlere Schüttdichte der Materialien ( $\pm$  Standardabweichung, bezogen auf 15 m-% Wassergehalt) zum Zeitpunkt der Einlagerung ( $n = 3$ , Versuchsreihe A)

Bei dem Ausgangsmaterial der Konservierungsversuche wurde zudem vor Lagerbeginn eine Siebanalyse nach DIN EN ISO 17827-1 [29] durchgeführt. Anhand dieser Analyse ließ sich das Material nach den Maßstäben der DIN ISO EN 17225-4 (Tabelle 3) in die Klasse P31S einordnen. Bei einer weiteren Einordnung des Brennstoffs nach der Norm (siehe Abschnitt 4.1.6) ist das Rohmaterial aufgrund des hohen Wassergehalts in Kategorie B1 anzusiedeln. Unter Berücksichtigung der restlichen Parameter (ohne Wassergehalt) bzw. bei einer technischen Trocknung der Brennstoffe auf einen Wert  $\leq 25$  m-% könnte der Brennstoff der Klasse A1 zugeordnet werden.

### 7.3.2.2 Temperaturverläufe während der Lagerung

Die Temperaturprofile über die gesamte Lagerzeit zeigten deutliche Unterschiede zwischen den aerob und anaerob gelagerten Brennstoffen (Abbildung 29, Abbildung 30). Bei den anaerob gelagerten Holzhackschnitzeln stieg die Temperatur in den ersten Ta-

gen um etwa 5 °C über die Umgebungstemperatur an. Nach der ersten Woche der Lagerung lagen die Temperaturen in den beiden Behältern jedoch auf dem Niveau der Umgebungstemperatur und folgten deren täglichen Schwankungen zeitverzögert (Abbildung 29). Die beiden Kurvenverläufe der gasdichten Lagervarianten (d. h. mit bzw. ohne N<sub>2</sub>-Spülung) verliefen dagegen deckungsgleich.

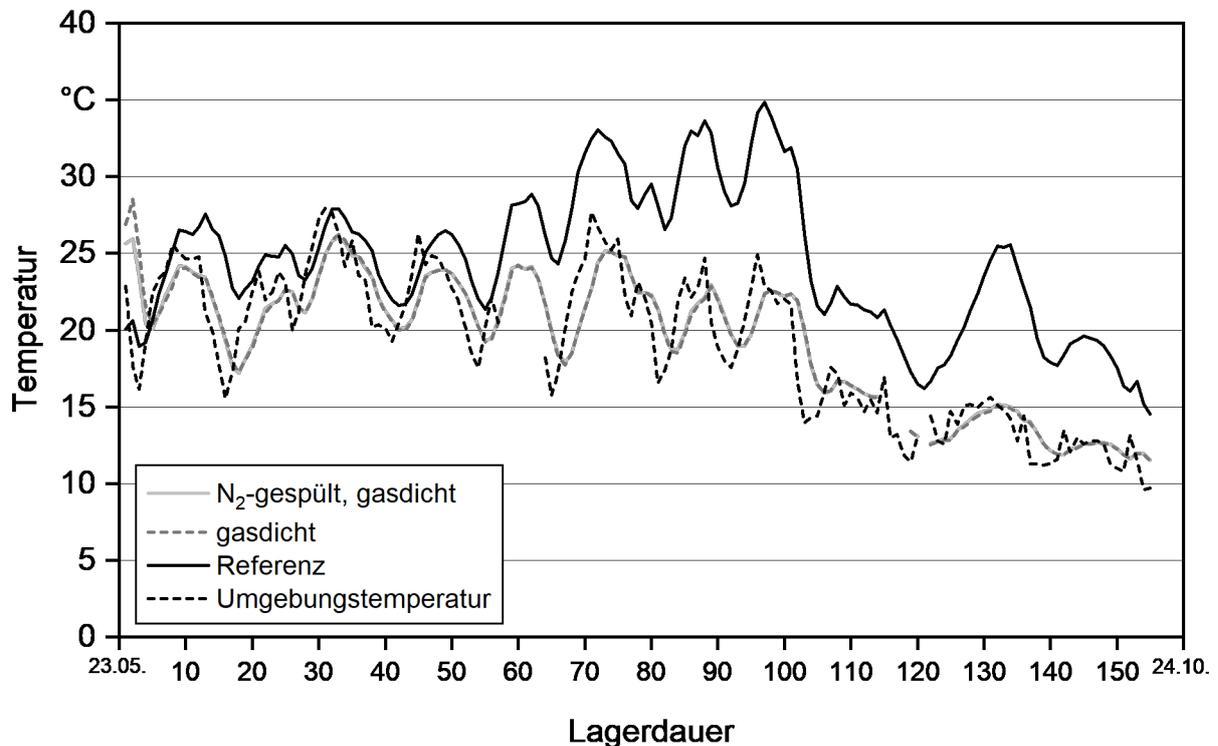


Abbildung 29: Temperaturverläufe der anaerob gelagerten Sortimente und der Referenz in Versuchsreihe A

Im Gegensatz dazu lagen die Temperaturen in den Behältern, die mit CaCO<sub>3</sub> additiviert worden waren, und das Referenzmaterial während der gesamten Lagerzeit im Durchschnitt 5 °C über den Umgebungstemperaturen (Abbildung 30).

Ein Temperaturanstieg gilt als Indikator für die mikrobielle Aktivität [67] [116]. So kann bei erhöhten Temperaturen von einem erhöhten Trockenmasseabbau ausgegangen werden, was auf höhere Verluste in den aerob gelagerten Materialien im Vergleich zu den anaeroben Lagervarianten hindeutet [60]. Ein Vergleich mit den Ergebnissen zu den Trockenmasseverlusten während des Versuchs bestätigt dies (siehe weiter unten).

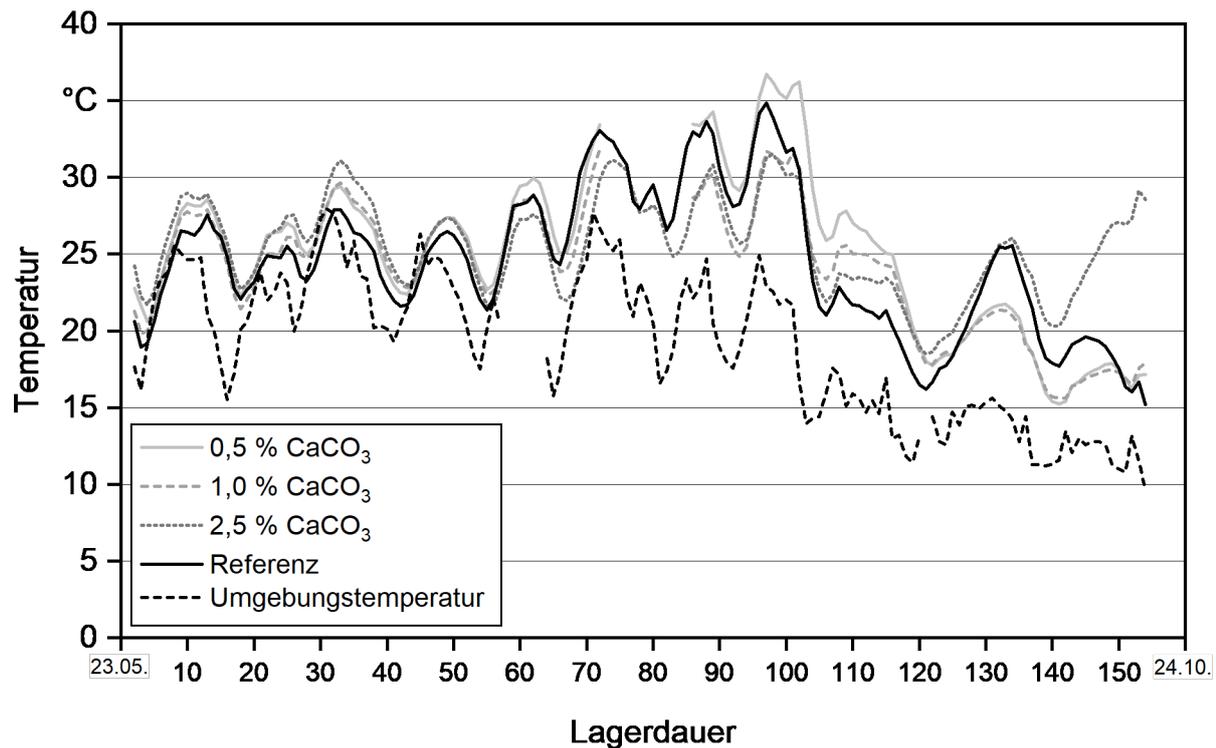


Abbildung 30: Temperaturverläufe der aerob gelagerten Sortimente in Versuchsreihe A

### 7.3.2.3 Masseveränderung über die Lagerdauer

Während der Lagerung blieb die Gesamtmasse der anaerob gelagerten Behälter konstant, was darauf hinweist, dass sich das Material nicht veränderte und weder im Wassergehalt noch in der Trockenmasse abnahm (Abbildung 31). Im Gegensatz dazu nahm die Masse der aerob gelagerten Behälter deutlich ab. Mit zunehmender CaCO<sub>3</sub>-Zugabe verringerte sich aber diese Masseabnahme.

Änderungen der Gesamtmasse werden sowohl auf Wassergehalt- als auch auf Trockensubstanzverluste zurückgeführt. Diese Einschätzung deckt sich mit den Erkenntnissen der Betrachtung der Trockenmasseverluste und mit den Änderungen im Wassergehalt (siehe weiter unten). Bei der reinen Betrachtung der Behältermasse ist eine genaue Zuordnung der Verluste dagegen nicht möglich. Hierfür werden im Folgenden der Parameter Wassergehalt und der damit errechnete Trockenmasseverlust diskutiert.

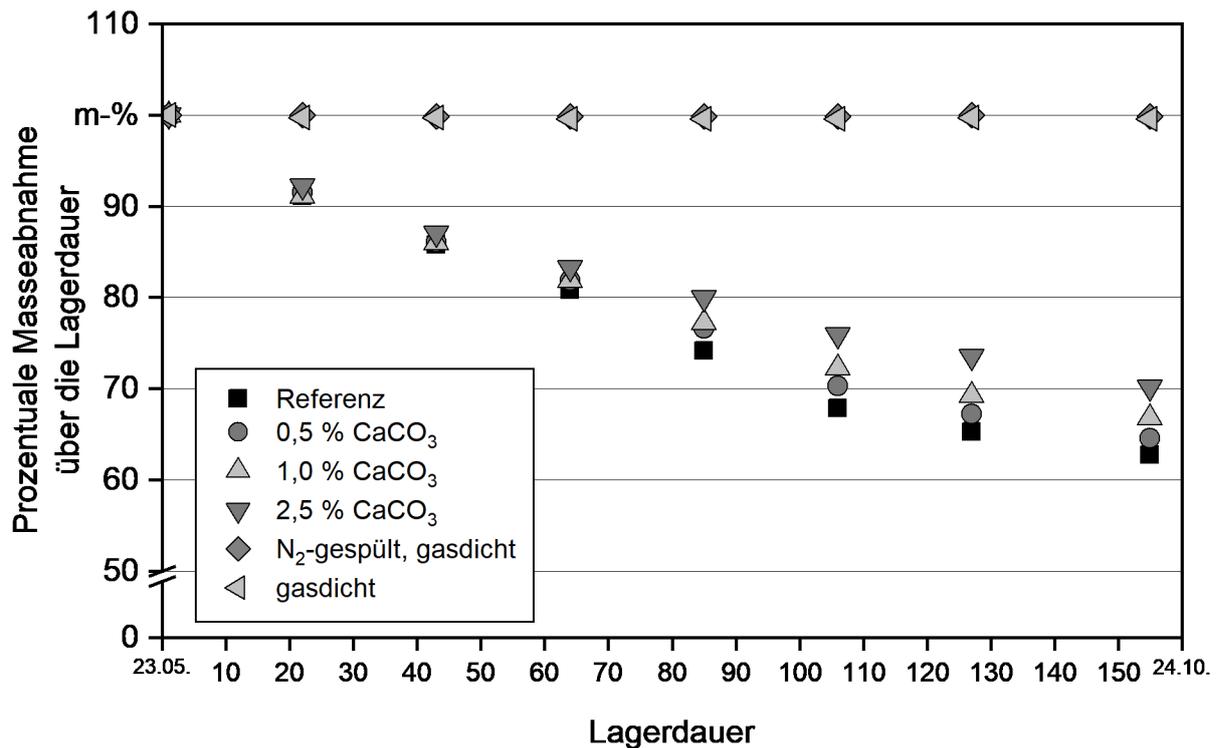


Abbildung 31: Prozentuale Massesabnahme über die Lagerdauer in Versuchsreihe A

### 7.3.2.4 Brennstoffqualität nach der Lagerung

Nach der fünfmonatigen Lagerung waren die pH-Werte (Tabelle 22) im Referenzbehälter und den anaerob gelagerten Behältern signifikant niedriger als vor der Lagerung (t-Test:  $p \leq 0,05$ ). Dieser Effekt konnte für die mit CaCO<sub>3</sub> additvierten Brennstoffe nicht beobachtet werden.

Tabelle 22: Mittlere pH-Werte der gelagerten Sortimente zum Zeitpunkt der Auslagerung in Versuchsreihe A (n = 9)

Variante	Mittelwert	Standardabweichung
Referenz*	4,9	0,2
0,5 % CaCO <sub>3</sub>	6,3	0,1
1,0 % CaCO <sub>3</sub>	6,6	0,0
2,5 % CaCO <sub>3</sub>	7,1	0,1
gasdicht und N <sub>2</sub> -gespült	4,8	0,0
gasdicht	4,9	0,0

\* pH-Wert bei der Einlagerung: pH 5,6

Die bei dem Abbau von Biomasse entstehenden organischen Säuren können als Erklärung für die geringeren pH-Werte der anaerob gelagerten Materialien und der Referenz herangezogen werden. Die hier entstehenden Säuren wurden nicht – wie bei den additiven Chargen – gepuffert, sondern senkten den pH-Wert weiter ab. Dies zeigt, dass das zugegebene  $\text{CaCO}_3$  auch über die Lagerdauer von fünf Monaten als Puffer agiert.

Der Wassergehalt der anaerob gelagerten Holzhackschnitzel war nach der Lagerdauer unverändert (Abbildung 32). Im Gegensatz dazu zeigten die Wassergehalte des Referenzbehälters und der Holzhackschnitzel mit Additivierung starke und durchgehend signifikante Trocknungswirkungen von bis zu  $-19,3 \text{ m-\%}$  verglichen mit dem jeweiligen Wassergehalt vor der Lagerung (t-Test:  $p \leq 0,05$ ). Tendenziell war die Abnahme des Wassergehalts mit zunehmender Menge an additiviertem  $\text{CaCO}_3$  im Vergleich zu dem Referenzbehälter etwas geringer (nicht signifikant). Dies deutet darauf hin, dass die Trocknung durch die Additivierung gehemmt wurde. Es kann angenommen werden, dass dies auf eine reduzierte Wärmeentwicklung infolge einer gehemmten mikrobiellen Aktivität zurückzuführen ist (vgl. auch Abbildung 30).

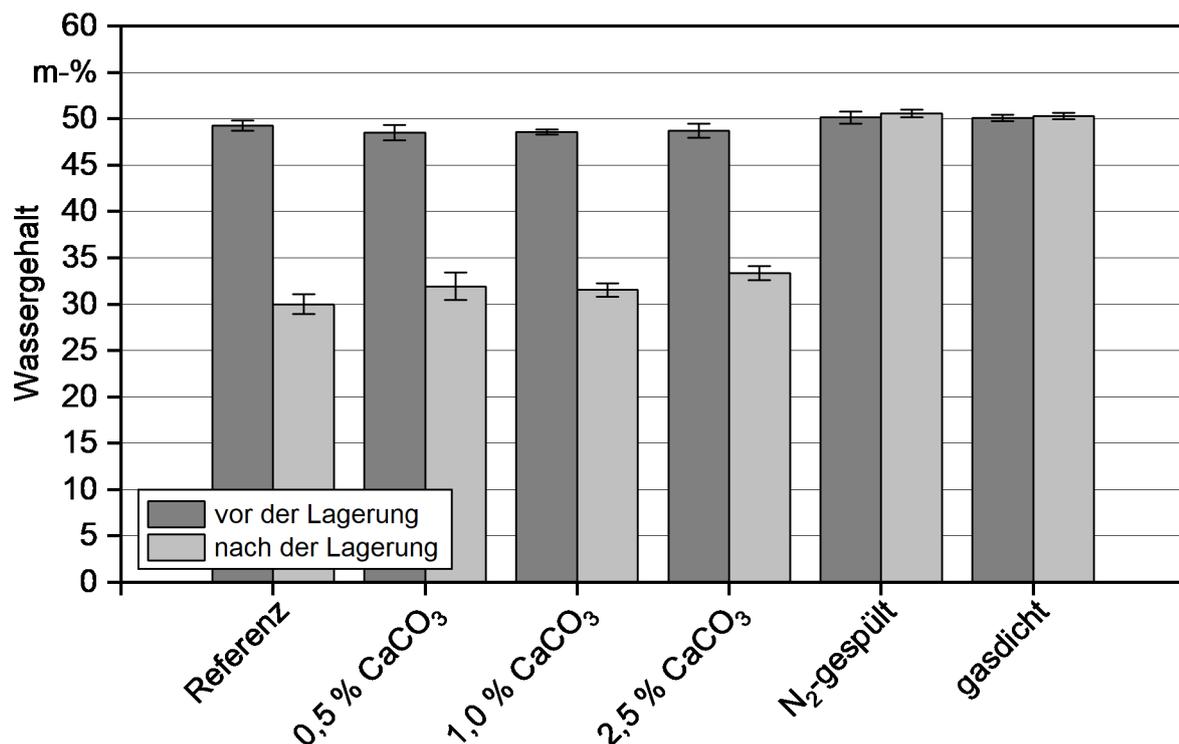


Abbildung 32: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$  Standardabweichung, in m-%) der Sortimente vor und nach der Lagerung in Versuchsreihe A ( $n = 5$ )

Bei der anaeroben Lagerung fand gar keine Trocknung statt, da sowohl der Luftaustausch als auch die mikrobielle Aktivität weitgehend unterdrückt wurden.

Nach der Lagerung nahm der Aschegehalt in jedem Brennstoff im Vergleich zu den Ausgangswerten tendenziell zu (vgl. Abbildung 27 weiter oben). Allerdings kann nur bei der

Referenzcharge eine signifikante Zunahme im Aschegehalt (t-Test:  $p \leq 0,05$ ) nachgewiesen werden. Nichtsdestotrotz könnte die bei allen aeroben Lagervarianten beobachtete tendenzielle Zunahme im Aschegehalt auch auf Änderungen in der Trockensubstanz zurückzuführen sein (siehe weiter unten), da sich bei dem Abbau von Zellulose oder Lignin anorganische Mineralien anreichern [84]. Ein erhöhter Aschegehalt kann zu mechanischen Problemen bei der Verbrennung führen, beispielsweise einer Störung der Ascheaustragung [39].

Bei einer Einordnung des Brennstoffs in die Produktklassen der DIN EN ISO 17225-4 zeigt sich, dass die meisten Holzhackschnitzelproben nach der Lagerung aufgrund der erhöhten Aschegehalte ( $> 2$  m-%) sowie der teilweise über 35 m-% liegenden Wassergehalte weiterhin nur der Kategorie B1 zugeordnet werden können. Lediglich das Referenzmaterial konnte nach der Lagerung in die Kategorie A2 eingeordnet werden, wobei der Aschegehalt auf Werte  $> 1$  m-% anstieg.

### **Trockenmasseverluste und Änderungen im Energiegehalt**

In allen untersuchten Varianten kam es zu Trockenmasseverlusten bei der fünfmonatigen Lagerung im Behälter (Abbildung 33). Zwischen den anaerob und den aeroben gelagerten Varianten zeigen sich jedoch große Unterschiede.

Bei der Referenzvariante wurden TM-Verluste von 13,4 m-% über den Lagerzeitraum von fünf Monaten gemessen (entspricht 2,68 m-% pro Monat). Die TM-Verluste der Brennstoffe, die unter anaeroben Bedingungen gelagert wurden, betragen etwa 1 m-% über die gesamte Lagerdauer und waren somit unter allen gelagerten Brennstoffen am niedrigsten. Unter den aerob gelagerten Brennstoffen wies der Behälter mit 2,5 m-%  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe die geringsten TM-Verluste auf (8,9 m-% insgesamt bzw. 1,79 m-% pro Monat). Die TM-Verluste stiegen mit abnehmender Additivierung auf bis zu 14,8 m-% und lagen damit für das Material mit 0,5 m-%  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe sogar leicht höher als die Referenzprobe (13,4 m-%). Aufgrund des Versuchsdesigns ( $n = 1$  pro Variante) können jedoch keine Angaben bezüglich der Signifikanz der beobachteten Trends gemacht werden. Vermutlich ist der beobachtete leichte Anstieg der TM-Verluste in der 0,5-m-%- $\text{CaCO}_3$ -Variante im Vergleich zur Referenz nicht auf die Additivierung, sondern eher auf die Messunsicherheit der Parameter, die für die TM-Verlustberechnung notwendig sind, zurückzuführen. Vor allem Schwankungen im Wassergehalt können einen beträchtlichen Einfluss auf den berechneten TM-Verlust haben (vgl. [61]). So ergibt ein Fehler im Wassergehalt von 1 m-% bereits eine Unsicherheit im TM-Verlust von 2 m-%. Aufgrund der hohen Standardabweichung im Wassergehalt der 0,5-m-%- $\text{CaCO}_3$ -Variante von 1,5 m-% (vgl. Abbildung 32) ist eine Interpretation der Werte somit kritisch zu hinterfragen.

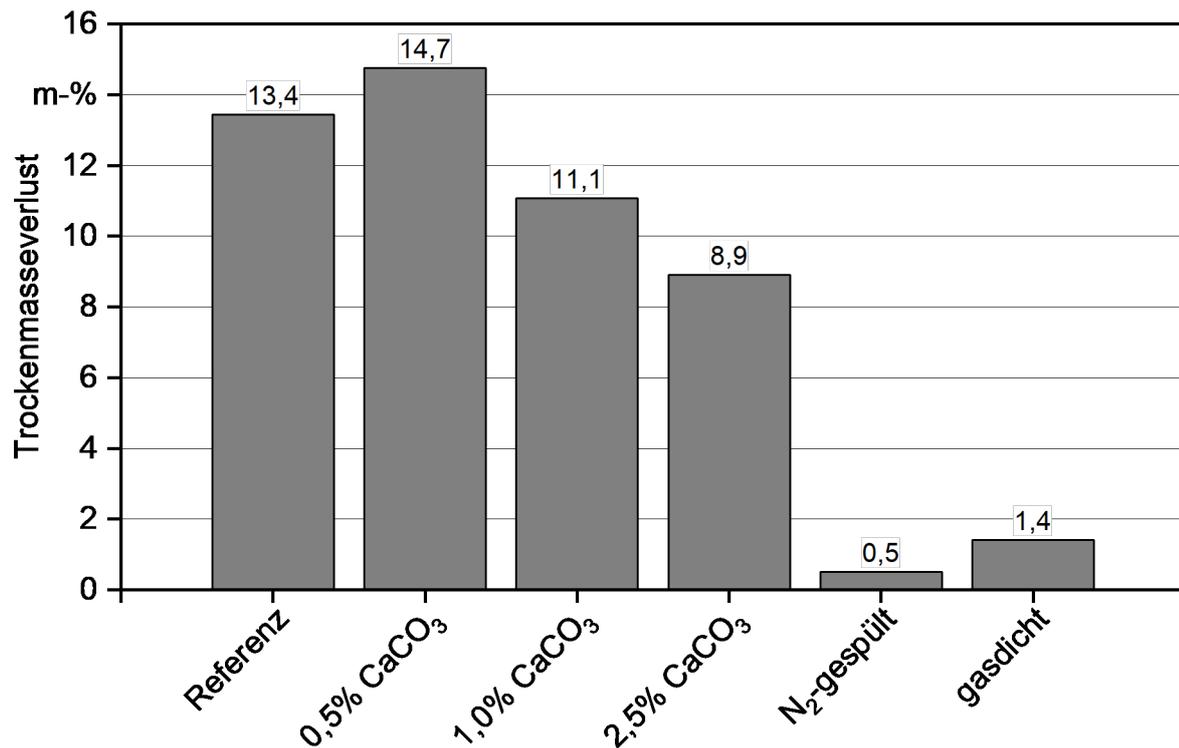


Abbildung 33: Trockenmasseverluste nach der Lagerung in Versuchsreihe A ( $n = 1$ )

Die sich tendenziell abzeichnende Verringerung des Trockenmasseverlusts über eine CaCO<sub>3</sub>-Zugabe deckt sich mit den Ergebnissen von DUMFORT *et al.* [43]. Die Autoren erreichten durch die Zugabe von 5 bzw. 10 m-% CaCO<sub>3</sub> eine Verringerung von monatlich 3,1 m-% auf 1,8 m-% Trockenmasseverlust.

Die Ergebnisse zeigen, dass für jeden Brennstoff der Gesamtenergieinhalt (in % verglichen mit dem Energieinhalt des Ausgangsmaterials) nach der Lagerung abgenommen hat (Abbildung 34). Die geringste Änderung des Energieinhalts wurde bei den anaerob gelagerten Brennstoffen mit nur etwa 1 bis 2 % Abnahme beobachtet. Diese Verluste sind als vernachlässigbar anzusehen. In ähnlicher Weise wie die Trockenmasseverluste wurden die Verluste im Gesamtenergieinhalt mit zunehmender Zugabe von CaCO<sub>3</sub> geringer.

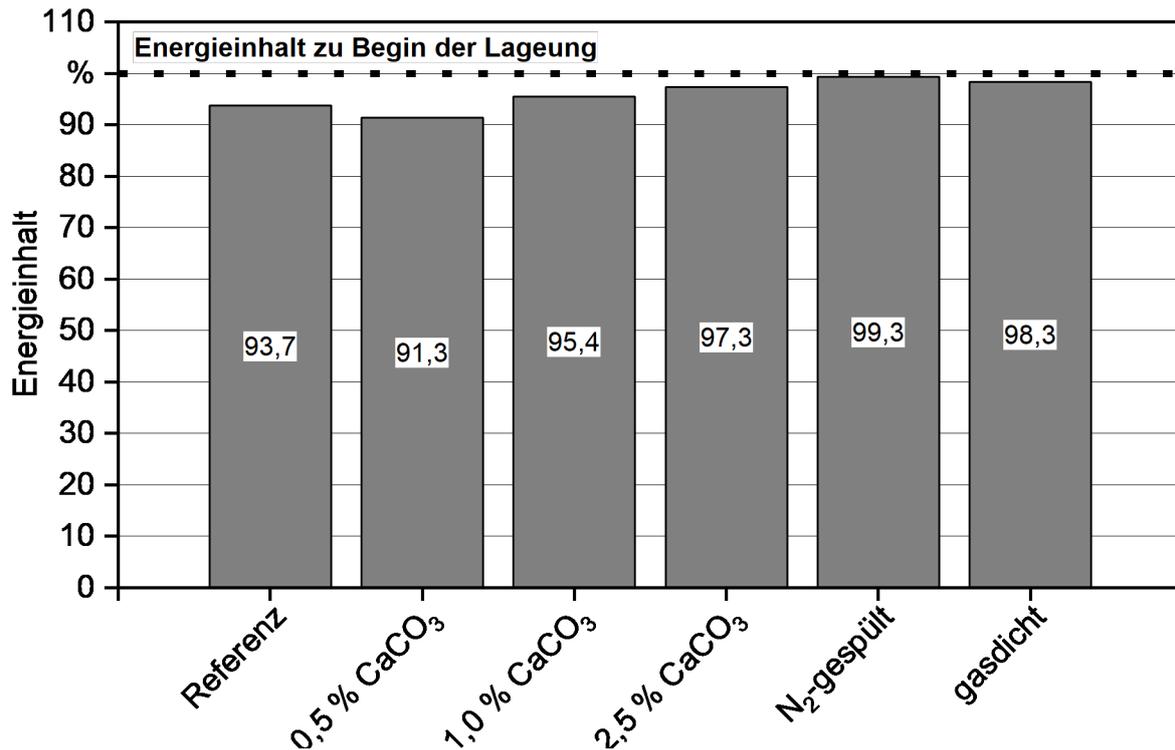


Abbildung 34: Energieinhaltsveränderung über die Lagerdauer in Bezug auf den Ausgangsenergieinhalt in Versuchsreihe A

Bei der Diskussion der Energieinhaltsabnahme sind dieselben Argumente anzubringen wie bei den Trockenmasseverlusten und den Temperatur- bzw. Massesverläufen. Durch eine Hemmung der mikrobiellen Aktivitäten ist der Biomasseabbau geringer ausgefallen, ebenso wie die Trocknung. Die Anwendung beider Konservierungsmöglichkeiten (anaerobe Lagerung, Additivierung) würde in der Praxis demnach Energieverluste vermeiden können, denn der Vorteil der unterbundenen Trockenmasseverluste wiegt dabei schwerer als der unterbliebene Trocknungseffekt. Die Lagerverfahrensgestaltung hängt jedoch stark vom weiteren Verwendungsweg des Brennstoffs ab. Bei einer Nutzung der Holzhackschnitzel in einer großen Feuerungsanlage, die auf Brennstoffe mit einem relativ hohen Wassergehalt ausgelegt ist, kann die anaerobe Lagerung eine geeignete Methode zur Vermeidung bzw. Verringerung von Trockenmasse- und Energieverlusten darstellen. Wird aber der Brennstoff in der weiteren Verwendungskette einer Heizanlage im kleineren Leistungsbereich zugeführt, so ist der hohe Wassergehalt nachteilig. Ob allerdings in diesem Fall auf eine Additivierung zurückgegriffen werden sollte, erscheint angesichts der kaum merklichen Verlustminderung und der erhöhten Aschemenge fraglich, sofern nicht andere verbrennungstechnische Vorteile gegeben sind. Außerdem war auch bei der Additivierung mit CaCO<sub>3</sub> die Trocknung gehemmt.

### 7.3.2.5 Gaszusammensetzung zum Zeitpunkt der Auslagerung

Die Gaszusammensetzung (Methan- und CO<sub>2</sub>-Konzentration) innerhalb der Behälter zum Zeitpunkt der Auslagerung sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt. Betrachtet man die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Behältern (Abbildung 35), so zeigt sich, dass die Konzentration an CO<sub>2</sub> im N<sub>2</sub>-gespülten Behälter (13,9 Vol.-%) bei Auslagerung auf einem ähnlichem Niveau lag wie bei der gasdicht verschlossenen Variante (14,5 Vol.-%). Der in der Atmosphäre vom Umweltbundesamt (UBA) gemessene Jahresmittelwert im Jahr 2016 für die CO<sub>2</sub>-Konzentration lag bei 404,4 ppm, was ca. 0,04 Vol.-% entspricht [109]. Folglich kam es in beiden Varianten zu einer deutlichen Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Vergleich zur Außenluft.

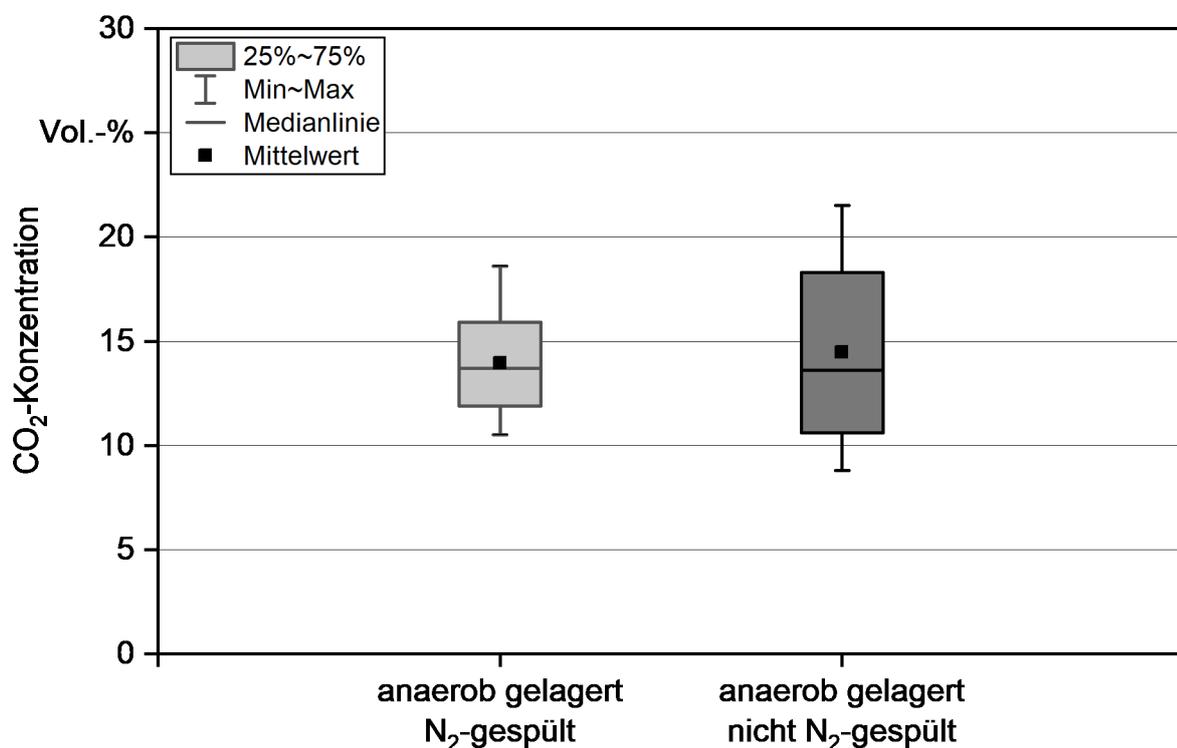


Abbildung 35: Mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration (in Vol.-%) im Behälter zum Zeitpunkt der Auslagerung ± Standardabweichung in Versuchsreihe A (n = 395)

Die sehr hohen Messwerte weisen auf biologische Abbauprozesse in den anaerob gelagerten Behältern hin. CO<sub>2</sub> entsteht vor allem durch Respiration beim Abbau von Biomasse. Hierzu ist (Rest-)Sauerstoff notwendig. Die mittlere Sauerstoffkonzentration lag bei 0,36 Vol.-% (N<sub>2</sub>-gespült) und bei 0,33 Vol.-% (nicht N<sub>2</sub>-gespült) wohingegen durchschnittliche Werte in der Atmosphäre ca. 21 Vol.-% betragen. Es kam somit zu einem deutlichen Abbau von O<sub>2</sub> in den Behältern.

Im Fall von Methan lag die mittlere Konzentration in dem mit Stickstoff gespülten Material um mehr als den Faktor vier höher als in dem nur anaerob gelagerten Behälter (Abbildung 36). Die mittlere Methankonzentration betrug im N<sub>2</sub>-gespülten Behälter

1119 ppm und im gasdicht gelagerten Behälter 212 ppm. Dies stellt im Vergleich zu den typischen Methankonzentrationen in der Atmosphäre (1,9 ppm) ebenfalls einen stark erhöhten Wert dar [109].

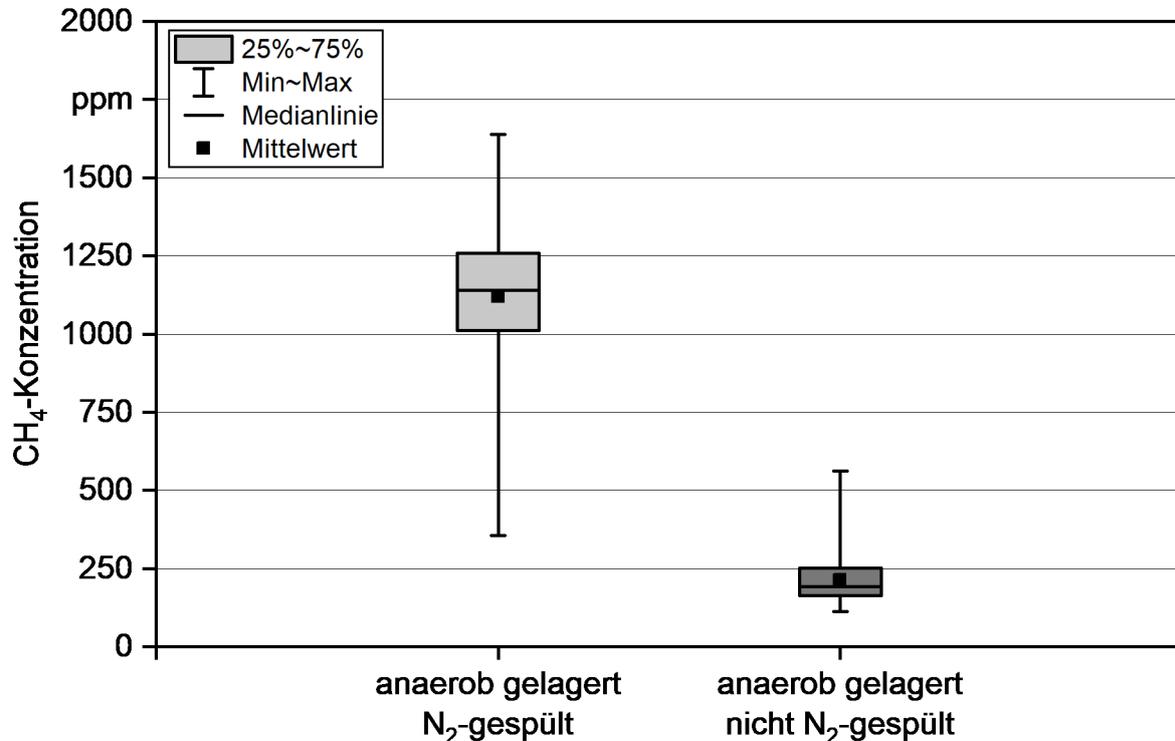


Abbildung 36: Mittlere CH<sub>4</sub>-Konzentration (in ppm) im Behälter zum Zeitpunkt der Auslagerung;  $\pm$  Standardabweichung in Versuchsreihe A ( $n = 395$ )

Bei der Messung wurde ein FTIR (Ansyco GmbH) verwendet, das für die Emissionsmessung bei Verbrennungsversuchen ausgelegt ist. Dabei hat sich gezeigt, dass die Konzentrationen an CH<sub>4</sub> in den Behältern außerhalb des Messbereichs des verwendeten Geräts lagen. Da allerdings auch die vorangegangene Literaturrecherche keine Erfahrungswerte zu typischen Methankonzentrationen bei anaerober Lagerung von Holzhackschnitzeln ergeben hatte, konnte dieses Problem zu Beginn der Versuchsreihe A nicht vorhergesehen werden. Die gemessenen Werte sind somit vorsichtig zu interpretieren und es wurde eine Folgeuntersuchung angestrebt (siehe Versuchsreihe B, Unterkapitel 7.4). Entsprechend geeignete Messgeräte wurden hierfür beschafft.

Nichtsdestotrotz könnten die gemessenen Konzentrationen für erste Rückschlüsse zur Lagerung unter Luftabschluss herangezogen werden: Aufgrund der anaeroben Bedingungen ist in den Lagerbehältern CH<sub>4</sub> voraussichtlich in einer nicht geringen Menge entstanden. Unter Berücksichtigung der hohen Klimarelevanz dieses Gases stellt dies möglicherweise ein Problem für die Lagerung von Holzhackschnitzeln dar, z. B. wenn die anaerob gelagerten Schüttungen abrupt geöffnet werden und lokal angereichertes Methan in die Atmosphäre entweichen kann.

Die deutlich höheren  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen in der  $\text{N}_2$ -gespülten Behältervariante deuten auf einen Zusammenhang zwischen der Konzentration an Restsauerstoff im Behälter und der Aktivität der Mikroorganismen hin (Abbildung 36). Methanogene, d. h. methanproduzierende, Bakterien sind größtenteils in der letzten Stufe des anaeroben, mikrobiellen Abbaus von Biomasse aktiv, wenn kaum oder kein Sauerstoff mehr vorhanden ist [65]. Diese Bakterien bauen ebenfalls Trockenmasse ab. Die gemessenen Trockenmasseverluste deuten allerdings darauf hin, dass diese im Vergleich zum aeroben Abbau deutlich geringer ausfallen und demnach die Aktivität methanogener Mikroorganismen insgesamt gering ist (Abbildung 33).

In der nicht mit  $\text{N}_2$  gespülten Variante könnten vor allem nicht-methanogene Mikroorganismen aufgrund des vorhandenen Restsauerstoffs in den Poren zunächst aktiver gewesen sein, wodurch insgesamt weniger Methan und mehr  $\text{CO}_2$  gebildet wurde (Abbildung 35, Abbildung 36). Gleichzeitig kann es bei vorhandenem Restsauerstoff auch zu einem Abbau des gebildeten Methans zu  $\text{CO}_2$  kommen. Laut JÄMSEN *et al.* [65] kommen mehrere Forschungsprojekte zu dem Schluss, dass das entstehende Methan bei der Lagerung bzw. dem Abbauprozess von fester Biomasse bei Kontakt mit Sauerstoff und methanotrophen Bakterien zu  $\text{CO}_2$  oxidiert wird. Vor allem durch das Spülen mit  $\text{N}_2$  könnte der Restsauerstoff, der bei einer Oxidation von  $\text{CH}_4$  zu  $\text{CO}_2$  notwendig wäre, in dem Behälter verdrängt worden sein. Somit konnte sich bildendes  $\text{CH}_4$  auch nicht zu  $\text{CO}_2$  oxidieren und dadurch die realistisch bei der anaeroben Lagerung vorherrschenden Methankonzentrationen in Holzhackschnitzelschüttungen durch die Versuche überschätzt werden.

Die hohen Methankonzentrationen sind daher möglicherweise als weniger kritisch zu bewerten, wenn es in der Schüttung zu einem Abbau von  $\text{CH}_4$  zu  $\text{CO}_2$  kommt. Beim abrupten Öffnen der Schüttungen könnte jedoch das bisher nicht oxidierte Methan schlagartig freigesetzt werden und in die Atmosphäre gelangen (vgl. hierzu auch Versuchsreihe B). Die Frage der Methanfreisetzung aus Holzhackschnitzelschüttungen ist somit noch nicht abschließend geklärt.

### 7.3.2.6 Verbrennungsversuche

Die Verbrennungsversuche mit dem beschriebenen 30-kW-Kessel am Feuerungsprüfstand des TFZ zeigten einen geringfügigen Anstieg der Gesamtstaub- und  $\text{CO}$ -Emissionen (Abbildung 37, Abbildung 39) und einen geringen Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  im Vergleich zum Referenzmaterial (Abbildung 38). Ein signifikanter Zusammenhang (ANOVA:  $p \leq 0,5$ ) konnte dabei allerdings nicht nachgewiesen werden, weshalb lediglich von einem Trend gesprochen werden kann.

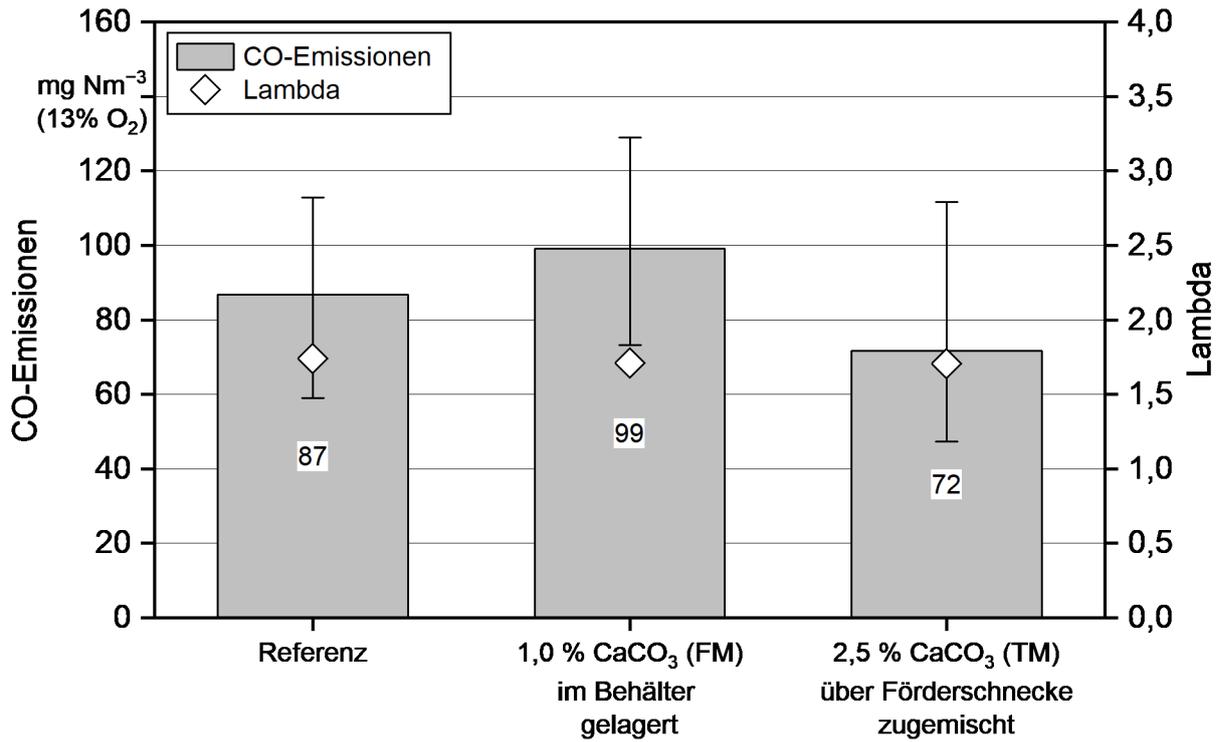


Abbildung 37: Mittlere CO-Emission und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert ± Min/Max in Versuchsreihe A (n = 5)

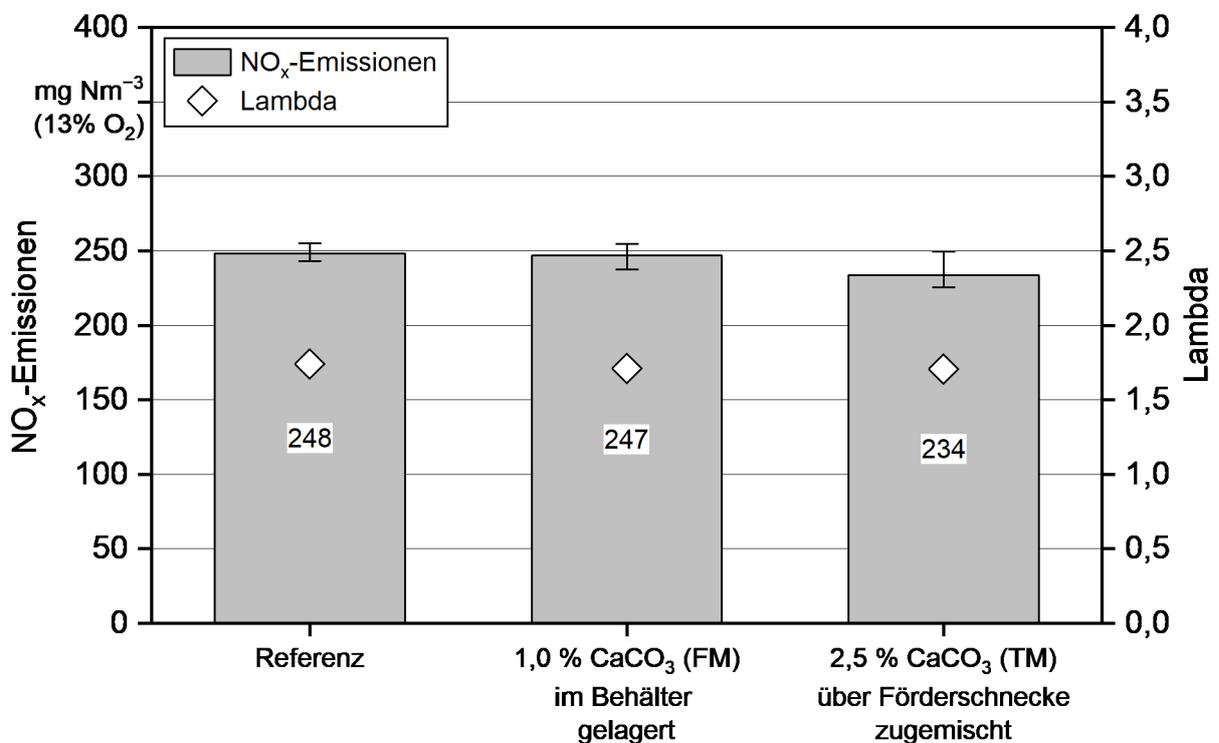


Abbildung 38: Mittlere NO<sub>x</sub>-Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert ± Min/Max in Versuchsreihe A (n = 5)

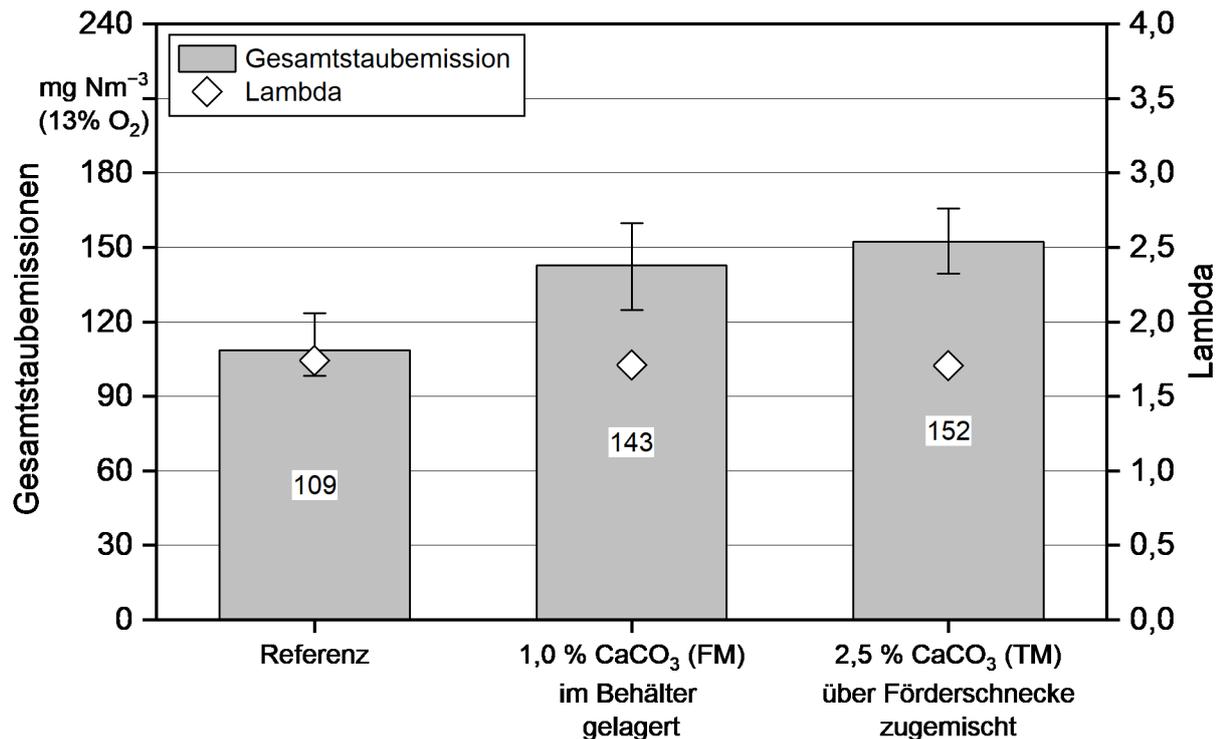


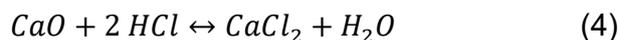
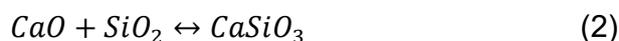
Abbildung 39: Mittlere Gesamtstaubemission und Lambda bei den Feuerungsversuchen bei 13 % Bezugssauerstoff; Mittelwert  $\pm$  Min/Max in Versuchsreihe A ( $n = 5$ )

Im Gegensatz zur Additivierung der Brennstoffe mit kaolinithaltigen Tonmineralen erhöhte die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  bei dem vorgemischtem Material die Emissionen an Gesamtstaub im Vergleich zur Referenz und ist daher nicht zur Absenkung der Emissionen zu empfehlen [59] [63]. Als Ursache hierfür wird bei DRAGUTINOVIC *et al.* [41] eine erhöhte Freisetzung des Elements Kalium durch Anwesenheit von  $\text{CaCO}_3$  genannt, das maßgeblich für die Aerosolbildung verantwortlich ist, da Kalium ohne Anwesenheit von  $\text{CaCO}_3$  zu größeren Anteilen in der Asche fixiert werden würde.

Die unterschiedlichen Zeitpunkte der  $\text{CaCO}_3$ -Beimengung hatten ebenso keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Emissionen bei der Verbrennung. Eine Lagerung mit  $\text{CaCO}_3$  als Additiv und die anschließende Verbrennung haben somit vergleichbare Emissionen wie eine Verbrennung, bei der das  $\text{CaCO}_3$  nicht mit eingelagert, sondern nachträglich über die Förderschnecke mit eingetragen wurde. Daraus kann geschlossen werden, dass durch die Anwesenheit von  $\text{CaCO}_3$  während der Lagerung tendenziell kaum Prozesse ablaufen, die einen großen Einfluss auf die hier betrachteten Emissionen haben.

Trotz der erhöhten Emissionen an Gesamtstaub sind durch die Beimengung von  $\text{CaCO}_3$  auch positive Effekte auf die Schadstoffkonzentration in den Abgasen zu erwarten.  $\text{CaCO}_3$  kann dabei in verschiedenen Reaktionen teils problematische Elemente wie Chlor und Schwefel und deren Verbindungen als Feststoff in die Asche einbinden. In der

folgenden Auflistung sind einige Reaktionswege dargestellt, die bei der Verbrennung ablaufen können [41]:



Die aufgelisteten Prozesse basieren darauf, dass bei hohen Temperaturen > 600 °C das zugegebene CaCO<sub>3</sub> zu CaO und CO<sub>2</sub> umgesetzt wird. Infolgedessen kann das entstehende CaO mit verschiedenen teils problematischen Verbindungen reagieren. In Reaktion (4) wird beispielsweise HCl, das in der Feuerungstechnik unter anderem auch für Korrosion verantwortlich ist, als Bestandteil der Asche gebunden. Reaktion (5) zeigt, dass CaO in der Lage ist, SO<sub>3</sub> zu binden. Das Additiv kann somit helfen, die Emissionen für HCl und SO<sub>x</sub> zu verringern [41].

Mit keinem der verwendeten Brennstoffe konnte der nationale Grenzwert der Stufe 2 für Gesamtstaubemissionen der 1. Verordnung zur Einhaltung des Bundesimmissionschutzgesetzes (1. BImSchV) für Kessel < 1 MW (20 mg Nm<sup>-3</sup> bei 13 % O<sub>2</sub>) eingehalten werden. Dies war allerdings auch mit dem unbehandelten Referenzbrennstoff nicht der Fall. Im Gegensatz zu den Emissionen an Gesamtstaub lagen die CO-Emissionen des Kessels bei allen Brennstoffen unter dem jeweiligen Grenzwert von 400 mg m<sup>-3</sup> (bei 13 % O<sub>2</sub>). In der 1. BImSchV sind keine Grenzwerte für NO<sub>x</sub> vorgegeben.

Somit war vor allem aufgrund der Staubemissionen keiner der Brennstoffe für die Verbrennung in dem verwendeten Kessel ohne zusätzliche sekundäre Abgasreinigungssysteme, wie beispielsweise elektrostatische Abscheider, geeignet. Anzumerken ist, dass die Kesseleinstellungen nicht speziell auf den Brennstoff angepasst wurden. Dies kann, wie bei vorangegangenen Forschungsvorhaben am TFZ gezeigt wurde, teils beträchtliche Auswirkungen auf das Emissionsverhalten haben [117]. Ebenso wurden wegen der gravimetrischen Messung nach VDI 2066-1 [111] keine Abzüge aufgrund der Messunsicherheit der Messgeräte oder der Messwertrundung, wie sie bei der Überprüfung durch das Schornsteinfegerhandwerk möglich sind, berücksichtigt (VDI 4207-2 [112]).

Weitere Verbrennungsversuche mit Vergleichen von Mieten-gelagerten und technisch getrockneten Holzhackschnitzeln finden sich in Kapitel 12.

## 7.4 Versuchsreihe B: Weiterführende Messungen zur anaeroben Lagerung von Holzhackschnitzeln in Behältern, Silos und einer Miete

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Versuchsreihe A (Unterkapitel 7.3) wurde im Sommer 2018 eine weitere Studie (Versuchsreihe B) durchgeführt. In dieser wurde gezielt die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln aus Waldrestholz und aus dem Kurzumtrieb untersucht. Neben einer erweiterten Behälterlagerung erfolgte die Lagerung in kleinen Betonsilos, die den Praxisfall simulieren sollten. Im Fall von Waldrestholz erfolgte zusätzlich die Lagerung der Holzhackschnitzel in einer Miete als Referenzverfahren.

### 7.4.1 Material und Methoden in Versuchsreihe B

Alle Versuche der Versuchsreihe B fanden am Betriebshof des TFZ in Straubing statt. Als Ausgangsmaterial kamen frische Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (Nadelholz, v. a. *Picea abies*) und aus dem Kurzumtrieb (Pappel, *Populus nigra* × *Populus maximosczii*, Max 3) zum Einsatz. Die Brennstoffe stammten aus Lieferungen für das 1,3-MW-Heizwerk des TFZ. Die Lagerung erfolgte von Mai bis Oktober 2018 und betrug 140 Tage.

Bei Anlieferung der Brennstoffe wurden zunächst jeweils die gesamten Chargen (45 Srm Waldrestholz, 12 Srm KUP) repräsentativ nach DIN EN ISO 18135 [36] beprobt. Die gelieferten Waldrestholzhackschnitzel kamen dabei auch für die Versuche in Kapitel 9 (siehe Abschnitt 9.2.4) und Kapitel 12 zum Einsatz. Je Brennstoff wurden zunächst der Wassergehalt nach DIN EN ISO 18134-2 [32] ( $n = 10$ ) und die Schüttdichte nach DIN EN ISO 17828 [30] ( $n = 10$ ) bestimmt. Daneben wurden Proben für die Analyse des Aschegehalts nach DIN EN ISO 18122 [31] ( $n = 5$ ) und des Heizwerts nach DIN EN ISO 18125 [35] ( $n = 5$ ) sowie für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels horizontalen Siebverfahrens nach DIN EN ISO 17827-1 [29] ( $n = 5$ ) gewonnen. Für die Berechnung des Heizwerts wurde auf Datenbankwerte des TFZ bezüglich typischer Werte für die inhaltsstoffliche Zusammensetzung (Gehalte an Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff) für die jeweiligen Sortimente zurückgegriffen. Eine detaillierte Beschreibung der Analysemethoden findet sich u. a. in den Kapiteln 4 und 6.

Die Holzhackschnitzel wurden analog zu Versuchsreihe A in Lagerbehältern (vgl. Abschnitt 7.3.1), aber auch in abgedichteten Betonsilos und – im Fall des Waldrestholzes – in einer Freilandmiete gelagert. Daneben erfolgte bei Anlieferung der Brennstoffe die technische Trocknung des Waldrestholzes in zwei Teilchargen von je 1,5 Srm für die Versuche zur Brückenbildungsneigung und zum Verbrennungsverhalten in Kapitel 12. Zum Einsatz kam hierzu der Satzrockner des TFZ, der im Detail in Kapitel 9 beschrieben ist.

#### 7.4.1.1 Behälterlagerung

Je Ausgangsmaterial wurden drei Lagerbehälter aerob und drei Lagerbehälter anaerob gelagert (Tabelle 23). Insgesamt wurden somit zwölf Behälter in das Versuchsdesign

integriert. Lagerort war erneut das wind- und regengeschützte Außenlager des TFZ, das bereits in Versuchsreihe A verwendet wurde. Die anaerobe Lagerung erfolgte analog zur Versuchsreihe A durch Verschließung der Lagerbehälter mit einer Plexiglasplatte und Silikon (Abbildung 40). Es erfolgte keine Spülung der Behälter mit Stickstoff (vgl. Abschnitt 7.3.1). Für die aerobe Lagerung in Versuchsreihe B wurden erneut Behälter mit perforiertem Boden verwendet. Die Seitenwände aller Behälter waren mit einer Isolierung ausgestattet, um Temperaturschwankungen der Außenluft abzupuffern.

*Tabelle 23: Versuchsdesign der Behälterlagerung in Versuchsreihe B*

Behälternummer	Brennstoff	Lagerungsart
B1 bis B3	Waldrestholz	anaerob
B4 bis B6	Waldrestholz	aerob
B7 bis B9	KUP	anaerob
B10 bis B12	KUP	aerob



*Abbildung 40: Mit Plexiglas und Silikon gasdicht verschlossene Behälter für die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln. Jeder Behälter wurde mit einem Temperatursensor (grünes Kabel) und einem verschließbaren Anschluss für einen Gassammelbeutel ausgestattet (Versuchsreihe B)*

Jeder Behälter wurde mit einem Temperatursensor versehen (Datalogger testo 175-H1, Testo AG), der alle zehn Minuten die Temperatur innerhalb der jeweiligen Schüttung aufzeichnete. Parallel dazu wurden die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit der Außenluft im Zehn-Minuten-Takt gemessen (Datalogger testo 175-H1, Testo AG).

Wie bereits in Versuchsreihe A wurde bei jedem Behälter vor Einlagerung die Gesamtmasse der Holzhackschnitzel bestimmt ( $n = 1$ ). Eine Wiegung der Behälter während der Lagerung fand nicht statt. Im Gegensatz zu Versuchsreihe A wurde in Versuchsreihe B anstatt einer Kranwaage eine Plattformwaage (MT KD600, Mettler-Toledo GmbH) verwendet.

Bei jedem Behälter wurden zu Beginn der Lagerung der Wassergehalt der Holzhackschnitzel ( $n = 5$ ) und die Partikelgrößenverteilung ( $n = 1$ ) gemessen. Eine zusätzliche Bestimmung des Aschegehalts, des Heizwerts und der Schüttdichte konnte entfallen, weil bereits eine repräsentative Beprobung des Ausgangsmaterials stattgefunden hatte.

Auch in Versuchsreihe B wurde die Gaszusammensetzung der Luft in den anaerob gelagerten Behältern bestimmt. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe wurden die anaerob gelagerten Behälter dabei nicht mit einem Gärspond versehen. Stattdessen wurde an der Öffnung in der jeweiligen Plexiglasplatte ein verschließ- und wechselbarer Gassammelbeutel angebracht (100 l, Tedlar<sup>®</sup> Gas sample bag, Restek GmbH). Auf diese Weise konnte das Gas, das sich jeweils in den anaerob gelagerten Behältern während der Lagerung gebildet hatte, vollständig erfasst werden. Der Zeitpunkt der Messung wurde anhand des Füllstands der Gassammelbeutel festgelegt. Die Gaszusammensetzung wurde mit einem Gasanalysatoren für CO und CO<sub>2</sub> (Uras 26, ABB Group), O<sub>2</sub> (Magnos 206, ABB Group), SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> (Limas 11, ABB Group) sowie mit einem FID für CH<sub>4</sub> (FID 1230, Testa GmbH) gemessen. Die Beutel wurden dazu bei konstantem Volumenstrom entleert (10 l min<sup>-1</sup>). Das Gesamtvolumen pro Beutel ergab sich aus dem Volumenstrom und der für die Entleerung benötigten Zeit.

Bei Auslagerung erfolgte je Behälter erneut die Bestimmung der Gesamtmasse der Holzhackschnitzel ( $n = 1$ ) sowie die Probenahme für die Bestimmung des Wassergehalts ( $n = 5$ ), des Aschegehalts ( $n = 3$ ), des Heizwerts ( $n = 1$ ), der Schüttdichte ( $n = 1$ ) und der Partikelgrößenverteilung ( $n = 1$ ). Hierzu wurden die Behälter vorab komplett auf einen trockenen, sauberen und ebenen Untergrund entleert und durch dreimaliges Umsetzen mit einer Schaufel homogenisiert. Anschließend wurden die Teilproben repräsentativ durch Probenteilung nach DIN EN ISO 18135 [36] gewonnen. Für die Bestimmung des Heizwerts wurde eine homogene Mischprobe aus den Teilproben für die Bestimmung des Aschegehalts verwendet.

#### **7.4.1.2 Lagerung in abgedichteten Betonsilos**

Parallel zu der Lagerung in Behältern wurde in Versuchsreihe B die Lagerung beider Holzhackschnitzelsortimente (Waldrestholz, KUP) in kleinen Betonsilos durchgeführt. Hierbei wurden U-Profile mit einem Innenvolumen von ca. 2 m<sup>3</sup> (2 m Länge × 1 m Breite × 1 m Höhe) verwendet (Abbildung 41). Für die Versuche wurde jeweils eine der beiden

offenen Seiten je Silo mithilfe einer Plexiglasplatte verschlossen. Diese wurde mit Silikon abgedichtet und mit Holzlatten seitlich verstärkt (siehe Abbildung 41, rechts). Somit entstanden Silos, die dem Aufbau von typischen abgedichteten Fahrsilos aus der Praxis in einem kleineren Maßstab sehr nahekommen.

Die Verwendung kleinerer Silos anstelle eines größer angelegten Feldversuchs wurde gewählt, um die Anzahl an Wiederholungen pro Variante erhöhen zu können. Ziel der Versuche war es, die Anwendbarkeit der anaeroben Lagerung in einem möglichst praxisnahen Versuchsaufbau zu testen, um die generelle technische Umsetzbarkeit dieser Lagerungsart zu überprüfen. Den Versuchen lag dabei die These zugrunde, dass die technische Machbarkeit im größeren Fahrsilo gegeben sein dürfte, wenn auch im kleinen Versuchsmaßstab, d. h. bei einem ungünstigen Verhältnis von Lagervolumen pro gasdicht verschlossener Lagerfläche, eine anaerobe Lagerung erfolgreich realisiert werden kann.



Abbildung 41: Leeres Betonsilo (U-Profil) vor der Lagerung (links); mit Holzhackschnitzeln gefülltes Betonsilo inkl. Plexiglaswand, Temperatursensoren und Silofolie (rechts)

Insgesamt wurden sechs Silos für die Lagerung angelegt. Drei der Silos wurden mit Holzhackschnitzeln aus Waldrestholz (S1, S2 und S3) und drei der Silos mit KUP-Hackschnitzeln (S4, S5 und S6) befüllt. Hierzu wurde zunächst eine größere Teilmenge der jeweiligen Gesamtcharge mit einem Radlader homogenisiert.

Die Seitenwände der Betonsilos wurden vorab mit Silofolie (LDPE-Silofolie 150, dm-Folien GmbH) ausgelegt (siehe Abbildung 41, rechts). Nach der Vorbereitung der Silos und der Holzhackschnitzeln erfolgte die schrittweise Befüllung der Silos mit den homogenisierten Brennstoffen. Hierzu wurden Mörtelwannen mit einem Volumen von ca. 60 l mit Holzhackschnitzeln befüllt, auf einer Plattformwaage (60 kg, MT KB60.2, Mettler-Toledo GmbH) eingewogen und anschließend in das Silo entleert. Die Summe der Teilmassen ergab das jeweilige Gesamtmasse an Holzhackschnitzeln pro Silo. Beim Befüllen der

Silos wurden die Holzhackschnitzel manuell verdichtet. In jedes Silo wurden zwei Temperatursensoren mittig auf einer Höhe von 0,5 m eingebaut. Die Abstände der Sensoren zur Plexiglaswand betragen 0,5 und 1 m. Es wurden dieselben Temperatursensoren und Aufzeichnungsintervalle wie bereits bei den Behälterversuchen gewählt (10 Minuten, Datalogger testo 175-H1, testo AG). Parallel erfolgte die Messung der Außenlufttemperatur und der Luftfeuchte (Datalogger testo 175-H1, testo AG).



*Abbildung 42: Holzackschnitzelsilo beim Aufbau inkl. Silofolie, Unterziehfolie und Sandsäcke (links). Lagerung in abgedichteten Silos am Betriebshof des TFZ inkl. Sonnen- und Vogelschutz (rechts)*

Je Silo wurde beim Aufbau die Brennstoffqualität der eingelagerten Holzhackschnitzel bestimmt. Hierzu wurden an jedem Silo für die Analyse des Wassergehalts ( $n = 5$ ) sowie für die Analyse der Partikelgrößenverteilung ( $n = 1$ ) Proben gewonnen. Für die Parameter Aschegehalt, Heizwert und Schüttdichte wurde auf die Analysewerte des Ausgangsmaterials bei Anlieferung zurückgegriffen.

Nach der Befüllung wurde jedes Silo zunächst mit einer Unterziehfolie (dm-LDPE-Folie transparent, dm-Folien GmbH) und anschließend mit Silofolie abgedeckt. Die Folien wurden mit Sandsäcken beschwert. Danach wurde die Silofolie, die als Wandfolie verwendet wurde, umgefaltet und ebenfalls mit Sandsäcken fixiert (Abbildung 42, links).

Die Ausrichtung der Silos war mit der Plexiglasseite nach Osten hin orientiert, wobei die durchsichtige Seitenwand mit überschüssiger Silofolie als Sonnenschutz abgedeckt wurde (Abbildung 42, rechts). Dieser Aufbau erlaubte eine optische Bewertung der Holzhackschnitzel während der gesamten Lagerung bei gleichzeitiger Reduzierung der Sonneneinstrahlung. Zusätzlich wurde mithilfe von Holzlatten und einem Kunststoffnetz ein Vogelschutz an den Silos angebracht. Alle Silos wurden mithilfe von Pflastersteinen so platziert, dass ein leichtes Gefälle von Ost nach West gegeben war (5 cm auf 2 m). Hierdurch sollte dem Sickerwasser, das bei der Lagerung auftreten könnte, die Möglichkeit zum Abfluss gegeben werden.

Nach einer Lagerdauer von ca. fünf Monaten wurden die Silos einzeln abgebaut. Hierzu wurde zunächst die Silo- und Unterziehfolie entfernt und die Gesamtmasse der gelagerten Holzhackschnitzel bestimmt. Dabei wurde analog zum Siloaufbau der Brennstoff zunächst in Mörtelwannen mit je 60 l Fassungsvermögen überführt und deren Masse mit derselben Plattformwaage gemessen. Anschließend wurden die Holzhackschnitzel je Silo analog dem Vorgehen bei der Behälterlagerung auf einem trockenen, sauberen und ebenen Untergrund vereint und mithilfe von Schaufeln manuell durch dreimaliges Umsetzen homogenisiert. Danach erfolgten die Bestimmung der Schüttdichte ( $n = 3$ ) sowie die Gewinnung von Teilproben für die Analyse des Wassergehalts ( $n = 5$ ), des Aschegehalts ( $n = 3$ ), des Heizwerts ( $n = 1$ ) und der Partikelgrößenverteilung ( $n = 3$ ). Für die Bestimmung des Heizwerts wurde eine homogene Mischprobe aus den Teilproben für die Aschegehaltsbestimmung verwendet.

#### 7.4.1.3 Lagerung von Waldrestholz in einer Lagermiete

Zusätzlich zu der Lagerung in Behältern und der Lagerung in abgedichteten Silos wurde mit dem Sortiment Waldrestholz eine kleine Holzhackschnitzelmiete von ca. 12 Srm am Betriebshof des TFZ angelegt. Diese diente vornehmlich der Gewinnung von Brennstoffen für die Verbrennungsversuche aus Kapitel 12, stellte aber zugleich auch das Referenzlagerverfahren dar, das einen Vergleich mit der oben beschriebenen anaeroben Lagerung in den Betonsilos ermöglicht. Der Aufbau und das Vorgehen bei der Messung orientierte sich dabei an den Versuchsmieten aus Kapitel 6.

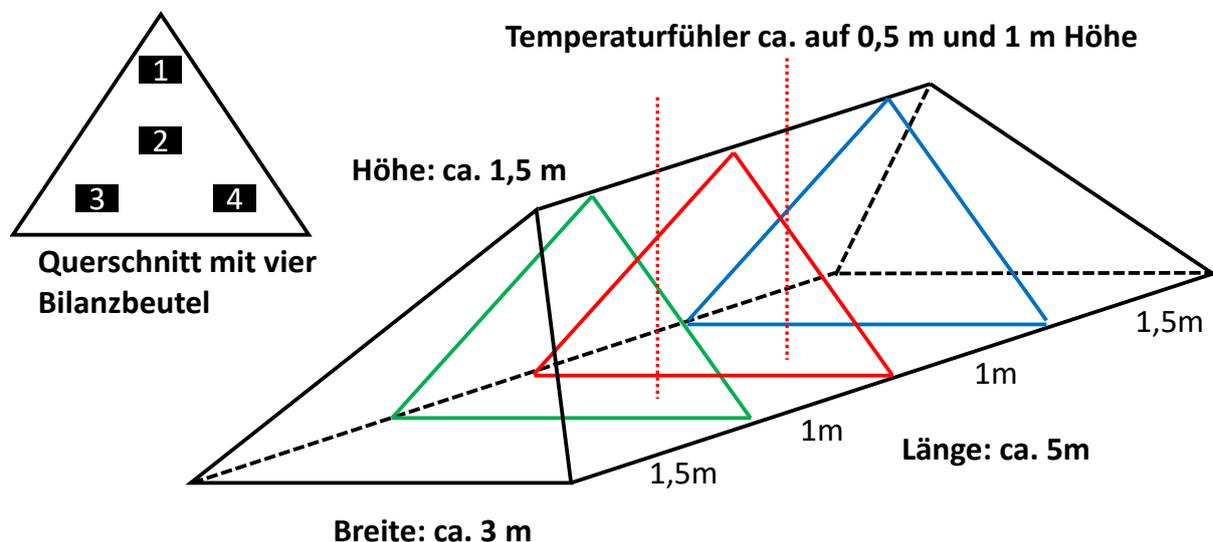


Abbildung 43: Schematischer Aufbau der 12 Srm großen Lagermiete am Betriebshof des TFZ in Versuchsreihe B

Die Analyse der Mietenlagerung erfolgte erneut mittels Bilanzbeuteln ( $n = 12$ ). Dabei wurden dasselbe Beuteldesign und Vorgehen verwendet, das bereits in Kapitel 6 beschrieben wurde. Von jedem Beutelinhalt wurden die Masse und der Wassergehalt bei

Einlagerung bestimmt. Die Verteilung der zwölf Beutel ist in Abbildung 43 wiedergegeben.



Abbildung 44: Einbau der untersten Bilanzbeutelschicht in die Lagermiete (links) und mit Vlies abgedeckte Miete (rechts)

Der Aufbau erfolgte analog zum Vorgehen bei den Mieten aus Kapitel 6. Zunächst wurde auf einem ebenen Untergrund am Betriebshof des TFZ ein Bodenschutzgewebe (Bändchengewebe-Floor schwarz, dm-Folien GmbH) ausgelegt. Anschließend wurde die Miete schrittweise mithilfe eines Radladers aufgeschüttet, wobei die Bilanzbeutel händisch eingebaut wurden (Abbildung 44, links). Analog zu den Mieten in Kapitel 6 wurden Temperaturfühler ( $n = 4$ , jeweils zwei Fühler in den Höhen 0,5 und 1,0 m) im Mieteninneren installiert (Abbildung 43), welche die Mietentemperatur in demselben Zeitintervall wie bei der Silo- und Behälterlagerung aufzeichneten (zehn Minuten, Datalogger testo 175-H1, testo AG). Danach wurde die Miete mit einem diffusionsoffenen Vlies (PolyTex,  $200 \text{ g m}^{-2}$ , Zill GmbH & Co. KG) abgedeckt (Abbildung 44, rechts).

Nach der fünfmonatigen Lagerung wurden die Bilanzbeutel und die Temperatursensoren aus der Miete gewonnen und jeder Beutelinhalt auf seine Trockenmasse und seinen Wassergehalt hin analysiert. Die Messung des Aschegehalts erfolgte an sechs Bilanzbeuteln, die Messung des Heizwerts an drei Beuteln. Ebenfalls wurden drei Proben für die Analyse der Partikelgrößenverteilung aus der Miete genommen und auch die Schüttdichte des gelagerten Materials wurde dreimal bestimmt.

## 7.4.2 Ergebnisse und Diskussion zu Versuchsreihe B

### 7.4.2.1 Brennstoffqualität zu Beginn der Lagerung

Beide als Ausgangsmaterial verwendeten Sortimente zeigten typische Werte für Holzhackschnitzel aus Waldrestholz und aus dem Kurzumtrieb (Tabelle 24, Tabelle 25). Der mittlere Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel lag mit 40,7 m-% unterhalb des Werts, der für frisch geerntete und gehackte Brennstoffe aus Waldholz erwartet wird (ca.

50 m-%), weshalb von einer leichten Vortrocknung des Materials, beispielsweise als ungehacktes Holz im Polter, ausgegangen werden muss (vgl. Kapitel 5 [78] [80]). Im Vergleich dazu lag der mittlere Wassergehalt der KUP-Hackschnitzel mit 53,9 m-% im typischen Bereich für diesen Brennstoff [77].

Der Aschegehalt des Waldrestholzes war mit 1,5 m-% (wf) relativ niedrig (Tabelle 24). Dies lässt sich vermutlich auf einen hohen Stammholzanteil an der Gesamtcharge zurückführen [40]. Im Gegensatz dazu lagen die KUP-Hackschnitzel mit 3,3 m-% über den Durchschnittswerten für dieses Sortiment [77]. Kurzumtriebsplantagen werden üblicherweise im Winter, d. h. im unbelaubten Zustand beerntet. Dies war im vorliegenden Fall nicht möglich, da die Versuche im Mai 2018 starteten. Folglich lässt sich der leicht erhöhte Aschegehalt auf einen höheren Laubanteil im Brennstoff zurückführen. Auch eine geringe Verschmutzung der KUP-Hackschnitzel mit Mineralboden kann nicht ausgeschlossen werden. Die Heizwerte beider Brennstoffe lagen für das jeweilige Sortiment im typischen Wertebereich.

**Tabelle 24:** *Mittlere Brennstoffqualität (Wassergehalt, Schüttdichte, Aschegehalt, Heizwert, jeweils  $\pm$  Standardabweichung) der beiden Ausgangsmaterialien Waldrestholz (Wrh) und KUP zu Beginn von Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)*

Sortiment	Wassergehalt in m-%	Schüttdichte in $\text{kg m}^{-3}$ , ar	Aschegehalt in m-%, wf	Heizwert in $\text{MJ kg}^{-1}$ , wf
Wrh	40,7 $\pm$ 1,8	305 $\pm$ 13	1,5 $\pm$ 0,2	19,3 $\pm$ 0,1
KUP	53,9 $\pm$ 2,0	281 $\pm$ 10	3,3 $\pm$ 0,7	18,1 $\pm$ 0,0

Die Holzhackschnitzel aus Waldrestholz wurden sehr grob gehackt (Siebkorb: 100  $\times$  120 mm). In der Folge waren die Partikel sehr grobkörnig und der Brennstoff konnte aufgrund der maximalen Querschnittsfläche (> 6  $\text{cm}^2$ ) nur als P63 nach DIN EN ISO 17225-1 [27] eingeordnet werden. Eine Einordnung nach DIN EN ISO 17225-4 [28] war dagegen nicht möglich. Die KUP-Hackschnitzel entsprachen P45S nach DIN EN ISO 17225-4 bzw. P31 nach DIN EN ISO 17225-1 (Tabelle 25).

**Tabelle 25:** *Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$  Standardabweichung) der beiden Ausgangsmaterialien Waldrestholz (Wrh) und KUP zu Beginn von Versuchsreihe B*

Sortiment	0 bis 3,15 mm in m-%	3,15 bis 8 mm in m-%	8 bis 16 mm in m-%	16 bis 31,5 mm in m-%	31,5 bis 45 mm in m-%	45 bis 63 mm in m-%	größer 63 mm in m-%	Max. Länge in mm
Wrh	5,8 $\pm$ 0,7	6,5 $\pm$ 0,9	17,4 $\pm$ 2,5	33,8 $\pm$ 1,9	19,3 $\pm$ 2,1	11,5 $\pm$ 2,6	5,7 $\pm$ 2,2	151 $\pm$ 87
KUP	1,7 $\pm$ 0,6	4,7 $\pm$ 1,3	46,2 $\pm$ 9,8	35,4 $\pm$ 6,3	8,0 $\pm$ 4,2	3,3 $\pm$ 2,1	0,6 $\pm$ 1,4	138 $\pm$ 52

Aufgrund der Brennstoffqualität sind die Ausgangsmaterialien als ungeeignet für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen einzuordnen (hoher Wassergehalt, hoher Aschegehalt (KUP), unpassende Partikelgröße (Wrh)). Sie sind eher für die Nutzung in größeren Heiz-(Kraft-)Werken geeignet.

#### 7.4.2.2 Behälterversuche

Die Temperaturverläufe in den Lagerbehältern zeigten Tendenzen, die bereits in Versuchsreihe A beobachtet wurden (Abbildung 45, vgl. Abschnitt 7.3.2). Sie bestätigen somit die dort gemessenen Ergebnisse. Die mittleren Temperaturverläufe der anaerob gelagerten Behälter folgten dabei dem Temperaturverlauf der Außenluft, wobei es zu einer leichten zeitlichen Verzögerung aufgrund des unterbundenen Gasaustauschs kam. Die Verläufe in den aerob gelagerten Behältern liefen parallel zur Außenluft, zeigten jedoch v. a. im ersten Monat der Lagerung häufig höhere Werte als die Außentemperatur. Ab ca. dem zweiten Lagerungsmonat (d. h. ab Tag 30) passten sich die Temperaturverläufe der aeroben Behälter stark an die Außentemperatur an. Besonders die Temperatur in den offen gelagerten KUP-Behältern war im ersten Lagermonat deutlich erhöht, was als Hinweis auf eine erhöhte mikrobielle Aktivität interpretiert werden kann (Abbildung 45).

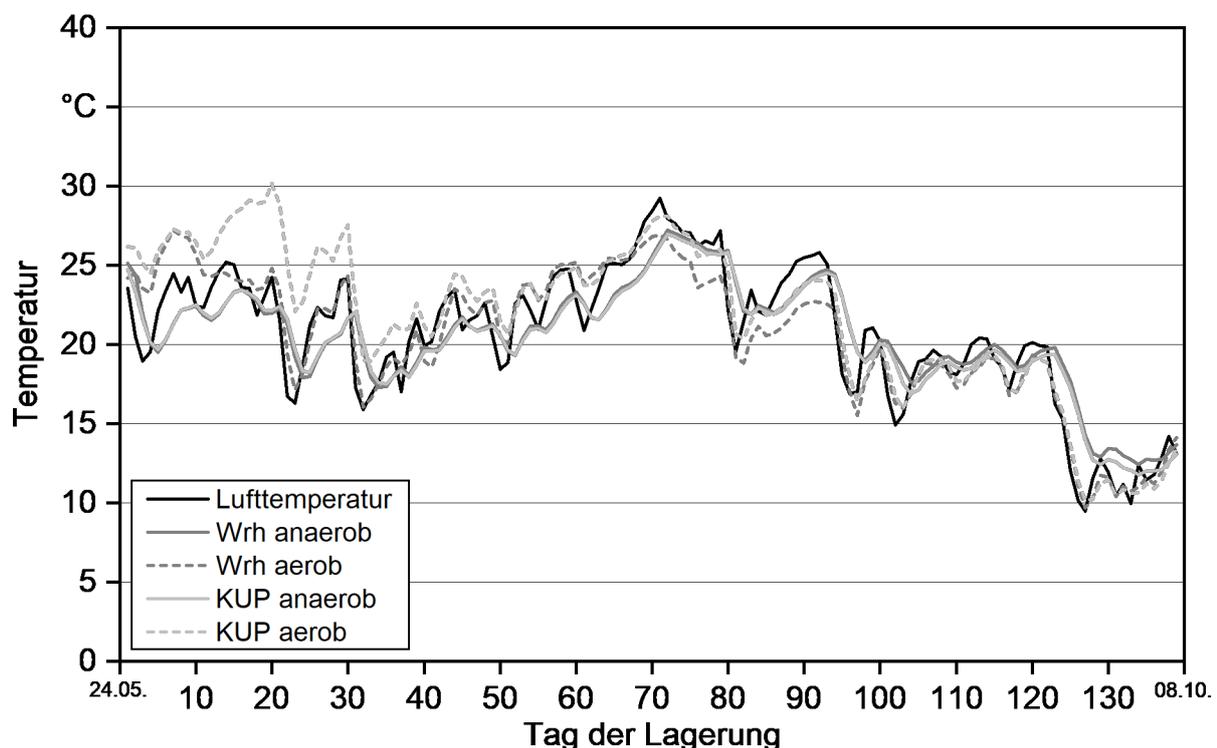


Abbildung 45: Mittlerer Temperaturverlauf in den Lagerbehältern aus Versuchsreihe B

Die mittlere Gesamtmasse der mit Waldrestholz befüllten Behälter lag bei Einlagerung über der mittleren Masse der KUP-Behälter (Abbildung 46). Dies lässt sich auf die höhere Schüttdichte der Materialien zurückführen (vgl. Tabelle 24 sowie Abbildung 48). Die

Masseveränderungen der Behälter über die Lagerdauer von fünf Monaten zeigten dieselben Tendenzen, wie sie bereits in Versuchsreihe A beobachtet worden waren. Analog zur ersten Versuchsreihe kam es bei den anaerob gelagerten Behältern zu keiner Masseveränderung (Wrh:  $-0,1 \pm 0,1$  kg, KUP:  $-0,2 \pm 0,1$  kg), wohingegen die aerob gelagerten Behälter deutlich an Masse verloren (Wrh:  $-41,9 \pm 1,7$  kg, KUP:  $-49,1 \pm 2,4$  kg). Der Masseverlust ist dabei als eine Kombination der Trockenmasse- und Wassergehaltsänderung über die Lagerdauer von fünf Monaten zu interpretieren.

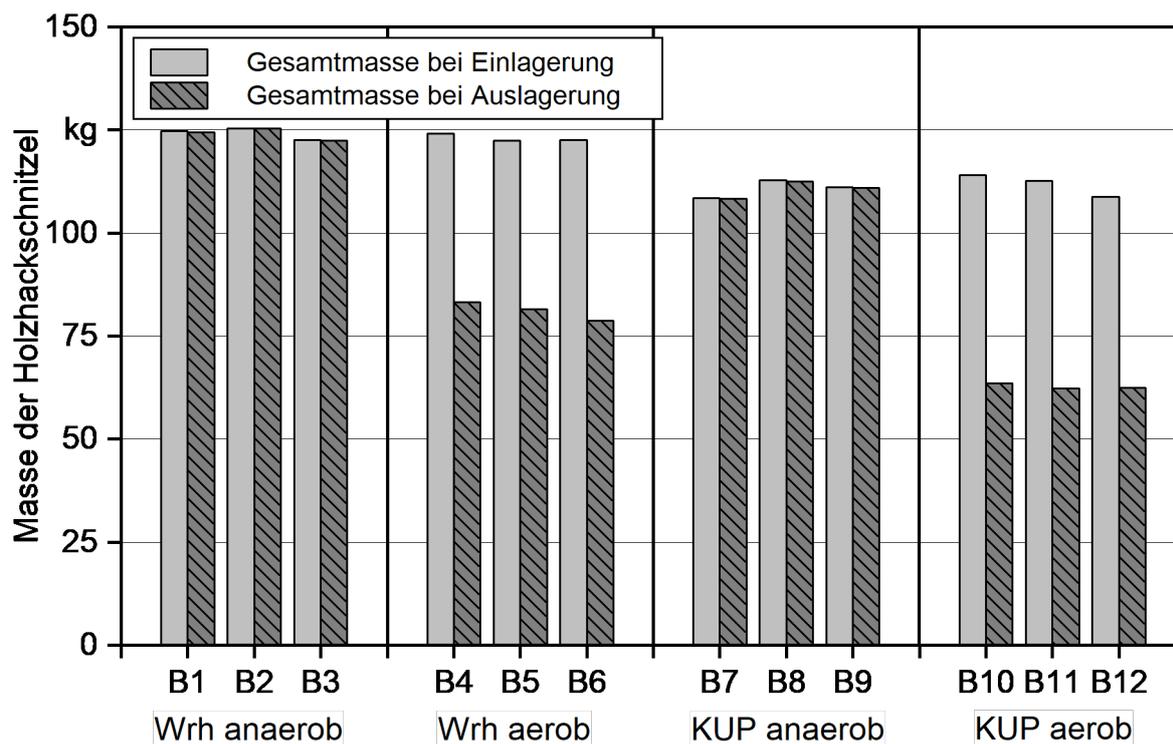


Abbildung 46: Gesamtmasse der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung

Der mittlere Wassergehalt der Holzhackschnitzel aus Waldrestholz war zum Zeitpunkt der Einlagerung in den Behältern identisch mit der Wassergehaltsmessung des Ausgangsmaterials, wohingegen der Wassergehalt der KUP-Brennstoffe mit  $-1,8$  m-% tendenziell niedriger war als derjenige des KUP-Ausgangsmaterials (Abbildung 47, Tabelle 24). Dieser Trend war in keinem Fall statistisch signifikant (t-Test). Er deutet aber auf eine leichte Trocknung der KUP-Brennstoffe zwischen Anlieferung und Befüllung der Behälter hin.

Nach der fünfmonatigen Lagerung kam es zu einer signifikanten Abnahme des Wassergehalts in den aerob gelagerten Behältern (Wrh:  $-25,8$  m-%; KUP:  $-27,8$  m-%). Die etwas stärkere Trocknung der aerob gelagerten KUP-Brennstoffe lässt sich eventuell auf die höheren Behältertemperaturen zu Beginn der Lagerung zurückführen (vgl. Abbildung 45). Im Gegensatz dazu veränderten sich die Wassergehalte der anaerob gelagerten Behälter nicht signifikant.

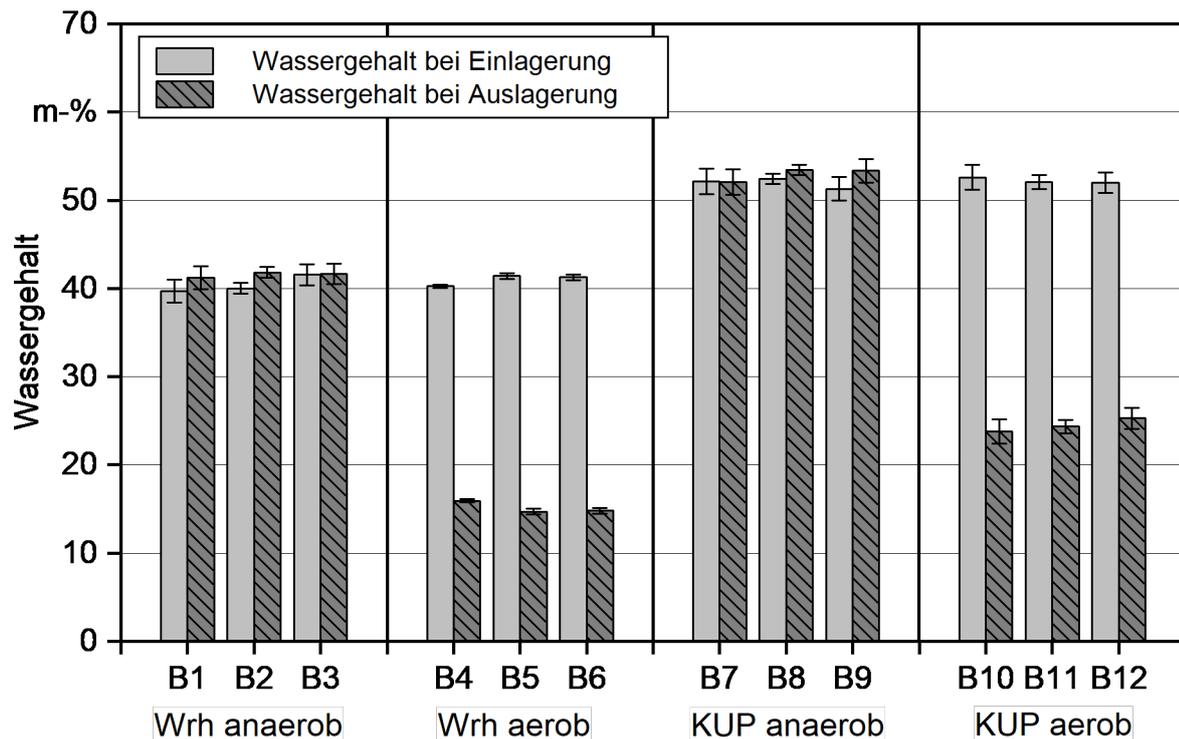


Abbildung 47: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$  Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung ( $n = 5$ )

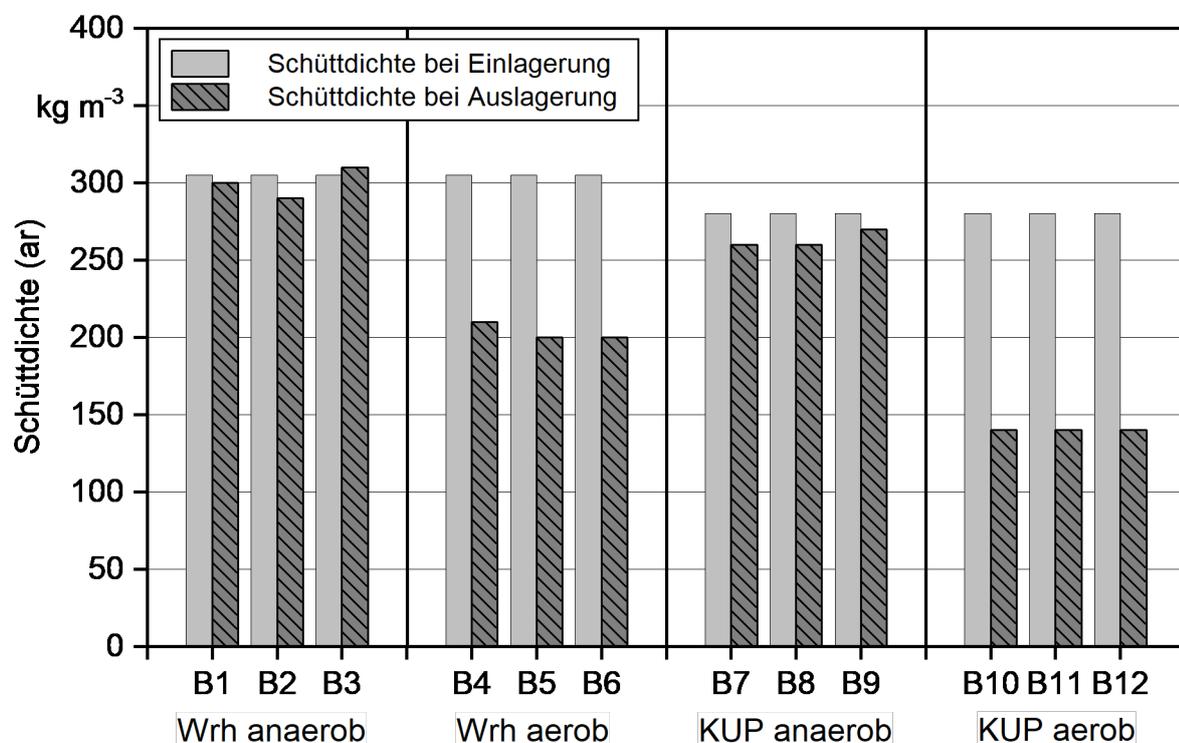


Abbildung 48: Mittlere Schüttdichte ( $\pm$  Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung

Nach der Trocknung lag der Wassergehalt der aerob gelagerten Waldrestholzhackschnitzel mit  $15,2 \pm 0,7$  m-% in einem Bereich, der auch mit der natürlichen Trocknung von gespaltenen Holzscheiten über die Lagerdauer von einem Sommer erreicht werden kann [77]. Die aerob gelagerten KUP-Brennstoffe lagen zum Zeitpunkt der Auslagerung bei  $24,5 \pm 0,8$  m-%. Die Wassergehalte beider gelagerten Sortimente wären demnach auch für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet.

Die Schüttdichte der Holzhackschnitzel veränderte sich während der Lagerung vor allem durch die Trocknung der Brennstoffe (Abbildung 48). Folglich kam es zu einer deutlichen Verringerung der Schüttdichte in den aerob gelagerten Behältern ( $n = 1$ ), wohingegen die anaerob gelagerten Behälter kaum Veränderungen zeigten.

Die geringfügig niedrigeren Schüttdichten der anaerob gelagerten KUP-Brennstoffe nach fünf Monaten Lagerung (Abbildung 48) sind voraussichtlich auf die geringen Unterschiede der Brennstoffe bei Einlagerung, v. a. auf Unterschiede im Wassergehalt zurückzuführen. Als Ausgangswert für den dargestellten Vergleich wurde für die Schüttdichte bei Einlagerung auf die Werte des Ausgangsmaterials bei Anlieferung zurückgegriffen. Im Fall der KUP-Brennstoffe zeigten die Ergebnisse des Wassergehalts bei Einlagerung bereits leichte Trocknungseffekte und damit leicht niedrigere Werte im Vergleich zum Ausgangsmaterial von ca. 1,8 m-% (vgl. Abbildung 47). Dieser Unterschied würde rechnerisch eine Veränderung der Schüttdichte der KUP-Hackschnitzel zu Beginn der Einlagerung von  $-10,4 \text{ kg m}^{-3}$  und damit einen Ausgangswert von ca.  $270 \text{ kg m}^{-3}$  anstelle von  $281 \text{ kg m}^{-3}$  (Tabelle 24) bedeuten. Dies kommt dem am Ende der Lagerung gemessenen Wert für die KUP-Schüttdichte in den Behältern B7 bis B9 sehr nahe ( $263 \text{ kg m}^{-3}$ ), weshalb sich die beobachteten Unterschiede teilweise auf Trocknungseffekte vor der Einlagerung zurückführen lassen.

*Tabelle 26: Mittlerer Aschegehalt und mittlerer Heizwert ( $\pm$  Standardabweichung) der in Behältern gelagerten Holzhackschnitzel bei Auslagerung in Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)*

Sortiment	Aschegehalt in m-% (wf)	Heizwert in $\text{MJ kg}^{-1}$ (wf)
Wrh anaerob	$1,9 \pm 0,3$	$19,8 \pm 0,2$
Wrh aerob	$1,6 \pm 0,4$	$19,7 \pm 0,1$
KUP anaerob	$2,8 \pm 0,3$	$18,5 \pm 0,1$
KUP aerob	$2,9 \pm 0,1$	$18,5 \pm 0,1$

Der Aschegehalt der Holzhackschnitzel nach fünfmonatiger Lagerung in den Lagerbehältern war beim Waldrestholz im Vergleich zum Ausgangsmaterial tendenziell leicht erhöht, bei den KUP-Hackschnitzeln tendenziell etwas niedriger (Tabelle 24, Tabelle 26). Keine dieser Beobachtungen war statistisch signifikant. Unterschiede zwischen den Lagerungsvarianten (aerob, anaerob) konnten somit nicht festgestellt werden. Auch der Heiz-

wert war in allen Varianten leicht erhöht (Tabelle 26). Dieser Effekt war sogar statistisch signifikant. Grund hierfür könnte eine selektive Zersetzung von Holzkomponenten mit einem niedrigen Heizwert (z. B. Zellulose) sein (vgl. [60] und Kapitel 6). Da dieser Effekt allerdings auch bei den anaerob gelagerten Behältern auftrat, könnte er auch an einer Varianz aufgrund der Probenahme des Ausgangsmaterials liegen. Insgesamt war die Zunahme im Heizwert jedoch als sehr gering zu bewerten ( $\leq 0,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ , wf).

Die Partikelgrößenverteilung der Holzhackschnitzel bei Einlagerung zeigte durchweg höhere Feinanteile (Masse der Partikel  $\leq 3,15 \text{ mm}$ ) als das jeweilige Ausgangsmaterial (Tabelle 25, Tabelle 27). Dies lässt sich möglicherweise auf die zusätzliche Bewegung der Brennstoffe vor der Einlagerung in die Behälter, beispielsweise bei der dreimaligen manuellen Homogenisierung mit einer Schaufel, zurückführen. Hierbei könnten vor allem kleinere Partikel wie z. B. Nadeln von den Zweigen im Brennstoff abgebrochen sein. Nichtsdestotrotz lassen sich die Brennstoffe in dieselben Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225 Teil 1 und 4 wie bei der Messung des Ausgangsmaterials einordnen (P63 für Wrh, P31 bzw. P45S bei KUP). Die Einordnung nach P63 des Waldrestholzes erfolgte erneut wegen des gemessenen Partikelquerschnitts  $> 6 \text{ mm}$ .

*Tabelle 27: Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$  Standardabweichung) der Holzhackschnitzel in den Lagerbehältern vor und nach der fünfmonatigen Lagerung*

Zeitpunkt	HS	0 bis 3,15 mm in m-%	3,15 bis 8 mm in m-%	8 bis 16 mm in m-%	16 bis 31,5 mm in m-%	31,5 bis 45 mm in m-%	45 bis 63 mm in m-%	größer 63 mm in m-%	Max. Länge in mm	
Vor Lagerung	Wrh anaerob	9,9 $\pm 0,7$	7,1 $\pm 1,1$	20,2 $\pm 3,7$	36,3 $\pm 5,1$	16,1 $\pm 1,6$	5,8 $\pm 1,8$	4,5 $\pm 0,4$	164 $\pm 28$	
	Wrh aerob	9,8 $\pm 1,1$	7,3 $\pm 0,8$	17,7 $\pm 7,9$	38,5 $\pm 5,4$	15,5 $\pm 3,0$	7,8 $\pm 3,1$	3,4 $\pm 2,3$	219 $\pm 33$	
	KUP anaerob	4,0 $\pm 0,2$	10,2 $\pm 1,5$	49,1 $\pm 1,0$	31,9 $\pm 2,6$	3,7 $\pm 2,4$	0,7 $\pm 0,8$	0,4 $\pm 0,7$	128 $\pm 32$	
	KUP aerob	3,7 $\pm 0,4$	10,3 $\pm 0,5$	47,4 $\pm 3,7$	32,2 $\pm 1,2$	5,1 $\pm 3,4$	1,2 $\pm 0,4$	-	139 $\pm 37$	
	Nach Lagerung	Wrh anaerob	11,1 $\pm 2,9$	10,9 $\pm 1,2$	21,4 $\pm 2,6$	31,6 $\pm 2,3$	14,6 $\pm 3,0$	5,4 $\pm 2,6$	5,0 $\pm 2,8$	150 $\pm 17$
		Wrh aerob	11,4 $\pm 3,4$	10,5 $\pm 1,6$	18,7 $\pm 1,3$	33,9 $\pm 3,5$	14,7 $\pm 1,5$	7,8 $\pm 1,5$	2,9 $\pm 0,3$	180 $\pm 36$
		KUP anaerob	3,7 $\pm 0,1$	7,4 $\pm 1,8$	11,4 $\pm 6,6$	68,5 $\pm 4,3$	7,0 $\pm 1,6$	1,8 $\pm 0,9$	0,3 $\pm 0,5$	171 $\pm 35$
		KUP aerob	5,3 $\pm 0,4$	9,2 $\pm 0,7$	42,0 $\pm 1,8$	36,1 $\pm 2,2$	4,9 $\pm 1,3$	2,3 $\pm 0,4$	0,1 $\pm 0,3$	109 $\pm 21$

Zwischen Ein- und Auslagerung kam es nur unwesentlich zu Veränderungen der Partikelform (Tabelle 27). Tendenziell nahm der Feinanteil der Waldrestholzhackschnitzel

weiter zu, was auf den gleichen Effekt wie bei der Einlagerung zurückgeführt werden könnte (Abbrechen von Nadeln).

Auffällig waren vor allem die anaerob gelagerten KUP-Hackschnitzel nach der Lagerung. Sie zeigten eine deutliche Verschiebung der Massen aus der Partikelfraktion 8 bis 16 mm hin zu der Partikelfraktion 16 bis 31,5 mm. Dieser Effekt konnte weder bei den Waldrestholzhackschnitzeln noch bei den aerob gelagerten KUP-Hackschnitzeln beobachtet werden. Vor allem in den anaerob gelagerten KUP-Behältern bildeten sich trotz Luftabschlusses teilweise deutliche Myzelien an der Oberfläche der Schüttung (Abbildung 49). Hierdurch kam es zur Verklumpung einzelner Partikel, die sich unter mechanischer Bewegung schnell wieder auflösen ließen. Allerdings könnten solche Verklumpungen die Verschiebung in den Sieblinien erklären.



*Abbildung 49: Deutliche Myzelienbildung auf der Oberfläche der KUP-Hackschnitzel in einem anaerob gelagerten Behälter beim Abbau in Versuchsreihe B*

Bei der Behälterlagerung kam es analog zu Versuchsreihe A auch in Versuchsreihe B zu messbaren Trockenmasseverlusten (Abbildung 50). Diese lagen bei den anaerob gelagerten Brennstoffen deutlich niedriger als bei der jeweiligen aeroben Variante. Die höchsten Trockenmasseverluste zeigten die aerob gelagerten KUP-Hackschnitzel mit einem Mittelwert von  $11,3 \pm 1,3$  m-%. Eine höhere Zersetzungsrate von KUP-Brennstoffen im Vergleich zu Waldhackschnitzeln ist dabei zu erwarten gewesen und lässt sich vornehmlich auf den hohen Wassergehalt bei der Einlagerung, die weiche Holzstruktur der Pappel und ihre i. d. R. stärker zerfaserte Oberfläche zurückführen [77].

Die Trockenmasseverluste der aerob gelagerten Waldrestholzhackschnitzel waren deutlich niedriger als die der aerob gelagerten Variante in Versuchsreihe A. Obwohl unter-

schiedliche Lagerungsbedingungen zwischen den Betrachtungsjahren vorherrschten, lässt sich dies vermutlich v. a. auf die gröbere Partikelgrößenverteilung der Holzhackschnitzel zu Beginn der Lagerung zurückführen, wodurch eine geringere Oberfläche für den mikrobiellen Abbau zur Verfügung stand. Ebenso war der Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel zu Beginn von Versuchsreihe B bereits um 10 m-% niedriger als in Versuchsreihe A, wodurch es vermutlich zu einer schnelleren Trocknung und damit zu einer früheren Inaktivität der holzersetzenen Mikroorganismen kam.

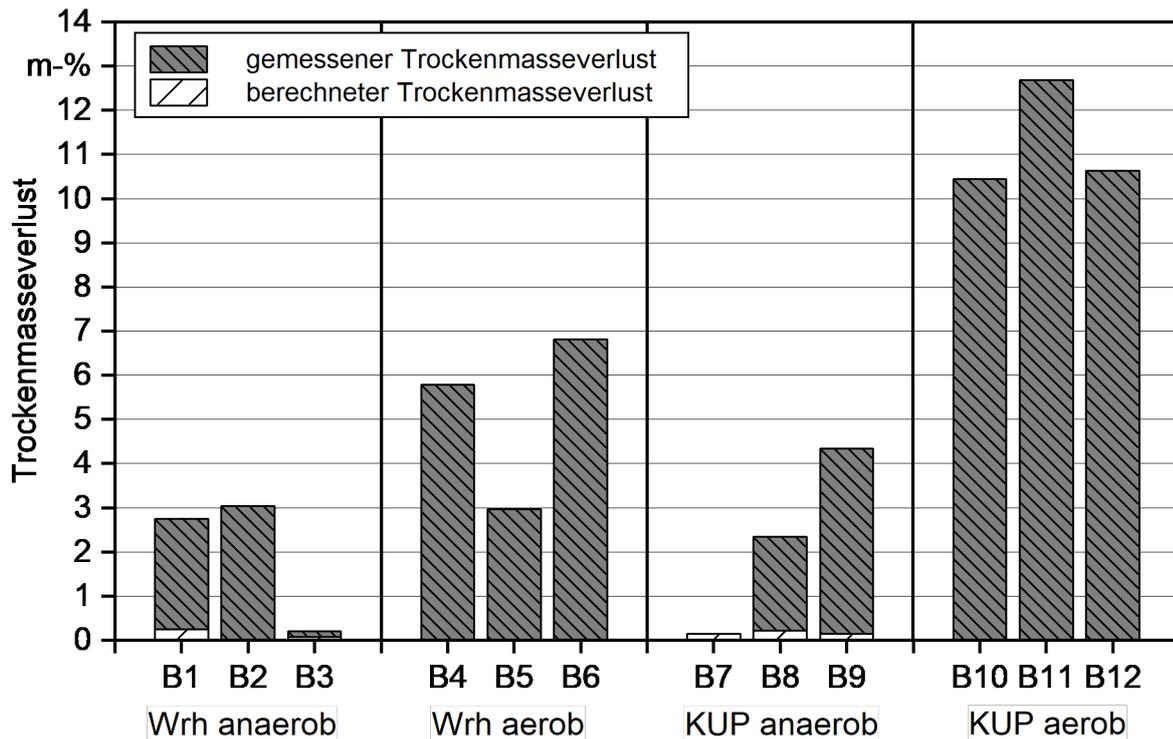


Abbildung 50: Gemessene und für die anaerobe Varianten berechnete Trockenmasseverluste bei der fünfmonatigen Behälterlagerung von KUP- und Wrh-Holzhackschnitzeln in Versuchsreihe B

Auffällig war vor allem, dass die Trockenmasseverluste der anaerob gelagerten Behälter hier deutlich höher waren als in Versuchsreihe A (Wrh:  $2,0 \pm 1,6$  m-%; KUP:  $2,2 \pm 2,2$  m-%). Zwar zeigte die optische Beurteilung bei der anaeroben Lagerung ein Pilzwachstum (Abbildung 49). Da sich jedoch die Gesamtmasse der anaeroben Behälter während der Lagerung nicht veränderte (Abbildung 46), sind hohe Trockenmasseverluste als unrealistisch einzuordnen. Der Grund, weshalb hier nicht ebenfalls die erwarteten Werte nahe Null gemessen wurden, ist vermutlich in der Genauigkeit der Wassergehaltsmessung zu suchen. Eine Unsicherheit bei der Messung des Wassergehalts von 1 m-% kann zu Schwankung im Trockenmasseverlust von 2 m-% führen. Die Standardabweichung der Wassergehaltsbestimmung bei den Behälterversuchen in Versuchsreihe B (vor und nach der Lagerung) lag trotz Homogenisierung i. d. R. zwischen 1 und 1,5 m-%. Hiermit lassen sich die gemessenen Trockenmasseverluste der anaerob gelagerten Holzhackschnitzel erklären. Verwendet man aufgrund der mangelnden Masse-

veränderung stattdessen den Wassergehalt der Einlagerung, ergeben sich nur minimale und damit zu Versuchsreihe A vergleichbare Trockenmasseverluste bei der anaeroben Lagerung (siehe „berechneter Trockenmasseverlust“ in Abbildung 50). Dieselbe Unsicherheit müsste allerdings auch auf die aerob gelagerten Holzhackschnitzel angewendet werden.

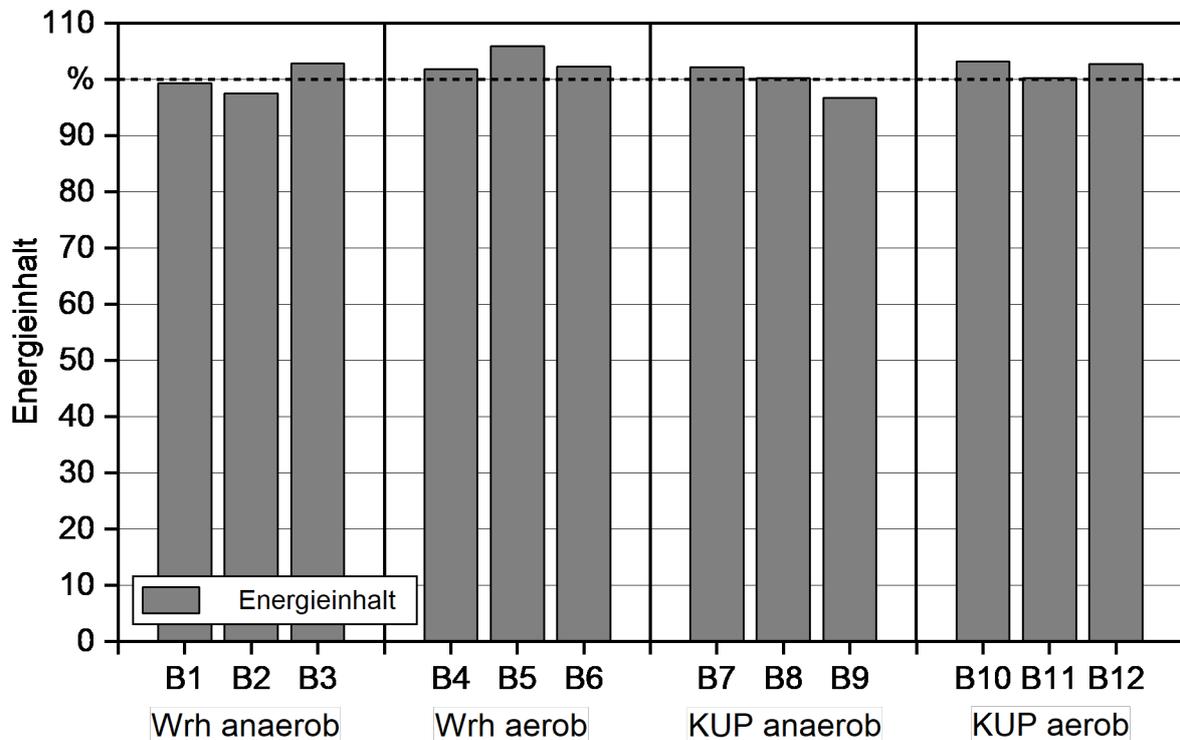


Abbildung 51: Energieinhaltsveränderung über die Lagerdauer in Bezug auf den Ausgangsenergieinhalt bei der fünfmonatigen Behälterlagerung von KUP- und Wrh-Holzhackschnitzeln in Versuchsreihe B

Der Energieinhalt nach der Lagerung konnte durch die anaerobe Lagerung nahezu erhalten bleiben. Im Fall der aerob gelagerten Behälter kam es aufgrund der starken Trocknung sogar zu einem Energiegewinn (Abbildung 51). Ein Energiegewinn wurde auch bei der Lagerung in abgedeckten Holzhackschnitzelhäufwerken beobachtet (vgl. Kapitel 6 und [60]).

#### 7.4.2.3 Gasentwicklung in den anaerob gelagerten Behältern

In allen anaerob gelagerten Behältern kam es ab dem Zeitpunkt der Einlagerung bis einschließlich Tag 15 der Lagerung zu einer messbaren Gasentwicklung. Insgesamt wurde im Mittel ein Gasvolumen von 104 l für die Behälter mit Waldrestholzholzhackschnitzeln und 170 l für die Behälter mit KUP-Hackschnitzeln gemessen (Tabelle 28).

**Tabelle 28:** *Mittlere Gasentwicklung ( $\pm$  Standardabweichung) in den anaerob gelagerten Behältern in Versuchsreihe B*

Sortiment	Tag nach der Einlagerung	Gasvolumen in l	CH <sub>4</sub> in ppm	CxHy in ppm	CO <sub>2</sub> in Vol.-%	O <sub>2</sub> in Vol.-%	CO in mg m <sup>-3</sup>	N <sub>2</sub> O in mg m <sup>-3</sup>
Wrh	7	63,2 $\pm$ 9,8	6,1 $\pm$ 0,7	73,3 $\pm$ 43,2	20,3 $\pm$ 1,9	0,9 $\pm$ 0,5	186,3 $\pm$ 4,9	10,0 $\pm$ 1,7
	15	40,5 $\pm$ 4,6	7,4 $\pm$ 0,5	66,7 $\pm$ 22,8	23,4 $\pm$ 2,7	1,2 $\pm$ 0,6	209,0 $\pm$ 3,6	11,7 $\pm$ 1,5
KUP	2	56,4 $\pm$ 3,3	0,7 $\pm$ 0,1	28,9 $\pm$ 4,6	21,5 $\pm$ 1,0	0,4 $\pm$ 0,0	138,0 $\pm$ 5,3	10,0 $\pm$ 0,0
	7	65,0 $\pm$ 3,5	1,9 $\pm$ 0,1	35,3 $\pm$ 2,5	24,2 $\pm$ 0,1	1,4 $\pm$ 0,3	108,3 $\pm$ 2,5	11,0 $\pm$ 0,0
	15	48,4 $\pm$ 6,0	2,3 $\pm$ 0,2	35,7 $\pm$ 5,9	28,0 $\pm$ 0,7	1,5 $\pm$ 0,2	55,9 $\pm$ 4,3	13,0 $\pm$ 1,0

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Behältern lagen analog der Versuchsreihe A deutlich über den Werten der Außenluft (0,4 Vol.-%, [109]) während O<sub>2</sub> stark reduziert war (Außenluft: 21 Vol.-%).

Im Fall der Konzentrationen an Methan wurden in Versuchsreihe B deutlich niedrigere Werte als in Versuchsreihe A gemessen. Dort lag der Messwert bei der nicht mit Stickstoff gespülten Variante bei ca. 212 ppm (vgl. Abbildung 36). Im Vergleich dazu waren die Konzentrationen in Versuchsreihe B mit 0,7 bis 7,4 ppm minimal (Tabelle 28). Sie entsprachen damit den typischen CH<sub>4</sub>-Werten in der Atmosphäre (ca. 1,9 ppm [109]). Die großen Unterschiede zwischen Versuchsreihe A und B sind auf die Verwendung unterschiedlicher Messgeräte zurückzuführen, wobei in Versuchsreihe A ein für Verbrennungsversuche optimiertes FTIR verwendet wurde und die CH<sub>4</sub>-Messwerte aus Abschnitt 7.3.2 daher hinterfragt werden müssen.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe B deuten im Gegensatz zu denen der Versuchsreihe A auf eine deutlich niedrigere Relevanz von Treibhausgasen bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln hin. Bezüglich der CH<sub>4</sub>-Emissionen konnten die Analysen in Versuchsreihe A und B allerdings keine eindeutigen Ergebnisse liefern, weshalb hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

#### 7.4.2.4 Lagerung in abgedichteten Betonsilos

Bei der Lagerung der beiden Brennstoffchargen in kleinen Betonsilos kam es über die Lagerdauer von fünf Monaten ebenfalls zu einem Temperaturanstieg in der Schüttung (Abbildung 52). Dabei lagen die Silos mit Waldrestholzhackschnitzeln im Mittel um 6,8  $\pm$  3,5 °C, die Silos aus KUP-Hackschnitzeln um 9,8  $\pm$  2,6 °C über der Außentemperatur. Die Temperaturdifferenz deutet an, dass in den Silos mikrobielle Aktivität stattgefunden hat. Als Folge kann mit Trockenmasseverlusten während der Lagerung gerechnet werden, obwohl das Versuchsdesign eine anaerobe Lagerung und damit eine Minimierung von Trockenmasseverlusten realisieren sollte.

Während die Temperaturdifferenz zur Außenluft bei den KUP-Silos über die gesamte Lagerdauer nahezu gleich blieb, zeigten die mit Waldrestholzhackschnitzeln befüllten

Silos eine starke Abnahme der Temperatur ab Juli 2019 (Abbildung 52, Tabelle 29). Dies deutet auf eine Verringerung der mikrobiellen Aktivität in den Waldrestholzsilos nach den ersten Lagermonaten hin, wohingegen sich die Umsatzraten im Fall der KUP-Silos über den gesamten Lagerzeitraum hinweg nicht zu verändern schienen.

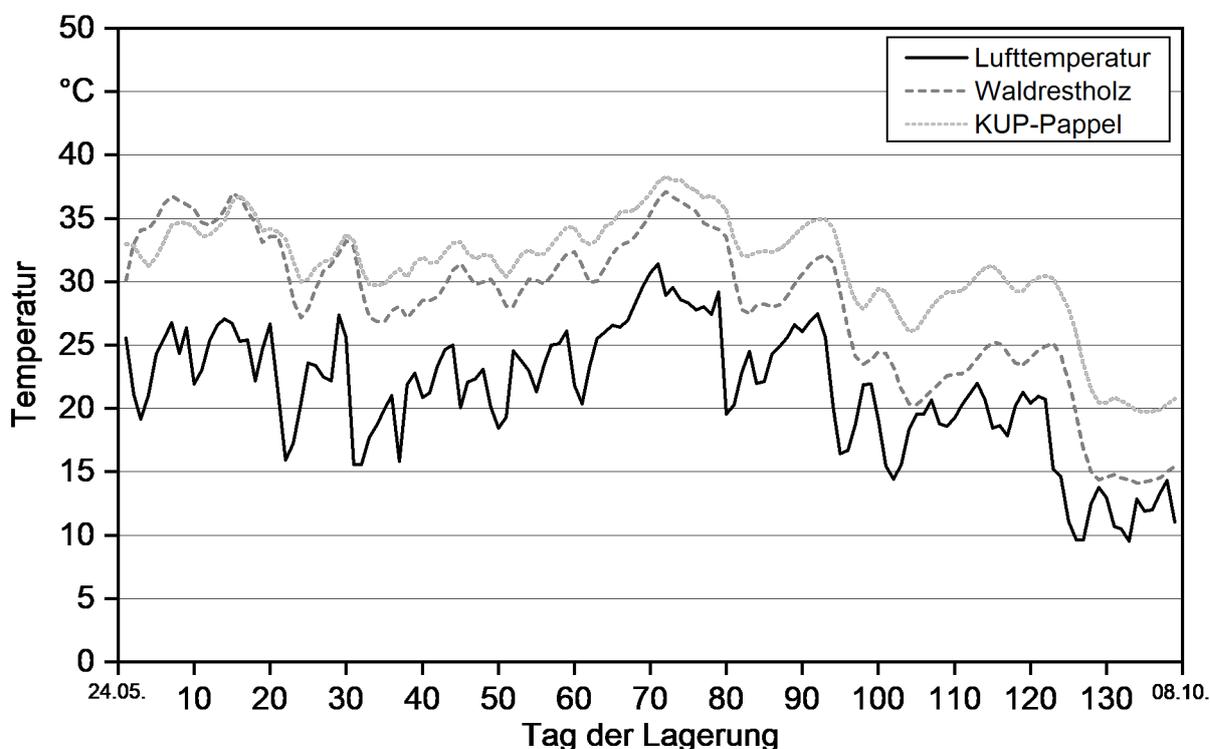


Abbildung 52: Mittlerer Temperaturverlauf in den Holzhackschnitzelsilos aus Versuchsreihe B

Die Silos standen auf einer sonnenexponierten Freifläche (vgl. Abbildung 42, rechts). Folglich könnte der Temperaturunterschied zur Außenluft teilweise auch auf die Erwärmung der Silos durch Sonneneinstrahlung zurückzuführen sein. Die verwendete Silofolie sollte allerdings aufgrund ihrer hellen Farbe größere Anteile der Sonnenstrahlung reflektiert haben.

Tabelle 29: Mittlere Temperaturdifferenz der Temperatur in °C (± Standardabweichung) innerhalb der abgedichteten Silos im Vergleich zur Außentemperatur in Versuchsreihe B pro Monat

Sortiment	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
Wrh	10,8 ± 2,9	9,4 ± 3,2	6,9 ± 2,1	6,3 ± 3,0	4,5 ± 3,0	2,6 ± 1,6
KUP	9,3 ± 2,0	10,6 ± 3,1	9,3 ± 1,9	9,6 ± 2,7	10,5 ± 2,8	8,2 ± 1,8

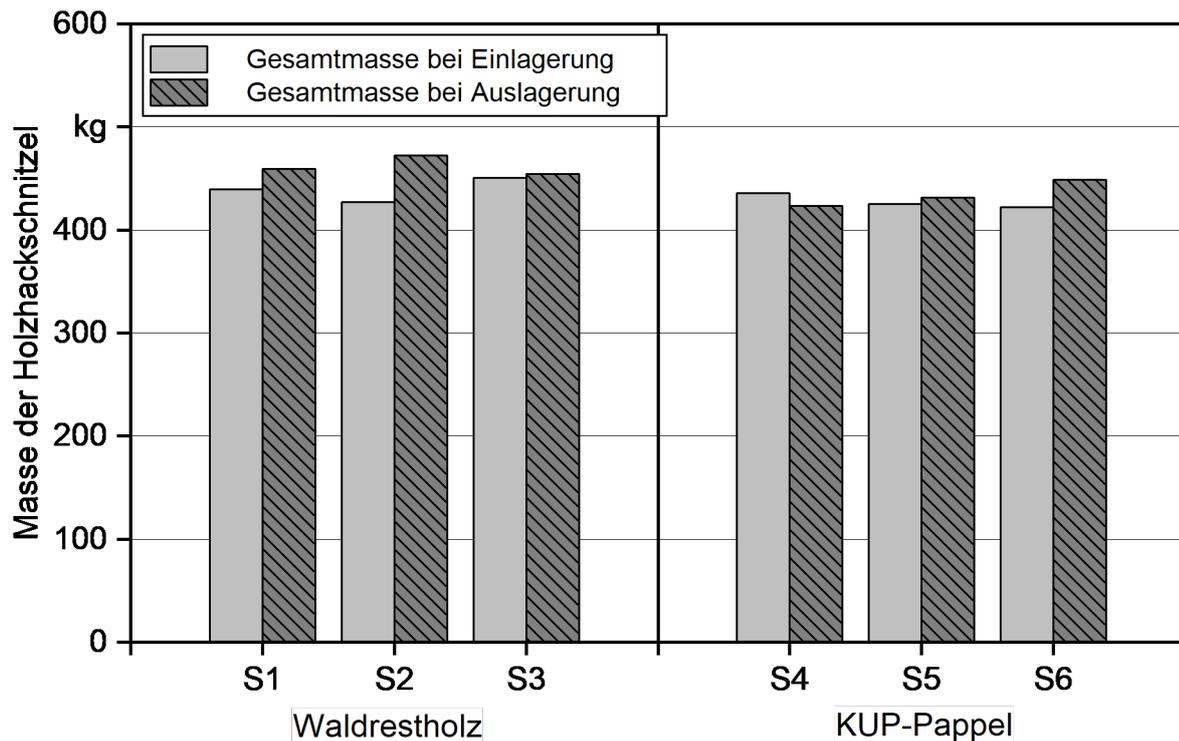


Abbildung 53: Gesamtmasse der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung

Trotz deutlicher Hinweise auf eine erhöhte mikrobielle Aktivität (Temperaturerhöhung, Sichtbarkeit von Pilzmyzelien, siehe Abbildung 56 weiter unten) und somit Trockenmasseverluste während der Lagerung nahm die Gesamtmasse der Holzhackschnitzel in fünf von sechs Silos über die gesamte Lagerdauer hin zu (Abbildung 53). Die Massezunahme lag zwischen 3,4 kg (S3) und 45,4 kg (S2). Lediglich für Silo S4 (KUP) konnte eine Masseabnahme von 12,4 kg gemessen werden. Eine mögliche Ursache für diesen Effekt ist vor allem in einer Änderung des Wassergehalts zu vermuten (Abbildung 54), da eine Zunahme der Trockenmasse über den Lagerzeitraum ausgeschlossen werden kann.

Tatsächlich war der mittlere Wassergehalt aller Silos bei Auslagerung jeweils signifikant höher als bei Einlagerung (t-Test:  $p \leq 0,05$ , Abbildung 54). Dabei wurde ein Anstieg im Wassergehalt um 4,2 m-% (Silo S3) bis 10,4 m-% (Silo S6) gemessen. Die Holzhackschnitzel jedes Silos wurden bei Auslagerung umfassend homogenisiert und die Wassergehaltsproben repräsentativ nach DIN EN ISO 18135 [36] genommen. Daher kann dieser Anstieg nur durch eine externe Zuführung von Wasser in die Schüttungen und nicht durch eine nicht repräsentative Probenahme erklärt werden. Voraussichtlich kam es durch Niederschlag zu einem Eintrag von Wasser an den Rändern der Silos. Trotz der Verwendung von Silofolie inklusive einer Abdichtung mittels Sandsäcken und trotz einer Ausrichtung der Silos mit einem Gefälle (5 cm auf 2 m) konnte offenbar ein Feuchteintrag nicht vermieden werden.

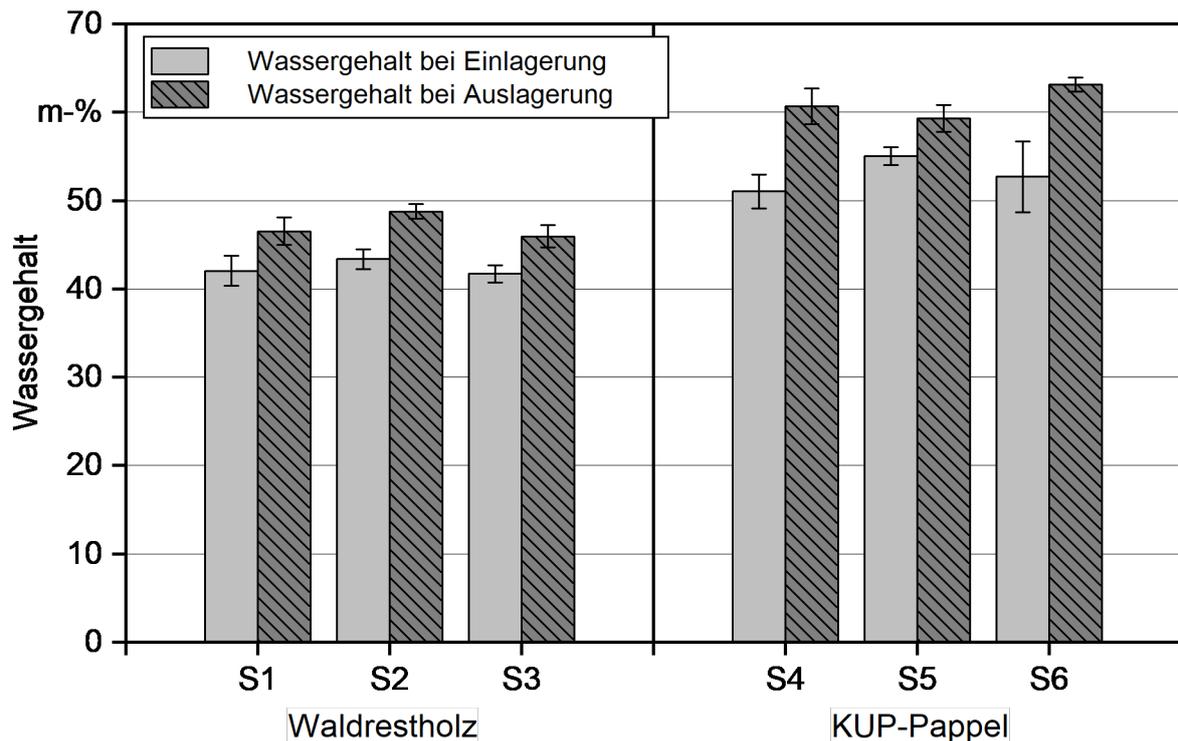


Abbildung 54: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$  Standardabweichung) der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B vor und nach der fünfmonatigen Lagerung

Die gemessene Wassergehaltsänderung (Abbildung 54) kann allerdings nicht als alleinige Ursache für die Änderung der Gesamtmasse angesehen werden (Abbildung 53). Letzteres hätte hierdurch rechnerisch auf bis zu 540 kg ansteigen müssen (Silos S4 und S6). Folglich kam es während der Lagerung zu Trockenmasseverlusten von 9 bis 47 kg (absolut). Die prozentualen Trockenmasseverluste beliefen sich somit auf 3,5 m-% (Silo 1) bis hin zu 22 m-% (Silo S4) (Abbildung 55). Die Änderung im Energieinhalt nach der Lagerung rangierte von  $-2,8$  bis  $-26,1\%$ .

Silo S2 stellt einen Sonderfall dar, da hier die Masseänderung allein durch die Änderung des Wassergehalts erklärt werden könnte. Rechnerisch lagen die prozentualen Trockenmasseverluste bei Silo S2 sogar bei  $-0,8\%$ . Dies ist allerdings als unwahrscheinlich zu bewerten, da die Temperaturverläufe von Silo 2 mit einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von bis zu  $15\text{ °C}$  zur Außenluft während der ersten drei Lagerungswochen deutliche Anzeichen auf mikrobielle Aktivität zeigten. Folglich müssen bei der Betrachtung der Trockenmasseverluste erneut die Schwankungen der Wassergehaltsmessungen beachtet werden. Die Standardabweichung der Werte lag bei Auslagerung zwischen 0,8 und 2,0 m-% wodurch sich eine Unsicherheit in den Werten zum Trockenmasseverlust von 1,6 bis 4 m-% ergibt.

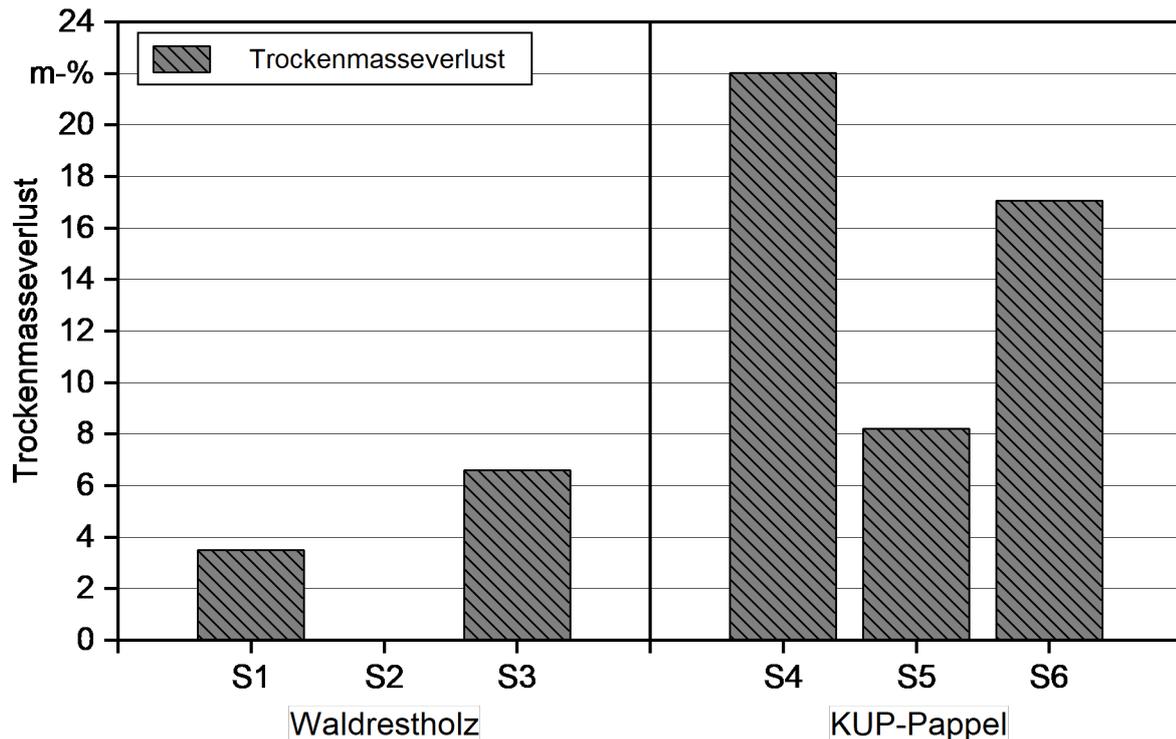


Abbildung 55: Trockenmasseverlust der in abgedichteten Silos gelagerten Holzhackschnitzel aus Versuchsreihe B nach fünf Monaten Lagerung



Abbildung 56: Optische Beispiele für das Wachstum von Pilzen beim Abbau der Lager-silos in Versuchsreihe B

Insgesamt zeigte sich, dass eine anaerobe Lagerung mit einem vollständigen Luftabschluss in kleinen Betonsilos nicht möglich war und somit zu Trockenmasseverlusten geführt hat. Vor allem bei den KUP-Brennstoffen lagen die Trockenmasseverluste mit bis zu 22 m-% (entspricht monatlich 4,4 m-%) sogar in dem Bereich, der für dieses Sortiment als maximal angegeben und regelmäßig für größere Lagermieten berichtet wird. Aufgrund der mangelnden Trocknung (und stellenweise deutlichen Wassergehaltszunahme) kam es zu erheblichen Verlusten im Energieinhalt. Auch optisch ließen sich bei Auslagerung der Brennstoffe deutliche Zersetzungsspuren in Form von Pilzmyzelien und Fruchtkörpern feststellen (Abbildung 56). Dies zeigt die erheblichen Risiken, die mit dieser Lagervariante verbunden sind, denn eine unsachgemäße oder gestörte Lagerung

könnte in der Praxis die Trockenmasseverluste möglicherweise sogar noch erhöhen, weil sie eine Abtrocknung verhindert.

Der mittlere Aschegehalt der Holzhackschnitzel aus den Silos war nach fünfmonatiger Lagerung auf dem gleichen Niveau wie das Ausgangsmaterial bei Anlieferung bzw. leicht – allerdings nicht signifikant – erhöht (Tabelle 20, Tabelle 26). Eine Zunahme im Aschegehalt könnte sich über eine Abnahme der Trockenmasse erklären lassen. Allerdings kam es bei der Lagerung in den Silos zu keinem nennenswerten Effekt zwischen den beiden Parametern.

*Tabelle 30: Mittlere Brennstoffqualität (Aschegehalte, Heizwerte und Schüttdichte ( $\pm$  Standardabweichung) der Holzhackschnitzel nach der Lagerung in abgedichteten Silos in Versuchsreihe B (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand)*

Sortiment	Silo	Aschegehalt in m-% (wf)	Heizwert in MJ kg <sup>-1</sup> (wf)	Schüttdichte in kg m <sup>-3</sup> (ar)
Wrh	S1	1,8 $\pm$ 0,5	19,54	313 $\pm$ 6
	S2	2,4 $\pm$ 0,9	19,30	343 $\pm$ 6
	S3	1,9 $\pm$ 0,2	19,54	333 $\pm$ 6
KUP	S4	3,3 $\pm$ 0,1	18,46	303 $\pm$ 15
	S5	3,5 $\pm$ 0,1	18,56	300 $\pm$ 10
	S6	3,8 $\pm$ 0,5	19,11	327 $\pm$ 6

Auch hinsichtlich des Heizwerts konnte erneut eine geringe, jedoch signifikante Zunahme nach der Lagerung festgestellt werden (vgl. Behälterversuche). Im Gegensatz dazu war die Schüttdichte (im Anlieferungszustand) teils deutlich erhöht, was sich vor allem auf die Zunahme des Wassergehalts zurückführen lässt (Tabelle 30).

**Tabelle 31:** *Mittlere Partikelgrößenverteilung der Holzhackschnitzel ( $\pm$  Standardabweichung) vor und nach der Lagerung in abgedichteten Silos in Versuchsreihe B*

Zeitpunkt	HS	0 bis 3,15 mm in m-%	3,15 bis 8 mm in m-%	8 bis 16 mm in m-%	16 bis 31,5 mm in m-%	31,5 bis 45 mm in m-%	45 bis 63 mm in m-%	größer 63 mm in m-%	Max. Länge in mm
Beginn	Wrh	9,6 $\pm 0,2$	8,8 $\pm 1,0$	14,2 $\pm 3,1$	38,2 $\pm 6,5$	15,7 $\pm 2,4$	7,1 $\pm 0,7$	6,4 $\pm 4,6$	189 $\pm 44$
	KUP	3,4 $\pm 0,9$	11,2 $\pm 1,1$	48,9 $\pm 1,8$	31,3 $\pm 3,6$	3,9 $\pm 1,2$	0,7 $\pm 1,0$	0,6 $\pm 1,0$	106 $\pm 19$
Ende	Wrh	6,8 $\pm 1,8$	7,1 $\pm 1,2$	16,6 $\pm 1,5$	35,1 $\pm 0,6$	18,6 $\pm 1,3$	9,3 $\pm 1,7$	6,4 $\pm 2,9$	151 $\pm 7$
	KUP	3,9 $\pm 1,1$	9,3 $\pm 0,6$	14,5 $\pm 13,2$	64,0 $\pm 16,5$	6,2 $\pm 1,8$	2,0 $\pm 0,5$	0,1 $\pm 0,2$	121 $\pm 2$



**Abbildung 57:** *Deutliche Verklumpung der Partikel durch das Wachstum von Pilzmyzelien beim Abbau der Silos in Versuchsreihe B*

Bezüglich der Partikelgrößenverteilung zeigten sich keine größeren Veränderungen über die Dauer der Silolagerung (Tabelle 31), die nicht auch schon bei der Lagerung in den Behältern beobachtet worden waren. Analog zur Behälterlagerung war der Feinanteil im Vergleich zum Ausgangsmaterial leicht erhöht, vermutlich durch zusätzliche Bewegung der Brennstoffe bei der Einlagerung. Weiterhin kam es in den KUP-Hackschnitzeln über die Dauer der Lagerung erneut zu einer Verschiebung der Massen in den Fraktionen 8–

16 mm hin zu 16–31,5 mm. Wie bereits bei der anaeroben Lagerung der KUP-Brennstoffe in Behältern diskutiert könnte dieser Effekt auf eine Verklumpung der kleineren Partikel aufgrund des Wachstums von Pilzmyzelien zurückzuführen sein (Abbildung 57). Auch im Fall der Silo-Versuche konnten gebildete Klumpen mechanisch leicht wieder aufgelöst werden.

Insgesamt lässt sich die Lagerung in kleinen Fahrsilos, wie sie in Versuchsreihe B durchgeführt wurde, nicht empfehlen. Vor allem KUP-Hackschnitzel zeigten hohe Trockenmasseverluste. Im Gegensatz dazu lagen die Verluste der Holzhackschnitzel aus Waldrestholz auf einem geringfügig niedrigeren Niveau, als für dieses Sortiment in der Literatur angegeben wird. Neben hohen Trockenmasseverlusten kam es durch Pilzwachstum teils zu einer Verschlechterung der Brennstoffqualität (siehe Partikelgrößenverteilung). Inwieweit sich die Lagerung in Silos negativ auf das Fließ- und Verbrennungsverhalten der Brennstoffe auswirkt, wird in Kapitel 12 separat dargestellt.

#### 7.4.2.5 Mietenlagerung

Erwartungsgemäß stieg die Temperatur innerhalb der kleinen Lagermiete (ca. 12 Srm) direkt nach Einlagerung stark an (Abbildung 58). Die Mietentemperatur war im ersten Monat der Lagerung vor allem an der oberen Temperaturfühlerposition (1,0 m) erhöht. Mit zunehmender Lagerdauer glichen sich die Temperaturen innerhalb der Miete an die Temperatur der Außenluft an. Somit folgt die Temperatur innerhalb der Miete einem typischen Verlauf für Waldrestholz, wie er bereits in früheren Studien sowie bei der Lagerung des gleichen Materials in Behältern oder Silos beobachtet wurde (Abbildung 45, Abbildung 52). Die Daten deuten demnach ebenfalls auf eine abnehmende mikrobielle Aktivität während des Lagerungsverlaufs hin, beispielsweise aufgrund eines sich ändernden Nährstoffangebots oder einer voranschreitenden Trocknung.

Während der Lagerung kam es in der Miete zu einer starken Trocknung der Waldrestholzhackschnitzel von 42,3 auf 17,3 m-% (Abbildung 59). Es zeigte sich kein Gradient hinsichtlich der Bilanzbeutelposition. Der Wassergehalt nach der Lagerung entsprach somit Werten, die knapp über den bei der Behälterlagerung erreichten Wassergehalten lagen (Abbildung 47). Die Holzhackschnitzel wären bezüglich ihres Wassergehalts nach der Lagerung für die Verwendung in kleinen Holzhackschnitzelkesseln geeignet gewesen.

Die Trockenmasseverluste lagen mit durchschnittlich 8 m-% (Abbildung 60) in einem Bereich, der für die fünfmonatige Lagerung von Holzhackschnitzeln aus Waldrestholz auch in größeren Lagermieten gemessen wurde (vgl. Kapitel 6 [60]). Sie waren damit höher als die Messwerte bei der Lagerung in abgedichteten Silos oder bei der aeroben Lagerung in Behältern. Somit deuten die Ergebnisse ebenfalls auf einen leicht positiven Effekt der Silolagerung von Waldrestholz bezüglich der Trockenmasseverluste hin. Bei der Lagerung in Behältern könnten die niedrigeren Trockenmasseverluste dagegen durch eine schnellere Trocknung aufgrund des niedrigeren Chargenvolumens zurückzuführen sein.

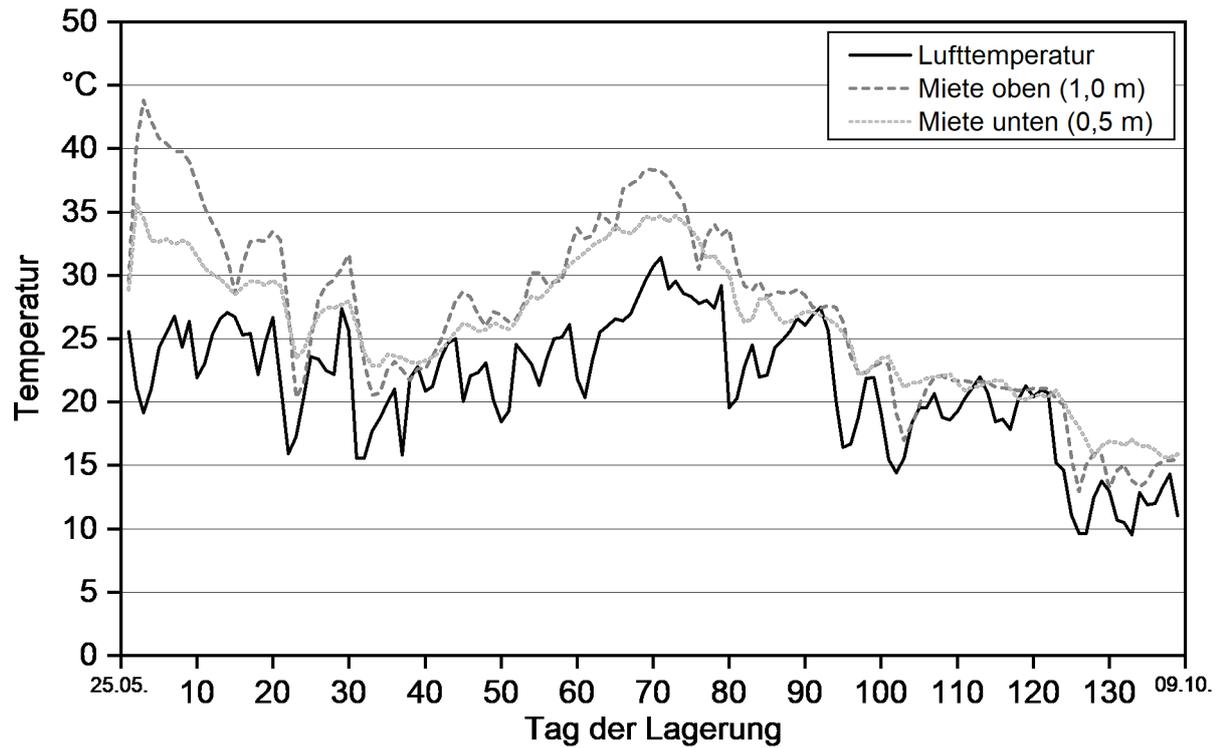


Abbildung 58: Mittlerer Temperaturverlauf in der Holzhackschnitzelmiete aus Versuchsreihe B

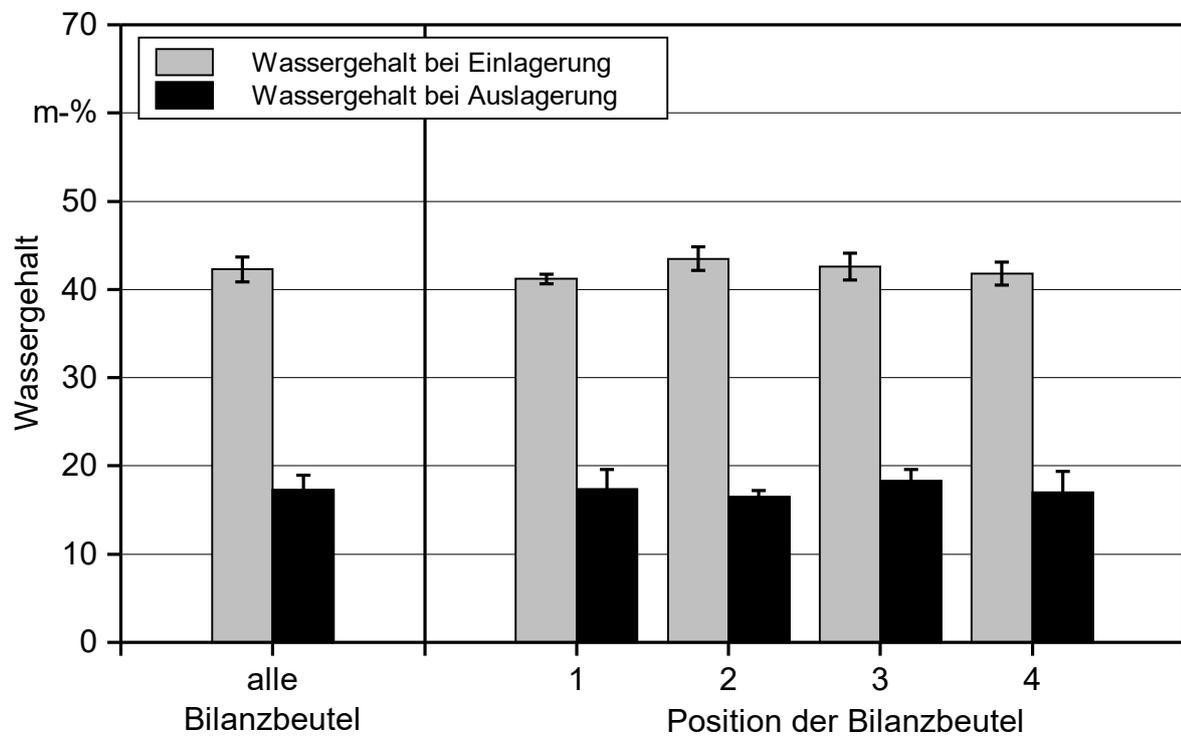


Abbildung 59: Mittlerer Wassergehalt ( $\pm$  Standardabweichung) in den Bilanzbeuteln vor und nach der fünfmonatigen Lagerung in der Holzhackschnitzelmiete aus Versuchsreihe B

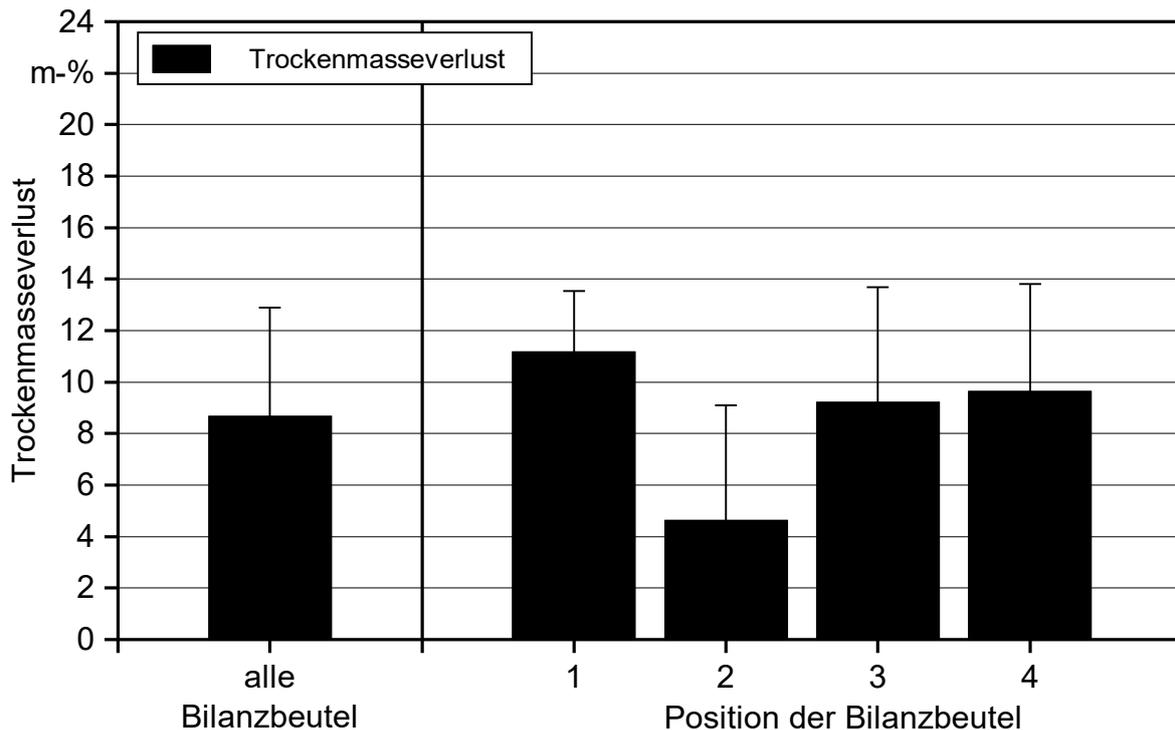


Abbildung 60: Mittlerer Trockenmasseverlust ( $\pm$  Standardabweichung) in den Bilanzbeuteln nach der fünfmonatigen Lagerung in der Holzhackschnitzelmietaus Versuchsreihe B

Der Energieinhalt der Mieta nach Ende der Lagerung lag bei 106,3 % verglichen mit dem Zeitpunkt der Einlagerung. Aufgrund der starken Trocknung konnten die Trockenmasseverluste in der kleinen Lagermieta kompensiert werden. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich bei den Behälterversuchen (Abschnitt 7.4.2.2) wie auch bei Freilandversuchen mit abgedeckten Holzhackschnitzelmieta (vgl. Kapitel 6 [60]).

Aufgrund der hohen Schwankungen im Wassergehalt zwischen den Bilanzbeuteln konnte kein signifikanter Effekt bezüglich der Beutelposition identifiziert werden. Tendenziell zeigten die Beutel an Position 1 allerdings die höchsten Messwerte (Abbildung 60). Erkenntnisse aus früheren Projekten zeigten, dass die oberste Schicht in Holzhackschnitzelmieta meistens die Schicht mit den höchsten Wassergehalten ist, da dort der Wassergehalt aufgrund von Kondensationsprozessen länger auf einem hohen Niveau bleibt. Dieser Effekt trat auch bei Mieta auf, die mit einem Vlies abgedeckt waren und bei denen es kaum zur Wiederbefeuchtung durch Niederschlag kommen sollte. Somit lagen auch die Holzhackschnitzel in der hier dargestellten Studie vermutlich für einen längeren Zeitraum in einem für holzzeretzende Mikroorganismen optimalen Wasserbereich, wohingegen es bei den anderen Bilanzbeutelpositionen wahrscheinlich früher zu einem Erliegen des Trockenmasseabbaus durch Trocknung der Brennstoffe kam.

Der mittlere Aschegehalt der Holzhackschnitzel aus der Mieta lag bei  $2,5 \pm 0,3$  m-% und damit deutlich höher als das Ausgangsmaterial bei der Einlagerung ( $1,5 \pm 0,2$  m-%). Höhere Aschegehalte könnten sich teilweise durch Trockenmasseabbau während der Lage-

rung erklären lassen. Ein solch starker Effekt konnte allerdings weder bei der Behälterlagerung noch bei der Lagerung des Waldrestholzes in den abgedichteten Silos beobachtet werden. Eine mögliche Ursache könnte in der Brennstoffqualität der eingelagerten Holzhackschnitzel liegen. Die Versuchsmiete wurde mit dem verbliebenen Ausgangsmaterial errichtet, das nach Befüllung der Behälter und der abgedichteten Silos sowie nach Abtrennung der zusätzlichen Teilproben für die Arbeitspakete 9 und 12 übrig geblieben war. Dabei könnte es trotz Homogenisierung des Ausgangsmaterials vor Versuchsbeginn durch die Probenentnahme zu einer Entmischung gekommen sein, wobei ein größerer Anteil feinerer Partikel (Rinde, Nadeln, mineralische Verschmutzungen) in der 12 Srm großen Charge verblieben ist (vgl. auch Ergebnisse zur Partikelgrößenverteilung).

Bei der Auswahl der Bilanzbeutel für den Aschegehalt wurde darauf geachtet, dass zumindest ein kompletter Mietenquerschnitt (Beutelpositionen 1 bis 4 des mittleren Mietenquerschnitts, vgl. Abbildung 43) sowie die Beutelpositionen 3 der jeweiligen anderen Querschnitte verwendet wurden. Bezüglich weder der Position der Beutel noch der in den jeweiligen Beuteln gemessenen Trockenmasseverluste oder Wassergehaltsänderungen konnte ein Trend hinsichtlich des Aschegehalts festgestellt werden.

Bezüglich des Heizwerts wurde auch bei der Mietenlagerung eine leichte, aber signifikante Zunahme gegenüber dem Ausgangsmaterial bei Einlagerung festgestellt. Der mittlere Heizwert der Bilanzbeutelproben lag bei  $19,5 \pm 0,1 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Dieser Trend zeigt sich über alle Lagervarianten. Er könnte in einem selektiven Abbau von Holzsubstanzen mit einem niedrigen Heizwert, beispielsweise Zellulose und Hemizellulose, gegenüber einem geringeren Abbau von Lignin bedingt sein. Ähnliche Effekte wurden bereits in vorangegangenen Projekten von LWF und TFZ beobachtet [60] (vgl. Kapitel 6). Insgesamt ist die Änderung im Heizwert jedoch als gering zu bewerten.

Die mittlere Schüttdichte (im Anlieferungszustand) lag bei  $210 \pm 10 \text{ kg m}^{-3}$  und damit auf dem Niveau der bereits bei den aerob gelagerten Behältern am Ende der Lagerung gemessenen Werte. Die Veränderung der Schüttdichte ist auch in diesem Fall vornehmlich durch die Veränderung des Wassergehalts zu erklären, wobei die Schüttdichte des Ausgangsmaterials ( $305 \text{ kg m}^{-3}$ ) bei einem Wassergehalt von 17,2 m-% rechnerisch bei  $218 \text{ kg m}^{-3}$  liegen würde und damit dem gemessenen Wert nach der Lagerung in der Miete sehr nahe kommt.

Die Partikelgrößenverteilung des in der Miete gelagerten Materials bestätigt eine geringe Entmischung des Materials zum Zeitpunkt der Einlagerung (Tabelle 32). Dabei nahmen die Anteile in den kleineren Partikelfractionen (0 bis 3,15 mm und 3,15 bis 8 mm) im Vergleich zu den Durchschnittswerten des Ausgangsmaterials zu. Da vor allem die feinen Partikelfractionen häufig aus Materialien mit einem im Vergleich zu reinem Holz hohen Aschegehalt bestehen (Rinde, Nadeln, mineralische Verschmutzungen), kann dies ggf. den beim Aschegehalt beobachteten Trend erklären. Allerdings war die Partikelgrößenverteilung des Materials, das nach der Lagerung beprobt wurde, nicht auffällig im Vergleich zum Ausgangsmaterial. Analog zur Lagerung im Behälter und im Silo kam es

somit auch bei der Lagerung in der Miete zu keiner nennenswerten Veränderung der Partikelgrößenverteilung.

**Tabelle 32:** *Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$  Standardabweichung) der Holzhackschnitzel aus Waldrestholz vor und nach der Lagerung in der Miete in Versuchsreihe B*

Zeitpunkt	0 bis 3,15 mm in m-%	3,15 bis 8 mm in m-%	8 bis 16 mm in m-%	16 bis 31,5 mm in m-%	31,5 bis 45 mm in m-%	45 bis 63 mm in m-%	> 63 mm in m-%	Max. Länge in mm
Vor der Lagerung	13,4 $\pm$ 2,2	11,0 $\pm$ 0,9	21,0 $\pm$ 1,6	32,4 $\pm$ 3,1	13,9 $\pm$ 4,5	5,0 $\pm$ 0,5	3,2 $\pm$ 3,7	182 $\pm$ 29
Nach der Lagerung	6,0 $\pm$ 0,9	7,1 $\pm$ 0,6	16,9 $\pm$ 1,6	35,9 $\pm$ 2,7	16,7 $\pm$ 2,5	10,6 $\pm$ 2,2	6,8 $\pm$ 2,7	162 $\pm$ 22

Insgesamt sind alle Ergebnisse zur Änderung in der Trockenmasse und der Brennstoffqualität bei der Mietenlagerung in einem typischen Wertebereich, der in der Literatur für die Lagerung von Waldrestholzhackschnitzeln in Mieten während der Sommermonate berichtet wurde (vgl. Kapitel 6 [60]). Die 12 Srm große Vergleichsmiete stellt somit eine passende Referenz zu der Lagerung in abgedichteten Silos und zu der Lagerung in Behältern dar.

## 7.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung zu den Konservierungsmethoden

Bei der Lagerung der Holzhackschnitzel mit **CaCO<sub>3</sub> als Kalk-Additiv** (Versuchsreihe A) kam es zu positiven Effekten auf den Trockenmasseabbau. Gleichzeitig änderte sich der Aschegehalt aufgrund der Additivzugabe. Während CaCO<sub>3</sub> die Lagerbedingungen der Brennstoffe aufgrund von Änderungen des pH-Werts verbessern konnte, könnte das Additiv bei der späteren Verbrennung erhöhte Staubemissionen verursachen, weil CaCO<sub>3</sub> die Freisetzung kaliumhaltiger Aerosole fördert. Dies hätte einen direkten Einfluss auf die potenzielle Verwendbarkeit des additivierten Brennstoffs in kleinen Feuerungsanlagen und setzt auch in größeren Anlagen eine Verwendung ausreichend leistungsstarker Abgasreinigungssysteme voraus. Darüber hinaus könnten die großen Mengen an CaCO<sub>3</sub>, die potenziell für eine Verbesserung der Lagerfähigkeit größerer Holzhackschnitzelschüttungen in der Praxis benötigt werden würden, eine technologische und finanzielle Herausforderung darstellen, vor allem wenn sie nicht durch eine anschließende Düngerversteigerung der Bettaschen gerechtfertigt werden kann. Lösungen zur homogenen Additivierung größerer Schüttungen müssten zunächst noch entwickelt werden. Eine CaCO<sub>3</sub>-Beimischung wäre durch Zugabe und anschließende Homogenisierung des Materials mit einem Radlader denkbar. Darüber hinaus könnte untersucht werden, ob eine Beimischung schon direkt im Prozessschritt Hacken erfolgen könnte. Hierdurch fallen jedoch

zusätzliche Kosten an. Somit ist die Implementierung von  $\text{CaCO}_3$ -Additivierung in die übliche Lagerungspraxis fraglich.

Vielversprechender für die einfache Umsetzung in die Praxis ist die **anaerobe Lagerung**. Diese könnte nach den Ergebnissen der Behälterlagerung in den Versuchsreihen A und B eine geeignete Methode zur Minimierung von Trockenmasseverlusten darstellen. Voraussetzung hierfür ist ein vollständiger Luftabschluss, wie er beispielsweise bei einer Behälterlagerung erzielt werden kann. Dann treten auch keine nennenswerten Änderungen in der Brennstoffqualität und im Energiegehalt auf.

Wenn allerdings die anaerobe Lagerung in Fahrsilos organisiert werden soll, besteht das in den Versuchen gezeigte, zum Teil erhebliche Risiko, dass unsachgemäße oder gestörte Lagerungsbedingungen die Trockenmasseverluste in der Praxis möglicherweise sogar noch erhöhen, denn die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Umsetzung eines Luftabschlusses bei der Silolagerung von Holzhackschnitzeln eine Herausforderung darstellt. Für den Praxisfall ist somit bei einer anaeroben Lagerung in Fahrsilos noch stärker auf eine gute Abdichtung zu achten. Je größer das Lagervolumen zur Randfläche ist, desto leichter sollte ein umfassender Luftabschluss erzielbar sein. Die dargestellten Versuche in „Mini-Fahrsilos“ sind somit als Worst Case einzuordnen.

In Versuchsreihe A wurden bei der Behälterlagerung sehr hohe  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen gemessen. Diese als bedenklich einzuordnenden Konzentrationen konnten allerdings in Versuchsreihe B nicht reproduziert werden und deuten auf ein unpassendes Messgerät in Versuchsreihe A hin. Für eine abschließende Bewertung der Klimarelevanz sollten die Versuche zu gasförmigen Emissionen aus Holzhackschnitzzellagermieten im realen Praxisfall getestet werden. Dennoch deuten die Ergebnisse bereits jetzt schon auf eine nur geringe Klimarelevanz der bei der Holzhackschnitzzellagerung freiwerdenden Emissionen hin.

Im Fall der KUP-Hackschnitzel kann die anaerobe Fahrsilolagerung nicht empfohlen werden. Grund hierfür waren die sehr hohen Trockenmasseverluste durch mangelnden Luftabschluss im simulierten Praxisfall. Auch die gleichzeitig mangelhafte Trocknung der Brennstoffe aufgrund von Wiederbefeuchtung und die negative Veränderung der Partikelform durch Verklumpung aufgrund von Pilzwachstum waren nachteilige Effekte dieser Variante. Ein direkter Vergleich mit einer Mietenlagerung desselben Materials wurde nicht durchgeführt. Erfahrungswerte zur Mietenlagerung aus der Literatur, die in einer ähnlichen Größenordnung liegen, deuten aber auf keinen positiven Effekt durch die Lagerung in abgedichteten Silos hin.

Die höheren Trockenmasseverluste bei der aeroben Lagerung konnten teilweise durch die starke Trocknung der Brennstoffe kompensiert werden. In manchen Fällen stieg der Energieinhalt in den Schüttungen nach der Lagerung sogar an. Vor allem für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen, die einen niedrigen Wassergehalt benötigen, ist diese Form der Lagerung gegenüber der anaeroben Lagerung zu bevorzugen.

Zu beachten ist, dass alle Brennstoffe nach der Lagerung in abgedichteten Silos ohnehin nicht für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet sind, weil die notwendige

Trocknung unterdrückt wird. Für große Biomasseheiz-(Kraft-)Werke, die Brennstoffe mit hohem Wassergehalt verwenden können, könnte die anaerobe Lagerung von Waldrestholzhackschnitzeln jedoch eine geeignete Methode sein, um eine stetige und effiziente Brennstoffbereitstellung während einer Heizperiode zu gewährleisten. Kapitel 12 beschreibt Verbrennungsversuche mit den Holzhackschnitzeln aus den hier beschriebenen Lagerungsversuchen in einer Kleinfeuerungsanlage.



## 8 Homogenität im Wassergehalt vom Lagerplatz bis zur Feuerung

MENDEL, T.; KUPTZ, D.; HARTMANN, H.

### 8.1 Problem- und Zielstellung

Holzhackschnitzel sind aufgrund des verwendeten Rohmaterials aber auch aufgrund unterschiedlicher Bereitstellungsketten ein sehr heterogener Brennstoff [80] [92]. Besonders nach einer Freilandlagerung in Mieten kann die Heterogenität, insbesondere beim Wassergehalt, erhöht sein. Durch Niederschlags-, Verdunstungs- und Kondensationsereignisse bilden sich innerhalb einer Lagermiete unterschiedliche Zonen aus. Diese können bei einem selektiven Mietenabbau bzw. bei der Gewinnung von Teilproben zu erheblichen Schwankungen bei den betrachteten Brennstoffparametern führen [60].

Diese Heterogenität spielt in der Praxis eine große Rolle. Gerade für kleinere Feuerungsanlagen sollte der Wassergehalt möglichst definiert und einheitlich sein. Weiterhin ist er für die Abrechnung von Holzhackschnitzellieferungen relevant. Als genaueste Methode wird die Abrechnung der Brennstoffe nach ihrer Masse bei einem definierten Wassergehalt gesehen [92]. Eine hohe Streuung des Wassergehalts innerhalb einer Holzhackschnitzelcharge erfordert jedoch eine möglichst repräsentative Probenahme, da durch eine selektive Messung der mittlere Wassergehalt stark über- bzw. unterschätzt werden kann und dies teils deutliche wirtschaftliche Folgen haben kann.

Ziel dieser Teilstudie war es daher, die Homogenität des Wassergehalts nach der Lagerung in Holzhackschnitzelmieten zu bewerten und die bereits durch die Umschlagsprozesse während einer Lieferung zum Endabnehmer stattfindende Homogenisierung der Brennstoffe zu untersuchen. Dies wurde im Rahmen zweier Fallstudien analysiert, bei denen die sich verändernde Inhomogenität der Holzhackschnitzel zweier realer Lagermieten (Fallstudie 1 und Fallstudie 2) bis zum eigentlichen Brennstoffeinsatz im Heizwerk des TFZ gemessen wurde.

### 8.2 Material und Methoden

Als geeigneter Parameter zur Bewertung der Homogenisierung der Holzhackschnitzel aufgrund ohnehin stattfindender Umschlagsprozesse wurde der Wassergehalt herangezogen. Die Analyse des Wassergehalts erfolgte an allen Messpunkten nach DIN EN ISO 18134-2 [32] (vgl. Kapitel 4).

Die Probenahme erfolgte in zwei Fallstudien jeweils am Lagerplatz direkt an einem Mietenquerschnitt, beim Beladen des jeweiligen Transportcontainers, bei Anlieferung an das Heizwerk, im Brennstoffbunker und direkt vor der Feuerung (siehe Abbildung 61).

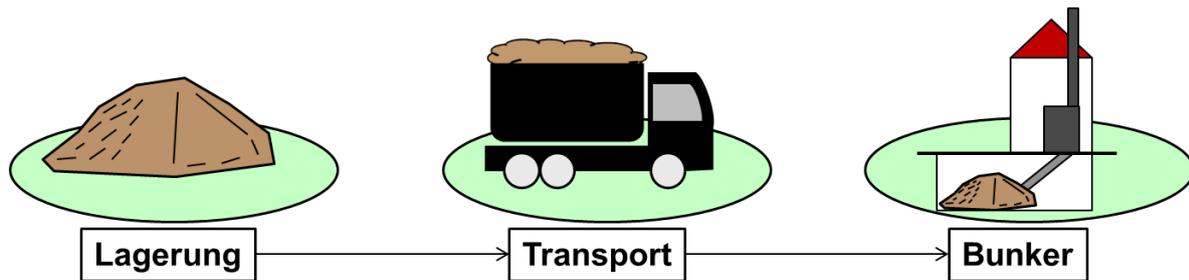


Abbildung 61: Übergeordnete Probenahmezeitpunkte beider Fallstudien

Fallstudie 1 wurde Ende Oktober 2015 durchgeführt. Fallstudie 2 erfolgte Anfang November 2017. Die Holzhackschnitzel beider Fallstudien stammten jeweils aus Energierundholz (Fichte). Dieses Rohmaterial besitzt in gehackter Form aufgrund des hohen Holzanteils i. d. R. eine hohe Brennstoffqualität [80]. Die Holzhackschnitzel wurden vor der Beprobung jeweils 22 Wochen lang in Mieten gelagert. Der Lagerplatz von Fallstudie 1 befand sich in Seuersholz im Landkreis Eichstätt. Die Miete wurde im Sommerlagerungsversuch des Vorgängerprojekts „Qualitätserhaltende Holzhackschnitzellagerung“ detailliert analysiert [61]. Die Entfernung des Lagerplatzes zum Heizwerk des TFZ betrug 130 km. Etwas weiter entfernt befand sich der Lagerplatz von Fallstudie 2. Die Holzhackschnitzel stammten aus den Versuchen zu Kapitel 6. Lagerort war Putzbrunn bei München. Die Brennstoffe wurden bei dieser Fallstudie über eine Entfernung von 150 km bis ans Heizwerk geliefert.

Bei beiden Fallstudien erfolgte die Probenahme nach demselben Schema. Die Art der Probengewinnung und die Anzahl der Proben waren demnach bei beiden Durchgängen identisch.

### 8.2.1 Probenahme am Lagerplatz

Die erste Probenahme wurde an der nicht manipulierten Miete durchgeführt. Hierfür wurde an der Miete ein vertikaler Querschnitt mithilfe eines Radladers freigelegt (Abbildung 62a). An diesem wurden an zwölf rasterförmig angeordneten Punkten Proben für die Wassergehaltsbestimmung genommen ( $n = 12$ , siehe Anhang B, Abbildung 144). Hierdurch sollte im Mittel der Querschnitt der Miete repräsentativ abgebildet und Informationen über eine mögliche Zonenbildung gewonnen werden.



Abbildung 62: Probenahme am Lagerplatz (a = am Mietenquerschnitt, b = beim Umladen in den Transportcontainer)

Im nächsten Schritt wurden entlang des freigelegten Querschnitts die Holzhackschnitzel schaufelweise mit dem Radlader abgetragen und in einen Transportcontainer umgefüllt. Bei diesem Vorgang wurden aus jeder Radladerschaufel kontinuierlich Proben zur Wassergehaltsbestimmung genommen (Abbildung 62b). Insgesamt wurden 36 Srm über den Radlader in den Transportcontainer verladen. Pro Srm wurde je eine Probe zur Wassergehaltsbestimmung gewonnen. Somit betrug bei diesem Prozessschritt die Anzahl der Proben 36 ( $n = 36$ ).

### 8.2.2 Probenahme nach Transport

Die Container wurden jeweils von Eichstätt bzw. Putzbrunn nach Straubing an das haus-eigene Heizwerk des TFZ (1,3 MW) transportiert. Bei Ankunft wurden zunächst zwölf Proben an der Containeroberfläche gezogen (Abbildung 63a). Die zwölf Proben waren so angeordnet, dass vier Proben den Randbereich der Oberfläche abdeckten, vier den mittleren Bereich und vier die Kernzone ( $n = 12$ ).

Beim nächsten Prozessschritt, dem Abkippen der Holzhackschnitzel in den Bunker, wurden weitere Proben genommen (Abbildung 63b). Zunächst wurden mit einem modifizierten Jaucheschöpfer mit Stiel (6,5 l Innenvolumen,  $\varnothing = 24$  cm) aus dem fallenden Gutstrom während des gesamten Prozesses 36 Proben entnommen ( $n = 36$ ). Des Weiteren wurde gleichzeitig eine Regentonne mit Einzelproben aus dem Gutstrom befüllt. Nach dem Befüllen wurden die Holzhackschnitzel aus der Tonne manuell durch dreimaliges Umsetzen mit einer Schaufel homogenisiert und in Anlehnung an DIN EN ISO 14780 [33] repräsentativ geteilt (Abbildung 63c und d). Aus dieser sehr gut durchmischten Gesamtprobe wurden drei Teilproben für die Bestimmung des Wassergehalts genommen ( $n = 3$ ). Variante b sollte eine Alternative zu Variante a mit ihrer sehr großen Einzelprobenanzahl bilden. Die Variante mit Regenfass bietet demnach eventuell die Möglichkeit, mit einem geringeren Arbeits- und Zeitaufwand ein gutes Messergebnis zu erzielen.



Abbildung 63: Probenahme bei Lieferung (a = an der Oberfläche des Containers, b = beim Abkippen in den Bunker – Varianten a, c = homogenisierte Probe – Varianten b, d = Homogenisierung mittels Probenteiler)

### 8.2.3 Probenahme im Bunker

Nach dem Abkippvorgang wurden an der Schüttung im Bunker zwölf Proben an der Schüttungsoberfläche genommen ( $n = 12$ , Abbildung 64a). Die Anordnung der Probenahmepunkte erfolgte nach demselben Raster wie schon bei der Probenahme im Container. Vor dem Abkippen der Holz hackschnitzel in den Brennstoffbunker wurde der gesamte Lagerraum gesäubert. Eine Vermischung des Materials mit vorherigen Lieferungen kann somit ausgeschlossen werden.



Abbildung 64: Probenahme im Bunker (a = an der Oberfläche im Bunker, b und c = vor der Feuerung)

Der letzte Probenahmezeitpunkt war direkt vor der Feuerung in bewegtem Gut. Dadurch gab es keine räumliche Anordnung der Probenahmepunkte, sondern eine Festlegung des Probenahmezeitpunkts. Die Probenahme erfolgte bei Fallstudie 1 konstant über zwei Tage hinweg und wurde tagsüber alle drei Stunden durchgeführt. Bei Fallstudie 2 erfolg-

te die Probenahme nur über einen einzelnen Tag und deshalb alle halbe Stunde. Dabei wurde mit einer Futtermittelschaufel aus einer Luke nach dem Steigförderer (Abbildung 64b und c) jeweils eine Probe mit zwei Wiederholungen entnommen ( $n = 3$ ).

### 8.3 Ergebnisse und Diskussion der Fallstudie 1

Am Lagerplatz in Seuersholz wurde ein mittlerer Wassergehalt der Holzhackschnitzel von 41,0 m-% gemessen (Abbildung 65, Abbildung 66). Die zwölf Messwerte über den Mietenquerschnitt zeigten eine maximale Abweichung von 27,3 m-% vom Mittelwert. Auf der sonnenexponierten Seite wurde an der Mietenoberfläche ein minimaler Wassergehalt von 19,2 m-% gemessen, wohingegen der Wassergehalt an der obersten Mietenposition mit 68,4 m-% sehr hoch lag (Abbildung 65). Da die Miete während der Lagerung mit einem Vlies abgedeckt war, entstand dieser hohe Wert vermutlich durch Verdunstungs- und Kondensationsprozesse und weniger durch Niederschlag.

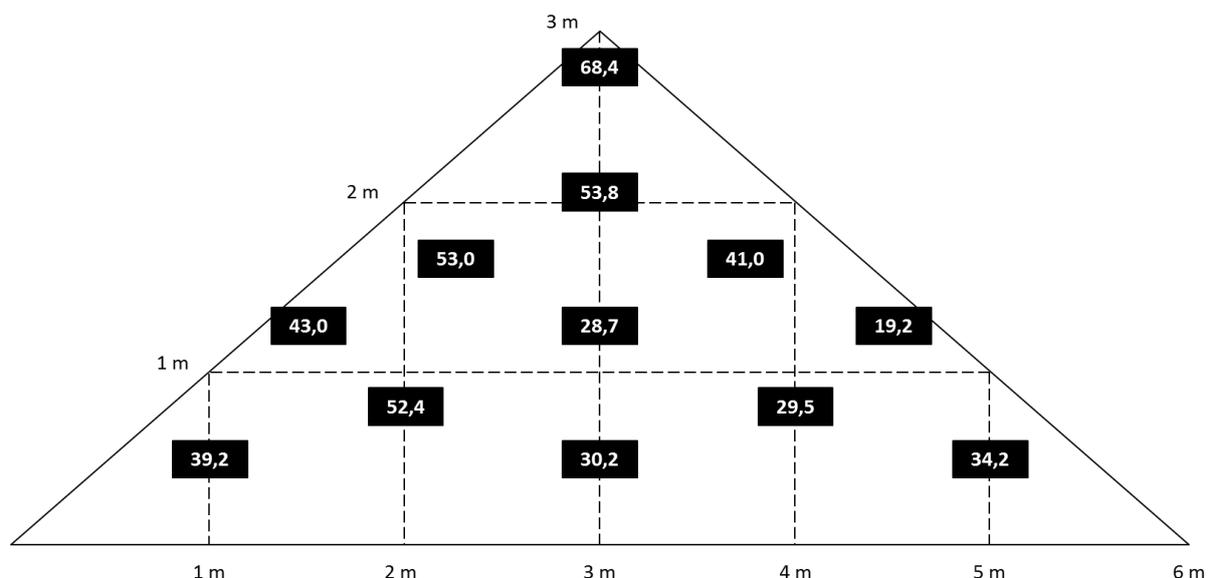


Abbildung 65: Wassergehalte (in m-%) im Mietenquerschnitt von Fallstudie 1

Bei der Verladung der Holzhackschnitzel von der Miete in den Transportcontainer lag der Wassergehalt durchschnittlich bei 41,9 m-% (Abbildung 66). Im Vergleich zum Mietenquerschnitt gab es keine signifikanten Unterschiede (t-Test). Die Streuung der Messwerte konnte bereits bei diesem Schritt um 20 Prozentpunkte reduziert werden.

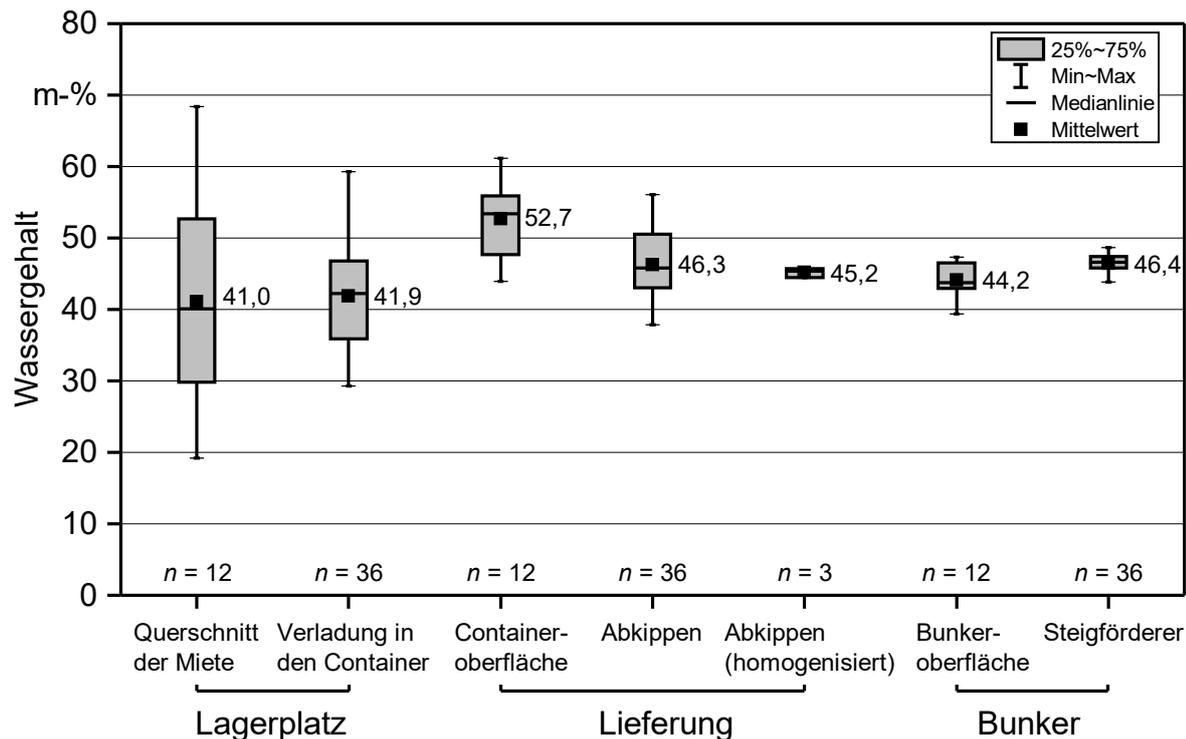


Abbildung 66: Wassergehaltsmessungen der Fallstudie 1 an den Schnittstellen der Probenahme: Lagerplatz, Lieferung und Bunker

Nach der Lieferung an das TFZ-Heizwerk wurde an der Containeroberfläche ein signifikant höherer Wassergehalt im Vergleich zum Aufladen festgestellt (t-Test:  $p \leq 0,05$ , Abbildung 66). Aufgrund eines technischen Defekts an der hauseigenen Holzhackschnitzelheizung und der daraufhin notwendigen Wartungs- und Reparaturarbeiten kam es vor der Lieferung an das TFZ zu einem zeitlichen Verzug von sechs Tagen. Während dieser Zeit mussten die Brennstoffe im Container zwischengelagert bleiben. Zum Schutz sollte dieser beim Lieferanten mit einer Plane abgedeckt werden, um eine Zunahme im Wassergehalt durch Niederschlagsereignisse zu vermeiden. Trotzdem wurde eine deutliche Zunahme im Wassergehalt an der Oberfläche festgestellt. Im Mittel lag der Wassergehalt der Holzhackschnitzellieferung (46,3 m-%) um 4,2 m-% höher als zum Zeitpunkt der Containerbefüllung. Umgerechnet auf die Gesamtmasse der Holzhackschnitzel würde diese Zunahme eine Massezunahme von 342 kg bedeuten. Laut dem Deutschen Wetterdienst wurde an einer nahegelegenen Wetterstation eine Niederschlagsmenge von  $26 \text{ l m}^{-2}$  in der Region während dieser sechs Tage gemessen [22]. Dies entspricht umgerechnet auf die Containeroberfläche einer Niederschlagssumme von 353 l. Die Vermutung liegt somit nahe, dass der Niederschlag Ursache für die Veränderung im Wassergehalt gewesen sein musste und dass der Container trotz Vorgabe nicht wie vom Lieferanten zugesichert mit einer Plane abgedeckt oder die Plane nicht wasserdicht war. Diese Zunahme wird auch durch die nachfolgenden Wassergehaltsmessungen bestätigt.

Beim Abkippen der Holzhackschnitzel in den Bunker zeigte Probenahme-Variante b (Fass, Abbildung 63c) eine deutlich geringere Streuung über die drei Messwerte als die

arbeitsintensivere Variante a (Einzelproben während des Abkippvorgangs). Im Mittel lagen beide Varianten aber sehr nahe beieinander. Durch die Wassergehaltsbestimmung von nur drei Einzelproben der Variante b im Vergleich zu den in dieser Studie analysierten 36 Proben der Variante a kann nicht nur Zeit, sondern auch Trockenschrankkapazitäten gespart werden. Somit wird der Laboraufwand deutlich verringert.

Durch das Abkippen in den Bunker kam es wiederum zu einer Homogenisierung des Brennstoffs, was sich in der geringeren Streuung der Wassergehalte der Proben aus dem Bunker im Vergleich zu Variante a zeigt (Abbildung 66). Durch die Bewegung der Holzhackschnitzel im Bunker über den Schubboden und von dort über die Förderschnecke zur Feuerung erhöhte sich die Durchmischung abermals. Die maximale Abweichung vom Mittelwert lag direkt vor der Feuerung bei nur noch  $\pm 2,7$  m-%.

#### 8.4 Ergebnisse und Diskussion der Fallstudie 2

Am Lagerplatz in Putzbrunn betrug der mittlere Wassergehalt der Holzhackschnitzel im Querschnitt 43,2 m-% (Abbildung 67, Abbildung 68) mit einer maximalen Abweichung von 25,1 m-%. Auch bei dieser Fallstudie wurden nach fünfmonatiger Lagerung die höchsten Werte am obersten Probenahmepunkt (68,2 m-%) sowie an einem im Randbereich gelegenen Punkt gemessen. Da die Probenahme während eines niederschlagsreichen Tags stattfand, konnten keine besonders niedrigen Wassergehalte z. B. an der sonnenexponierten Seite festgestellt werden. Der niedrigste Wassergehalt betrug in dieser Fallstudie 30,7 m-% (siehe Abbildung 67).

Bei Fallstudie 2 konnte die Lieferung an das hauseigene Heizwerk ohne zeitlichen Verzug erfolgen. Es wurde zudem sichergestellt, dass eine Abdeckplane die Holzhackschnitzel während des Transports vor Niederschlag schützte. Somit wurden bei Lieferung der Brennstoffe im Wassergehalt keine signifikanten Unterschiede gegenüber den Messungen am Lagerplatz festgestellt. Auch bei dieser Fallstudie zeigte Variante b beim Abkippen der Holzhackschnitzel in den Bunker eine deutlich geringere Streuung über die drei Messwerte als die arbeitsintensivere Variante a (Abbildung 68). Im Mittel lag der Wassergehalt dieses Mal bei beiden Varianten bei 43,6 m-%.

Durch den Abkippvorgang in den gesäuberten Bunker konnten die Holzhackschnitzel wiederum weiter homogenisiert werden. Die Streuung der Messungen im Bunker verringerte sich im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen. Die maximale Abweichung vom gemessenen Mittelwert bei der letzten Probenahme direkt vor dem Eintritt in die Feuerung lag bei  $\pm 4,4$  m-%.

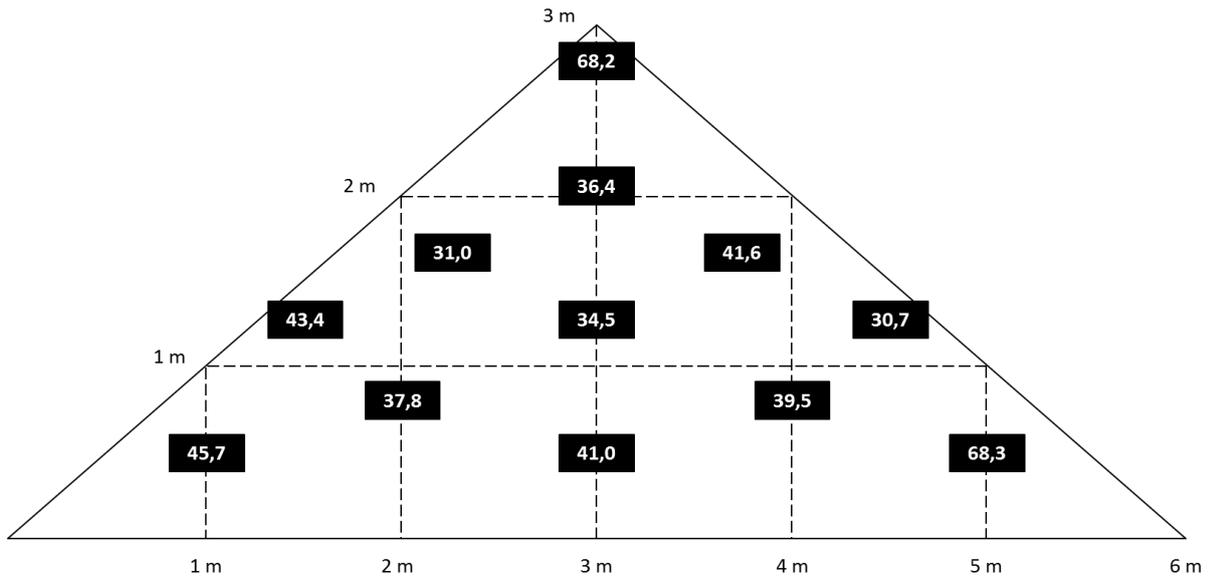


Abbildung 67: Wassergehalte (in m-%) im Mietenquerschnitt von Fallstudie 2

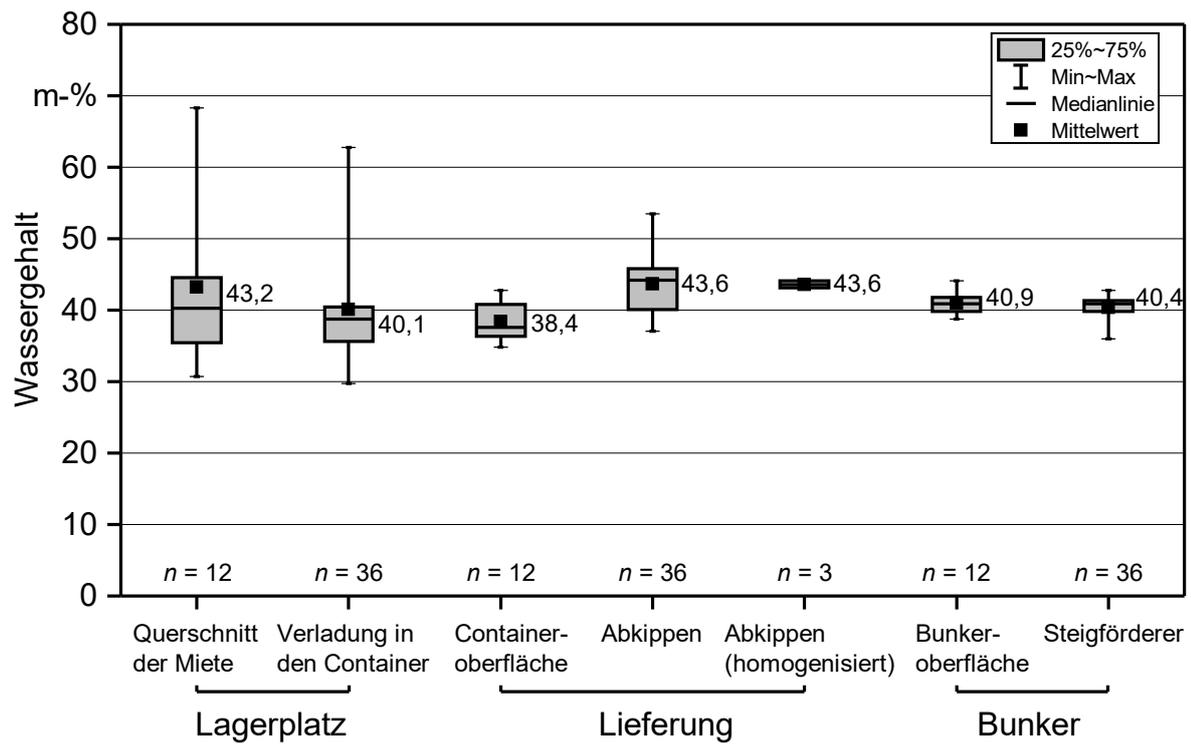


Abbildung 68: Wassergehaltsmessungen der Fallstudie 2 an den Schnittstellen der Probenahme: Lagerplatz, Lieferung und Bunker

## 8.5 Schlussfolgerung

Insgesamt nahm die Streuung des Wassergehalts bei beiden Fallstudien vom Lagerplatz bis zur Feuerung deutlich ab. Es kam somit zu einer ausgeprägten Homogenisierung des Wassergehalts alleine durch die Umschlagsprozesse während der Lieferung.

Zu beachten ist, dass der Wassergehalt zusätzlich von der Verweildauer der Holzhackschnitzel im Bunker, der Fördertechnik sowie von der Vermischung mit womöglich anderen Sortimenten und Lieferungen beeinflusst wird. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass selbst extreme Schwankungen im Wassergehalt des Ausgangsmaterials bis zur tatsächlichen Verwendung in der jeweiligen Feuerung durch die Bewegung des Brennstoffs verringert werden können.

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen weiterhin, dass mit einer einfachen manuellen Homogenisierung der Teilproben zum Zeitpunkt der Anlieferung die Streuung der Messwerte stark reduziert und somit die Genauigkeit des Wassergehalts für Abrechnungszwecke hinreichend genau wiedergegeben werden kann.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind als Fallstudien zu betrachten und daher nicht allgemeingültig. Dennoch sind die Erkenntnisse vielversprechend und können eine Hilfestellung für die Praxis darstellen.



## 9 Technische Trocknung für einen homogenen Wassergehalt

KUPTZ, D.; MENDEL, T.; HARTMANN, H.

### 9.1 Problem- und Zielstellung

Der Wassergehalt stellt eines der wichtigsten Qualitätskriterien von Holzhackschnitzeln dar, da dieser nicht nur die Lagerfähigkeit der Brennstoffe, sondern auch deren Heizwert und das Emissionsverhalten beeinflusst [39] [52]. Frische Holzhackschnitzel weisen direkt nach der Ernte oft sehr hohe Wassergehalte von ca. 50 m-% auf [78]. Dieser Wert ist für viele Kessel problematisch. Beispielsweise kann es durch zu hohe Wassergehalte zu einer Abkühlung der Brennraumtemperatur und hierdurch zu einer unvollständigen Verbrennung kommen. Als Folge dessen können die Emissionen an CO oder Gesamtstaub ansteigen [5]. Auch die Lagerfähigkeit der Brennstoffe wird direkt durch den Wassergehalt beeinträchtigt, beispielsweise durch hohe Trockenmasseverluste aufgrund mikrobieller Aktivität (siehe Kapitel 4, 6 und 11).

Je nach Anwendungsfall müssen die Brennstoffe vor ihrer Verwendung getrocknet werden. Hierbei unterscheidet man zwischen natürlicher Trocknung, beispielsweise in Hackholzpoltern oder in einer Lagermiete (siehe Kapitel 5 und 6 [60]), und technischen Trocknungsverfahren, beispielsweise durch aktive Belüftung einer Schüttung mit Abwärme einer Biogasanlage in einem Satzrockner [50] [39]. Die technische Trocknung ermöglicht es, den Wassergehalt im Brennstoff in sehr kurzer Zeit deutlich zu reduzieren, wodurch zugleich Lagerrisiken minimiert werden können (vgl. Kapitel 11). Besonders niedrige Wassergehalte < 25 m-%, wie sie beispielsweise für viele Kleinf Feuerungsanlagen benötigt werden, können mit technischen Trocknungsverfahren problemlos erreicht werden. Im Gegensatz dazu kann eine natürliche Brennstofftrocknung auch bei einer Lagerdauer von mehr als einem halben Jahr diese niedrigen Werte häufig nicht gewährleisten [60] [83].

Die technische Trocknung stellt bei der Aufbereitung von Holzhackschnitzeln einen zusätzlichen Arbeitsschritt und somit einen weiteren Kostenfaktor dar, beispielsweise für Maschinen oder Personal. Daneben fallen hohe Investitions- sowie Energiekosten, z. B. für die verwendeten Gebläse, ggf. auch für die Wärmequelle an. Häufig fehlt zudem in der Praxis eine Möglichkeit zur prozessintegrierten Kontrolle des Wassergehalts in Echtzeit. Deshalb wird an vielen Trocknungsanlagen der Brennstoff „übertrocknet“, um den gewünschten Zielwassergehalt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit sicher zu unterschreiten. Hierdurch kommt es zu unnötig langen Trocknungsdauern und somit zu vermeidbaren Energieverlusten. Dies schlägt sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit der Trocknungsanlagen nieder [50]. Zu beachten ist zudem, dass ein zu trockener Brennstoff nicht für jede Feuerung geeignet ist. Sehr trockene Brennstoffe < 10 m-% führen beispielsweise häufig zu sehr hohen Verbrennungstemperaturen im Kessel und dadurch zu Schlackebildung.

Bei der technischen Trocknung sind besonders Satzrockner, die mit der Abwärme von Biogasanlagen betrieben werden, in der Praxis weit verbreitet [50]. Trocknerarten mit

einem kontinuierlichen Gutstrom, beispielsweise Bandtrockner, Schubbodentrockner oder Wälzbettrockner, kommen dagegen seltener zum Einsatz. In der hier dargestellten Studie soll daher gezielt die Satzrocknung untersucht und soweit möglich energetisch optimiert werden. Alle Versuche fanden am Betriebshof des TFZ statt. Die Arbeiten gliederten sich in zwei Phasen:

- Aufbau und verfahrenstechnische Optimierung einer Satzrockneranlage am TFZ für reproduzierbare Trocknungsversuche (Abschnitte 9.2.1 und 9.2.2),
- Durchführung von Trocknungsversuchen (Unterkapitel 9.3) mit Fokus auf der
  - Homogenität des Wassergehalts in der Schüttung (Abschnitt 9.3.1) und der
  - energetischen Optimierung der Trocknung (Abschnitt 9.3.2).

Für die Grundeinstellungen der Trocknungsanlage wird auf Ergebnisse einer stichprobenartigen telefonischen Expertenbefragung aus der Praxis zurückgegriffen.

## 9.2 Material und Methoden

### 9.2.1 Grundaufbau der Satzrockneranlage am TFZ

Als Trocknungsanlage kamen am TFZ verfügbare Niedrigtemperatur-Satzrocknerboxen zum Einsatz. Die verwendeten Trocknungsboxen bestehen in ihrer Grundeinheit jeweils aus einer selbstkonstruierten Holzkiste mit einem Innenvolumen von  $1650 \times 950 \times 1320$  mm (Abbildung 69). Als Bodenplatten werden je Box zwei Lochsiebe mit 15 mm Lochdurchmesser verwendet. Über einen Hebelmechanismus können die beiden Bodenplatten aufgeklappt und die Kiste entleert werden.

Die jeweilige Holzkiste wird für den Trocknungsvorgang auf eine passgenaue Bodenplatte gestellt (Abbildung 69). Die Trocknung erfolgte dann durch Belüftung der Schüttung mittels eines mobilen Gebläses (TLR, Himel Maschinen). Zwischen Gebläse und Trocknungskiste wurde ein Luftherhitzer geschaltet (Helios Ventilatoren AG). Der Volumenstrom des Gebläses wird zwischen Luftherhitzer und Gebläse mithilfe eines Turbinenradgaszählers (Terz 94, RMG Messtechnik GmbH) bestimmt. Die Holzkiste inklusive Bodeneinheit wird mithilfe von vier Wägezellen (K-SQB, Bische Wägetechnik GmbH) unter den Füßen der Bodenplatte kontinuierlich gewogen. Die Masse der frischen Brennstoffe wird zu Beginn der Trocknung aus der Differenz der gefüllten und der leeren Trocknungsbox bestimmt ( $m_a$  in kg). Gleichzeitig erfolgt die repräsentative Bestimmung des Wassergehalts nach DIN EN ISO 18134-2.

Durch die Wasserabnahme während der Trocknung sinkt die Masse der Probe. Die gewünschte Zielmasse ( $m_z$ ) bei einem mittleren Wassergehalt von 15 m-% lässt sich aus dem Ausgangswassergehalt zu Beginn der Trocknung ( $w$ ) und der Ausgangsmasse ( $m_a$ ) nach Formel (9.1) berechnen.

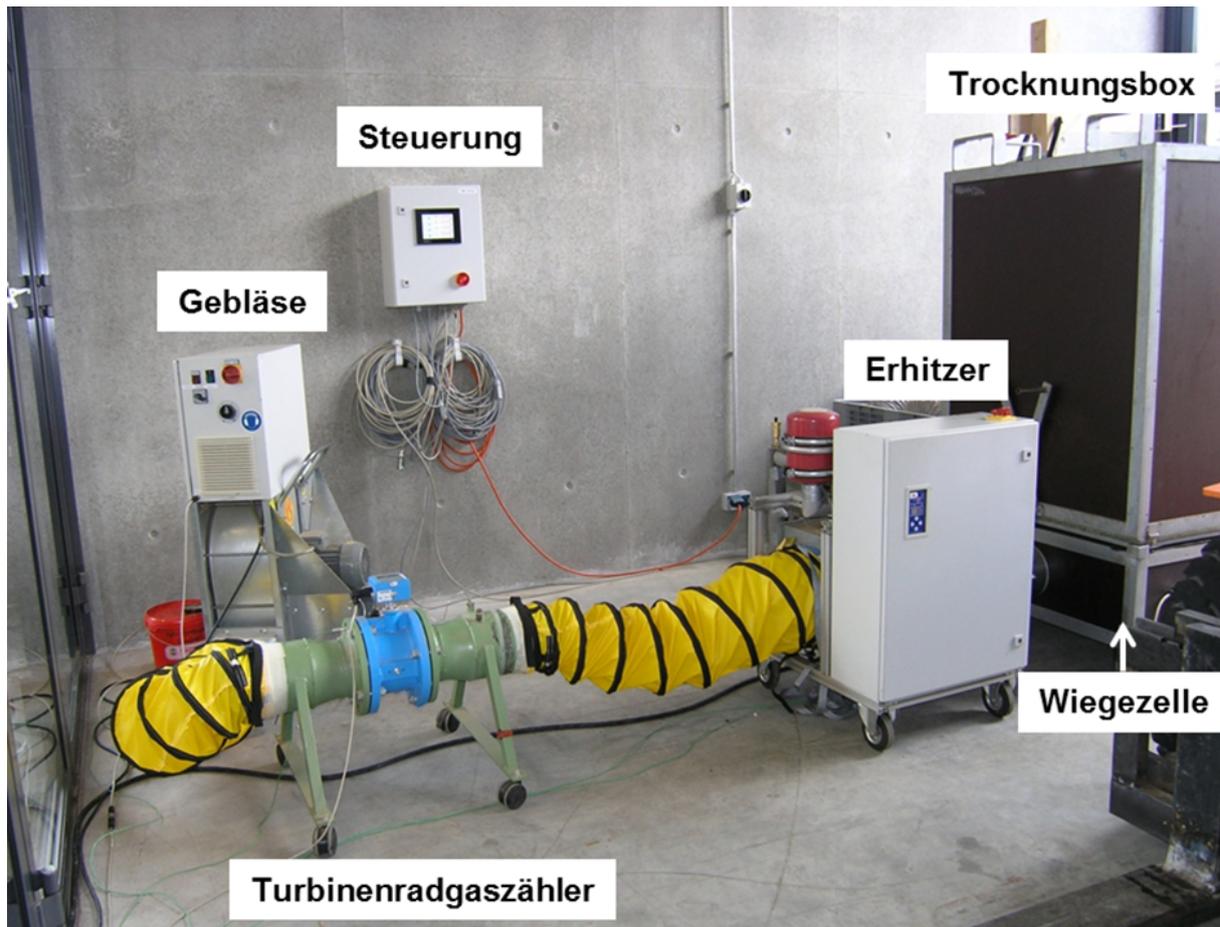


Abbildung 69: Grundaufbau des TFZ-Versuchstrockners

$$m_z = \frac{m_a \times (100 - w)}{(100 - 15)} \quad (9.1)$$

Während der Trocknung werden die Masseänderung, der Volumenstrom und die Energieverbräuche des Gebläses und des Lufterhitzers kontinuierlich aufgezeichnet. Bei Erreichen einer aus der Ausgangsmasse und Ausgangswassergehalt einer Probe errechneten Zielmasse, d. h. bei Erreichen des gewünschten Zielwassergehalts von 15 m-%, wird die Trocknung von dem System automatisch abgeschaltet. Hierzu wird die Belüftung der Trocknungsbox durch automatische Verschlussklappen an der Bodeneinheit unterbunden.

Die gesamte Trocknungseinheit ist in einem separaten Raum im Technikum des TFZ untergebracht. Um eine Sättigung der Umgebungsluft mit Wasserdampf durch die Trocknung zu vermeiden, kann die östliche Seitenwand über Flügeltüren komplett geöffnet werden. Auf diese Weise kann auch eine Kondensation der gesättigten Luft an den Wänden und Decken des Raums vermieden werden.

### 9.2.2 Verfahrenstechnische Optimierung der Satz­trocknung am TFZ

In einem ersten Schritt wurde die Satz­troch­nung des TFZ für die Versuchsfragen tech­nisch optimiert. Hierzu wurde zunächst die automatisierte Trocknungssteuerung über die vier Wiege­zellen und einen externen PC realisiert (siehe Ab­bildung 69). Für die darge­stellten Versuche wurde jeweils immer nur eine Trocknungsbox verwendet.

Die Trocknungsanlage wurde mit mehreren Sensoren ausgestattet, um neben Trocknungs­dauer, Volumenstrom, Energiebedarf und Masse­änderung folgende Parameter kontinuierlich aufzu­zeichnen zu können:

- Temperatur und Luftfeuchte der Eingangsluft (Platzierung der Sensoren direkt vor dem Gebläse),
- Temperatur der Trocknungsluft am Volumenstrom-Messgerät,
- Temperatur und Luftfeuchte der Trocknungsluft, die in die Trocknungsbox eingeblasen wird (Platzierung der Sensoren in Bodeneinheit),
- Temperaturentwicklung in der Trocknungsbox (Platzierung mehrerer Sensoren auf unterschiedlichen Höhen. Die Abstände ergaben sich aus der jeweiligen Versuchsfrage),
- Temperatur und Luftfeuchte der aus den Holzhackschnitzeln ausströmenden Luft (Platzierung von Sensoren über der Öffnung der Trocknungsbox).

Des Weiteren wurde die Trocknungsbox für die Versuchsreihe II durch einen mobilen Aufbau in ihrer Höhe erweitert (vgl. Abschnitt 9.2.4). Somit erreichte die maximale Schütthöhe in der Trocknungsbox die Höhe praxisüblicher Abrollcontainer (2,3 m).

Neben der Automatisierung der Trocknung und der kontinuierlichen Datenaufzeichnung wurde angestrebt, mögliche Umgebungsvariablen zu minimieren. Hierzu wurde zunächst der typische Trocknungsverlauf in der Satz­troch­nerbox des TFZ in einem Vorversuch aufgezeichnet. Zum Einsatz kamen Holzhackschnitzel, die für das Heizwerk des TFZ geliefert wurden.

Während des Vorversuchs wurden die Temperatur der Trocknungsluft über den Luffert­hitzer und der Volumenstrom über das Gebläse in zwei bis drei Schritten variiert (Tabelle 33). Dies erlaubte einen ersten Einblick in die Empfindlichkeit des Systems bezüglich dieser Parameter. Zu zwei Zeitpunkten wurden während des Vorversuchs die Flügeltüren des Trocknungsraums für mehrere Stunden geschlossen. Dies erfolgte zunächst aus Sicherheitsgründen, um Unbefugten nachts keinen Zugang in das Technikum des TFZ zu ermöglichen, hatte aber zur Folge, dass die Raumluft am Aufstellungsort der Trocknungsanlage zeitweise von den Schwankungen der Außenluft abhängig war (offene Außentüren), zu anderen Zeitpunkten diese Abhängigkeit jedoch ausgeschlossen werden konnte (geschlossene Außentüren, daher Luftentnahme aus dem beheizten Innenraum des Gesamtgebäudes).

Tabelle 33: Einstellungen der Trocknungsluft für den Vorversuch zur Optimierung der TFZ-Trocknungsanlage

	Einstellung 1	Einstellung 2	Einstellung 3
Dauer in h	5	27	21
Temperatur in °C	50	60	65
Volumenstrom in m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	400	600	600

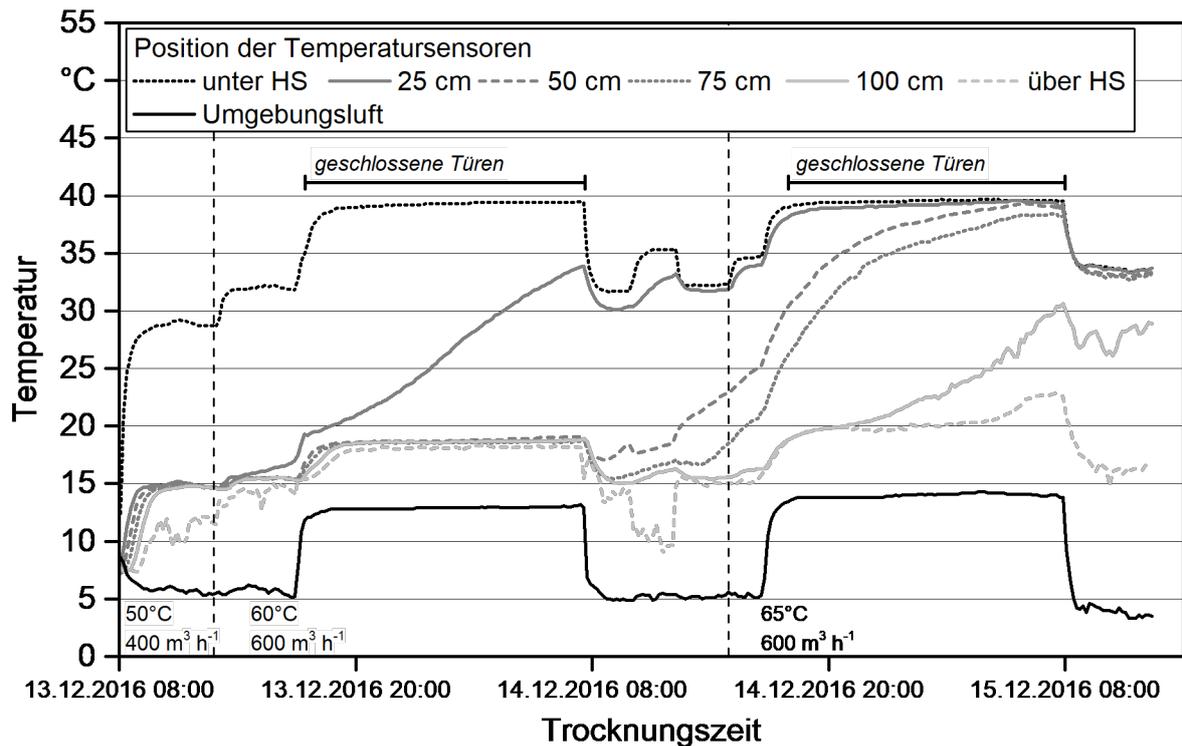


Abbildung 70: Temperaturverlauf der Trocknungsanlage während des Vorversuchs

Die Öffnungsweite der Außentüren hatte einen direkten Einfluss auf die Umgebungsvariablen der Trocknung (Abbildung 70, Abbildung 71). Beispielsweise stieg die Temperatur der Umgebungsluft und der Luft am Eingang in die Trocknungsbox („unter HS“ in Abbildung 70) um ca. 7 °C an, während die Außentüren des Trocknungsraums geschlossen waren. Infolge der Temperaturerhöhung nahm die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft bei geschlossenen Türen ab (Abbildung 71). Gleichzeitig kam es bei geschlossenen Türen zu einer starken Kondensatbildung an den Wänden und Decken des Trocknungsraums. Bei geöffneten Außentüren streuten die genannten Parameter erheblich, wohingegen bei geschlossenen Türen nahezu konstante Umgebungsparameter erreicht werden konnten.

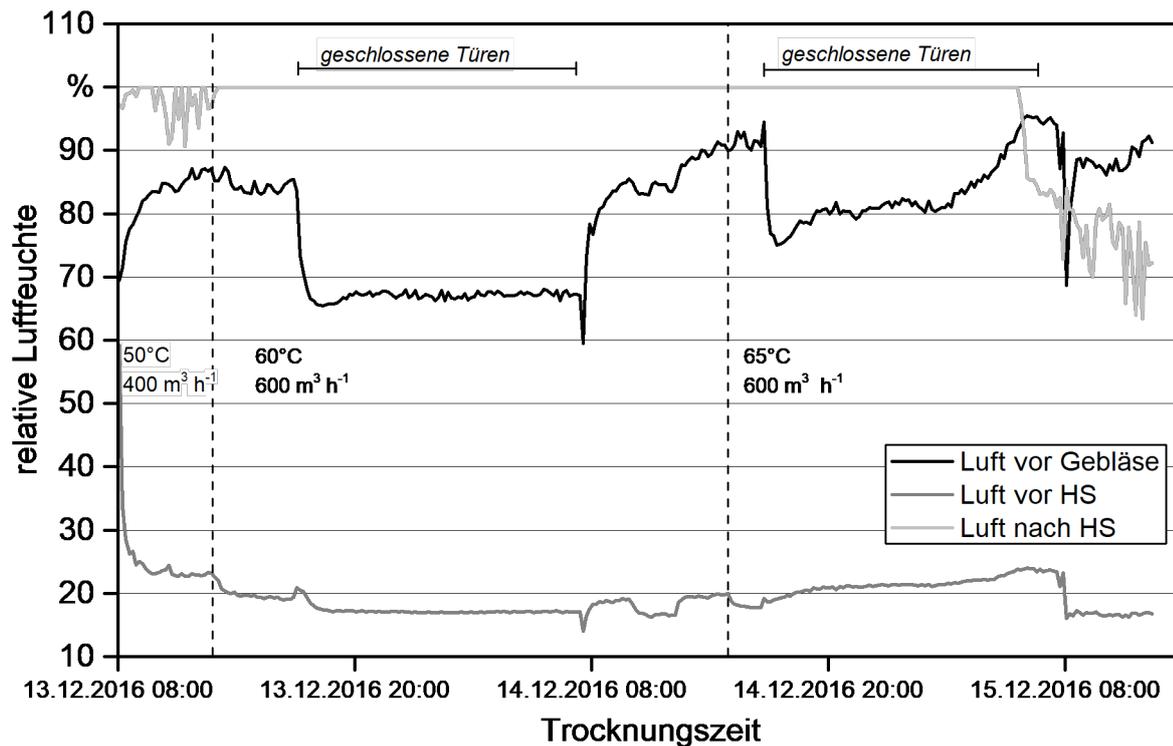


Abbildung 71: Relative Luftfeuchte der Trocknungsanlage während des Vorversuchs

Die Ergebnisse des Vorversuchs zeigen deutlich, dass die Trocknung mit geöffneten Außentüren zu Schwankungen in den Eingangsparametern der Anlage führt und somit kritisch für die Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Versuche zu bewerten ist (vgl. Abbildung 71). Daher wurde in der Wand des Trocknungsraums ein Belüftungsgebläse installiert, das die nach der Trocknung mit Feuchtigkeit gesättigte Luft abtransportieren kann und trockene Außenluft nachströmen lässt. Durch die kontinuierliche Belüftung des Trocknungsraums kann eine starke Schwankung der Eigenschaften der Umgebungsluft vermieden werden (vgl. Ergebnisse aus Abschnitt 9.3.2).

Nach Umbau der Trocknungsanlage wurden zwei Versuchsreihen zu relevanten Trocknungsparametern durchgeführt (siehe Abschnitte 9.2.3 und 9.2.4). Diese umfassen die Homogenität des Wassergehalts nach der Trocknung (Versuchsreihe 1) und die energetische Optimierung der Trocknung durch Änderung ausgewählter Prozessparameter (Versuchsreihe 2).

### 9.2.3 Versuchsreihe 1 – Homogenität des Wassergehalts in der Schüttung

In einer ersten Versuchsreihe wurde analysiert, inwieweit es durch die technische Trocknung in der TFZ-Satztrocknerbox zu einer heterogenen Verteilung des Wassergehalts innerhalb der Schüttung kommen kann. Vor allem bei der Trocknung unbewegten Materials könnten sich sehr trockene Zonen bilden, beispielsweise nahe der Eingangsöffnung für die Trocknungsluft, und gleichzeitig sehr feuchte Zonen entstehen, beispielsweise durch Kondensationsprozesse an den Rändern oder an der Oberfläche der Schüttung.

Um diesen Effekt für die Trocknungseinrichtung des TFZ zu testen, wurden zwei Trocknungsdurchgänge durchgeführt und Wassergehaltsproben von unterschiedlichen Positionen in den Boxen gewonnen. Die Brennstoffe für die Versuche stammten aus einer regulären Lieferung an das TFZ-Heizwerk. Zunächst wurde eine größere Charge Brennstoff aus der Lieferung abgetrennt und homogenisiert. Anschließend wurde der Wassergehalt des Ausgangsmaterials nach DIN EN ISO 18134-2 gemessen ( $n = 10$ ) [32]. Zusätzlich erfolgte eine Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17827-1 ( $n = 3$ ) [29].

Nach der Beprobung des Ausgangsmaterials wurden zwei Trocknungsboxen mit frischen Holzhackschnitzeln befüllt und deren Gesamtmasse bestimmt. Die Brennstoffe wurden anschließend in den Boxen auf einen Zielwassergehalt von 15 m-% getrocknet. Der Versuch mit der zweiten Box erfolgte ca. eine Woche nach der Trocknung der ersten Box.

Die Trocknung der jeweiligen Charge wurde automatisch beendet, sobald die aus dem Ausgangswassergehalt und der Ausgangsmasse berechnete Zielmasse (bei 15 m-% Wassergehalt) in der jeweiligen Trocknungsbox erreicht wurde.

Nach Abschluss der Trocknung erfolgte die Entnahme von jeweils insgesamt 39 Wassergehaltsproben, die von unterschiedlichen Positionen entweder manuell (siehe Abbildung 72, links) oder, im zweiten Durchlauf, mittels vorher eingebauter Bilanzbeutel gewonnen wurden (siehe Abbildung 72, rechts). Das Design der Bilanzbeutel entsprach demjenigen der Versuche in den Kapiteln 6 und 7.



*Abbildung 72: Wassergehaltsprobenahme in Versuchsreihe 1 zur technischen Trocknung. Links: manuelle Probenahme, rechts: Verteilung der Bilanzbeutel vor der Auffüllung der Box mit losen Holzhackschnitzeln*

Die Verteilung der Proben (Bilanzbeutel, manuelle Probenahme) ist in Abbildung 73 dargestellt. Dabei wurden auf drei verschiedenen Höhen in der Trocknungsbox (0 bis 40 cm, 40 bis 80 cm und 80 bis 120 cm) jeweils 13 horizontal verteilte Proben genommen. Die Proben wurden anschließend hinsichtlich ihres Wassergehalts nach DIN EN ISO 18134-2 analysiert.

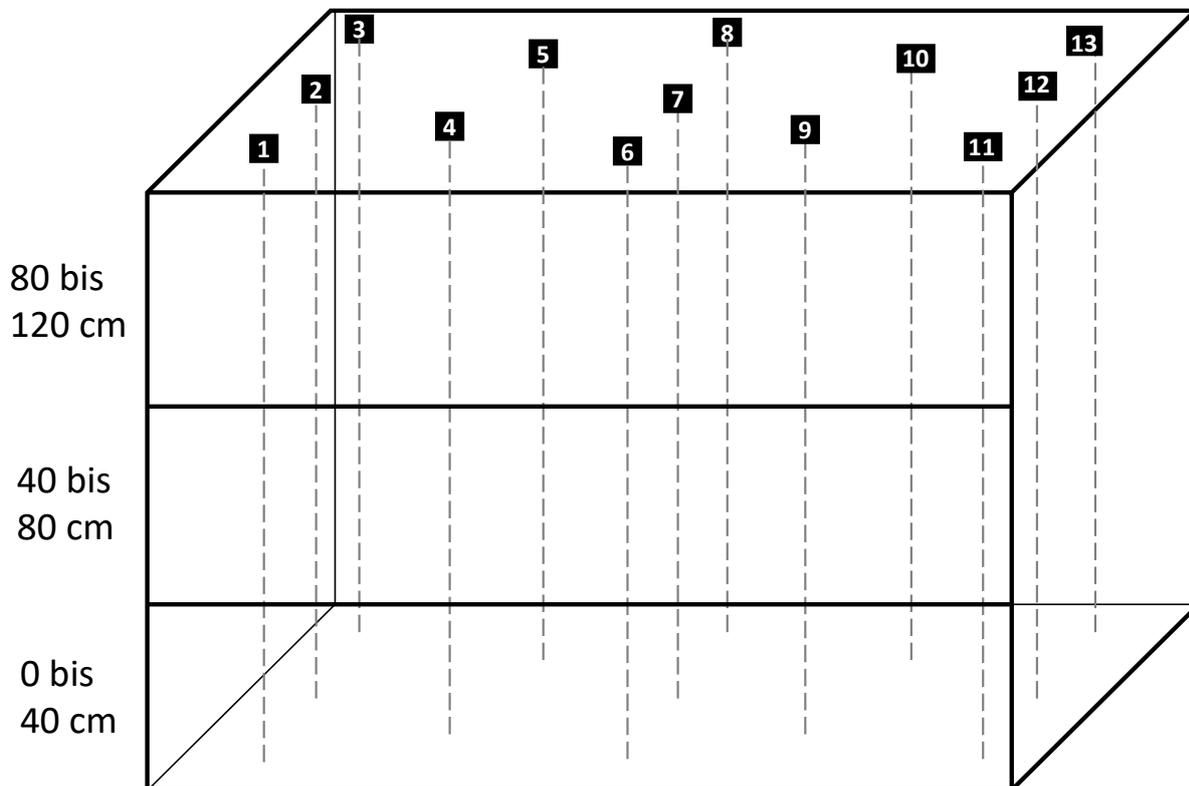


Abbildung 73: Verteilung der Wassergehaltsproben (Bilanzbeutel, manuelle Probenahme) bei der Trocknung in Versuchsreihe 1 mit jeweils 13 Proben auf drei Höhen

#### 9.2.4 Versuchsreihe 2 – Prozessparameter der Trocknung

Zur Optimierung der Prozessparameter der Trocknungseinrichtung am TFZ wurde eine zweite Versuchsreihe (2) durchgeführt. Vorab wurden gängige Einstellungen von Satz-trocknern aus der Praxis über eine stichprobenartige telefonische Befragung ermittelt. Dabei wurde auf bestehende Einzelkontakte des TFZ zurückgegriffen, weshalb es sich lediglich um eine erste Orientierung für den Versuchsablauf, nicht jedoch um eine repräsentative Umfrage handelt.

Die Befragung umfasste insgesamt 19 offen formulierte Fragen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf allgemeinen technischen Daten zu der jeweiligen Trocknungsanlage, der Trocknungshandhabung und -regelung sowie zu möglichen Optimierungs- und Automatisierungspotenzialen von Satz-trocknern (siehe Anhang, Abschnitt A).

Für die Grundeinstellungen der Trocknung wurde von einem Satzrockner auf Containerbasis ausgegangen. Folgende Parameter wurden festgelegt:

- Die Schütthöhe in der Praxis entspricht meistens der maximalen Schütthöhe eines Standardabrollcontainers für Fahrzeuge (i. d. R. 2,3 m). Deshalb wurde auch die Trocknungsbox vor Beginn von Versuchsreihe 2 in ihrer Höhe erweitert. Als Standardeinstellung wurde eine Schütthöhe von 2,3 m gewählt (vgl. Abschnitt 9.2.2 und Abbildung 75)
- Eine typische Trocknungstemperatur am Eingang eines Satzrockners auf Containerbasis liegt häufig bei 50 bis 55 °C. Vorversuche am TFZ ergaben, dass mit einer Temperaturregulierung des Heizwasserkreislaufs auf 85 °C eine Temperatur kurz vor Eingang in die Trocknungsbox von durchschnittlich 56,7 °C erreicht werden kann.
- Der Volumenstrom war im Versuchsaufbau durch den maximal mithilfe des verwendeten Turbinenradgaszählers messbaren Wert auf  $655 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  beschränkt. Varianten mit mehr als  $600 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  wurden im Versuchsaufbau des TFZ daher nicht realisiert.

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 74 wiedergegeben. Insgesamt wurden sechs Trocknungsversuche durchgeführt, wobei jeweils eine der Stellgrößen (Temperatur der Eingangsluft, Volumenstrom, Schütthöhe) variiert wurde (siehe Tabelle 34).

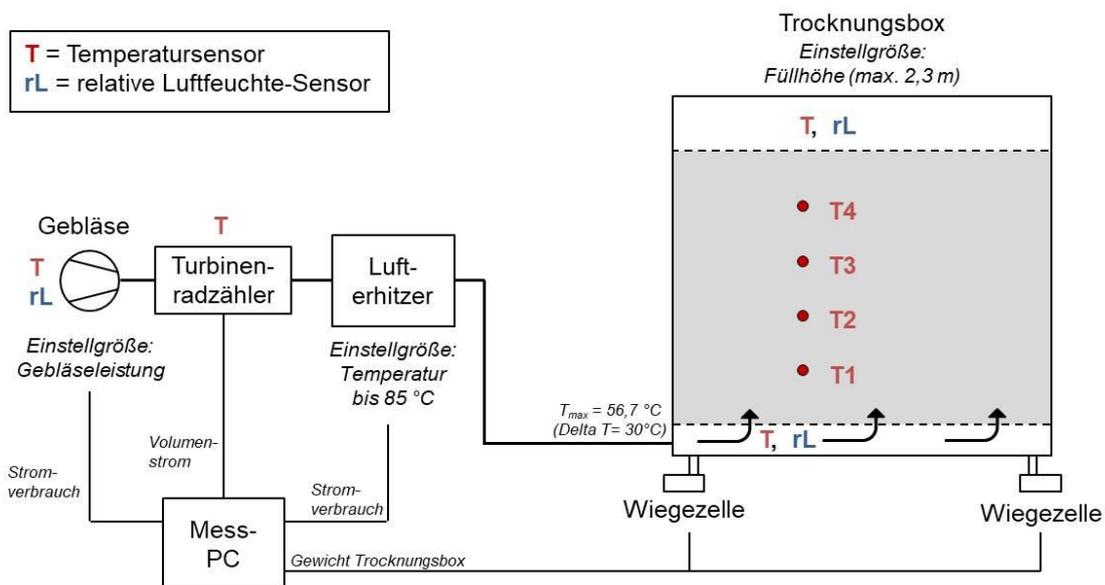


Abbildung 74: Schematischer Aufbau der Trocknungseinrichtung für die Versuche zu Versuchsreihe 2

Tabelle 34: Varianten der Trocknung in Versuchsreihe 2

Versuch	Temperatur am Erhitzer in °C	Volumenstrom in m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	Schütthöhe in m
1 (Grundeinstellung)	85	600	2,3
2	70	600	2,3
3	55	600	2,3
4	85	450	2,3
5	85	300	2,3
6	85	600	0,75



Abbildung 75: Trocknungseinrichtung mit Erweiterung der Trocknungsbox auf eine Höhe von 2,3 m

Als Brennstoff kamen Holzhackschnitzel aus Waldrestholz zum Einsatz, die aus derselben Liefercharge stammten, die auch zu den Untersuchungen zur anaeroben Lagerung in abgedichteten Silos verwendet wurde (vgl. Unterkapitel 7.4). Um eine natürliche Trocknung der Brennstoffe vor dem jeweiligen Versuch zur technischen Trocknung so weit wie möglich zu unterbinden, wurden die Brennstoffe nach Anlieferung in Bigbags überführt, die anschließend mit einer Folie umwickelt und somit gasdicht verschlossen wurden.

Die Messgrößen zur Charakterisierung der technischen Trocknung waren die Trocknungsdauer, die Trocknerleistung, der Energiebedarf und der elektrische Wirkungsgrad der Trocknungsanlage. Eine Überprüfung des Zielwassergehalts sowie dessen Homogenität fand hierbei nicht statt, sondern erfolgte in Versuchsreihe 1.

Die Trocknerleistung wurde kontinuierlich über die Masseabnahme der Trocknungsbox in Kilogramm Wasserverlust pro Stunde Trocknungsdauer bestimmt ( $\text{kg h}^{-1}$ ). Der Energiebedarf setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf des Gebläses und des Lufterhitzers. Er wird neben dem durchschnittlichen Energiebedarf pro feste Zeiteinheit zudem als die benötigte Energie angegeben, die für die Verdunstung von 1 kg Wasser notwendig ist (spezifischer Energiebedarf in  $\text{kWh kg}^{-1}$ ).

Der Trocknerwirkungsgrad (in %) berechnet sich aus dem theoretischen Trocknungsvermögen und der tatsächlich eingetretenen Trocknung. Das theoretische Trocknungsvermögen (in kg Wasser) wird dabei energetisch über die Summe des Energiebedarfs des Gebläses ( $E_{\text{Gebläse}}$  in kWh) und des Lufterhitzers ( $E_{\text{Erhitzer}}$  in kWh) nach Formel (9.2) bestimmt:

$$\textit{Theoretisches Trocknungsvermögen} = \sum (E_{\text{Gebläse}} + E_{\text{Erhitzer}}) \times 3,6 \times \frac{1}{2,44} \quad (9.2)$$

Vereinfachend werden dabei die Wärmeabstrahlungsverluste des Motors und des Lufterhitzers in den Aufstellraum vernachlässigt. Das Gleiche gilt für den Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers, der jedoch bei elektrischen Widerstandsheizungen in der Nähe von 100 % liegt. Der Faktor 3,6 wird für die Umrechnung von kWh in MJ und der Faktor 2,44 für die Verdampfungswärme des Wassers in  $\text{MJ kg}^{-1}$  angewendet. Der energetische Trocknerwirkungsgrad (in %) berechnet sich anschließend aus dem Quotienten der tatsächlichen, absoluten Trocknungsarbeit (in kg Masseveränderung) und des theoretischen Trocknungsvermögens:

$$\textit{Energetischer Trocknerwirkungsgrad} = \frac{\textit{tatsächliche Trocknungsarbeit}}{\textit{theoretisches Trocknungsvermögen}} \quad (9.3)$$

### 9.3 Trocknungsversuche am hauseigenen Satztrockner

#### 9.3.1 Versuchsreihe 1 – Homogenität des Wassergehalts in der Schüttung

Der Ausgangswassergehalt für die Analysen in Versuchsreihe 1 lag bei  $36,7 \pm 1,3$  m-% und entsprach damit den Vorgaben für Holzhackschnitzellieferungen an das Heizwerk des TFZ. Die Brennstoffe waren demnach nicht mehr „waldfrisch“ [78]. Die Holzhack-

schnitzel entsprachen der Partikelgrößenklasse P45S mit 2,0 m-% Feinanteil und einer Schüttdichte von  $235 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$  (im Anlieferungszustand) [28].

Die Trocknung des ersten Durchgangs dauerte 52 h und 20 min bis zum Erreichen des errechneten mittleren Zielwassergehalts von 15 m-%. Anschließend erfolgte die Messung des Wassergehalts durch ein schichtweises Abtragen der Schüttung in der Trocknungsbox (Abbildung 72, links), um die darin verborgenen 39 Bilanzbeutel freizulegen. Die Wassergehalte dieser 39 Einzelmessungen sind in Abbildung 76 wiedergegeben.

Die unterste Schicht (0 bis 40 cm Höhe) zeigte die niedrigsten Wassergehalte von  $6,8 \pm 1,4 \text{ m}\%$ , gefolgt von der mittleren Schicht (40 bis 80 cm Höhe) mit durchschnittlich  $20,8 \pm 9,7 \text{ m}\%$  und der obersten Schicht (80 bis 120 cm) mit  $34,6 \pm 7,7 \text{ m}\%$ . Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Wassergehalt der untersten Schicht lag bei 5,1 Prozentpunkten. Die Schwankungsbreite stieg auf 29,3 Prozentpunkte (mittlere Schicht) und 24,1 Prozentpunkte (oberste Schicht). Stellenweise kam es sogar zu einer Erhöhung des Wassergehalts auf Werte  $> 40 \text{ m}\%$  (siehe Abbildung 76). Letzteres erfolgte vermutlich durch Kondensationsprozesse infolge der Abkühlung der mit Wasserdampf gesättigten Luft.

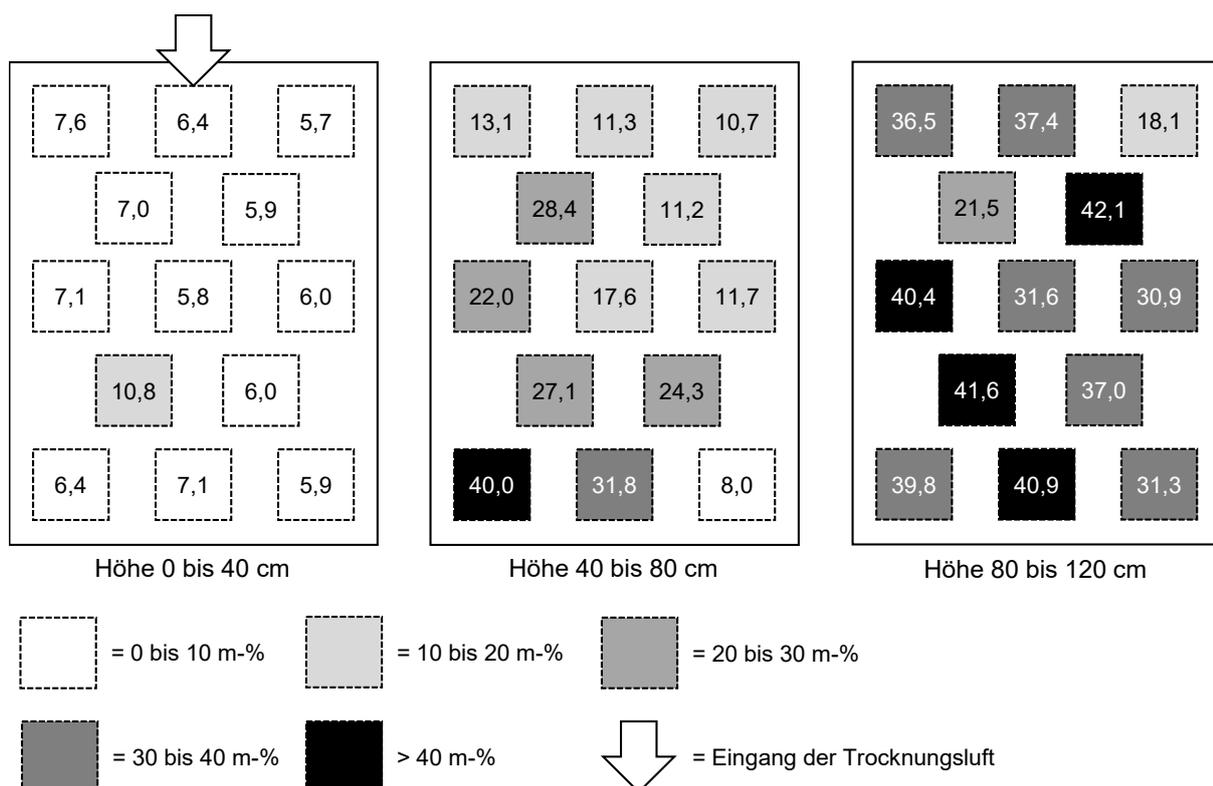


Abbildung 76: Wassergehalt der Holzhackschnitzel nach der Trocknung in der TFZ-Satztrocknung an jeweils 13 Positionen auf drei unterschiedlichen Höhen. Die Probenahme erfolgte durch schichtweises Abtragen der Brennstoffe nach der Trocknung.

Insgesamt zeigt sich beim ersten Trocknungsdurchgang eine starke Erhöhung der Inhomogenität beim Wassergehalt. Die Messwerte schwankten zwischen 5,8 und 42,1 m-%. Die Wertespanne umfasst somit Wassergehaltsbereiche, die sowohl als zu hoch (> 25 m-%) als auch als zu niedrig (< 10 m-%) für viele Kleinfeuerungsanlagen beschrieben werden. Folglich ist nach einer Satz Trocknung die Homogenisierung der Brennstoffe notwendig, bevor die Brennstoffe in einer Kleinfeuerungsanlage verbrannt werden können. In der Praxis könnte dies bereits durch Verladeprozesse während des Transports erfolgen, wie bereits in Kapitel 8 dargestellt. Zum Teil kommt es aber auch in einer ruhenden Hackschnitzelschüttung durch Sorptions- und Desorptionsvorgänge nach einiger Zeit zu einem Feuchtigkeitsausgleich zwischen den unterschiedlich getrockneten Bereichen. Das erfolgt über die in der Schüttung eingeschlossene Luft. Für besonders anspruchsvolle Kleinfeuerungsanlagen könnte aber ggf. ein zusätzlicher Homogenisierungsschritt empfehlenswert sein.

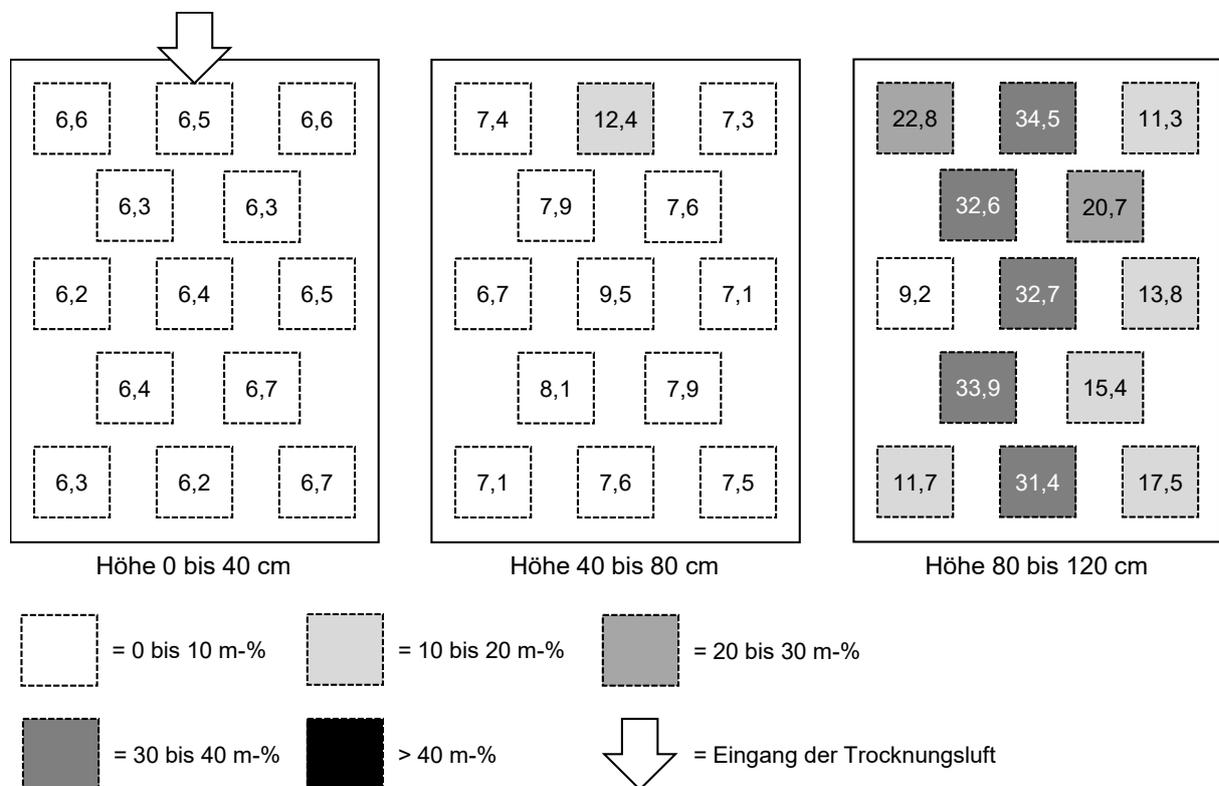


Abbildung 77: Wassergehalt der Holz hackschnitzeln nach der Trocknung in der TFZ-Satz Trocknung an jeweils 13 Positionen auf drei unterschiedlichen Höhen. Die Probenahme erfolgte durch die Messung mit Bilanzbeutel.

Die Trocknungsdauer im zweiten Durchgang lag bei 46 h und 41 min. Sie war damit kürzer als im ersten Durchgang. Erneut zeigten sich sehr trockene Bereiche im untersten Segment der Trocknungsbox mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von  $6,4 \pm 0,2$  m-% (Abbildung 77). Auch die mittlere Schicht war mit  $8,0 \pm 1,5$  m-% sehr trocken. Die oberste Schicht lag im Mittel bei  $22,1 \pm 9,1$  m-% und zeigte demnach den höchsten Mittelwert und die höchste Streuung auf. Auch im Fall des zweiten Durchgangs

könnte eine Homogenisierung der Schüttung vor der Verwendung der Brennstoffe in anspruchsvollen Kleinfeuerungsanlagen sinnvoll sein.

Im Gesamtmittel lag der Wassergehalt nach dem ersten Trocknungsdurchgang bei  $20,4 \pm 13,5$  m-%. Dies ist höher als der gewünschte Zielwassergehalt, der für die Trocknung auf 15 m-% eingestellt wurde. Beim zweiten Trocknungsdurchgang wurde ein durchschnittlicher Wassergehalt von  $12,2 \pm 9,0$  m-% erreicht, der dem Zielwassergehalt somit sehr nahe kommt, diesen allerdings sogar unterschreitet. Da der Ausgangswassergehalt sowie die Ausgangs- und Endmasse jeweils mit einer sehr hohen Genauigkeit bestimmt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der reale Wassergehalt (Referenzwert) der gesamten Schüttung tatsächlich bei 15 m-% liegt. Dies konnte in früheren Versuchen am TFZ bestätigt werden, im Rahmen derer Brennstoffe für Verbrennungsversuche auf einen festen Zielwassergehalt getrocknet wurden, die nach einer anschließenden Homogenisierung diesen Wert auch jeweils einhielten. Die beobachteten Abweichungen gegenüber dem Zielwert verdeutlichen somit die Schwierigkeit einer repräsentativen Probenahme, die bei einer derartig hohen Inhomogenität auftreten kann.

Die in der Praxis häufig anzutreffende „Übertrocknung“ der Brennstoffe, bei der die Holzhackschnitzel komplett durchgetrocknet werden, mag insgesamt zu einer geringen Schwankungsbreite im Wassergehalt führen. Als Folge sind die Brennstoffe aber für viele Feuerungen ungeeignet, da es bei zu trockenen Brennstoffen zu überhöhten Temperaturen im Brennraum und damit zur Bildung von Schlacke kommen kann [68] [86]. Auch erhöht sich die Gefahr des Rückbrands in der Förderschnecke. Eine unnötige Verlängerung der Trocknungsdauer erhöht zudem den Energieaufwand für die verwendeten Gebläse und ggf. für die Wärmequelle (vgl. Versuchsreihe 2 in Abschnitt 9.3.2). Hierdurch entstehen unnötige Kosten, die durch sorgfältige Planung vermieden werden können.

### 9.3.2 Versuchsreihe 2 – Energetische Optimierung der Trocknung

Die in Versuchsreihe 2 verwendeten Holzhackschnitzel wurden ebenfalls aus Waldrestholz produziert. Sie entstammten derselben Lieferung, die auch für die Versuchsreihe B in Kapitel 7 verwendet wurde (vgl. Unterkapitel 7.4). Ihr Ausgangswassergehalt lag bei  $41,1 \pm 1,1$  m-% ( $n = 10$ ) und war demnach nicht mehr als „waldfrisch“ einzuordnen [78]. Die Partikelgröße entsprach P63 nach DIN EN ISO 17225-1 mit einem Feinanteil von  $< 6$  m-% [27]. Aufgrund der Versuchsdauer kam es bei den einzelnen Chargen zu einer leichten natürlichen Trocknung vor Beginn der eigentlichen Trocknungsversuche. Der Wassergehalt zu Beginn der Versuche lag jedoch nie unterhalb von 36,7 m-% (Tabelle 35).

Die Trocknungsdauer der einzelnen Chargen schwankte zwischen 13,0 und 83,3 Stunden (Tabelle 35). Am schnellsten erfolgte die Trocknung der Charge 6, was sich durch die deutlich geringere Schütthöhe und damit die stark reduzierte Masse zu trocknenden Guts erklären lässt. Eine Verringerung der Temperatur sowohl des Heizregisters als auch des Volumenstroms hatte eine Verlängerung der Trocknungsdauer zur Folge.

Tabelle 35: Ausgangsvariablen und Trocknungsdauer der unterschiedlichen Trocknungsversuche in Versuchsreihe 2

Charge	Temperatur Heizregister  in °C	Gebläse- leistung  in m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	Füllhöhe  in m	Anfangs- wasser- gehalt in m-%	Trocknungs- dauer bis W = 15 %-m in Tagen	Trocknungs- dauer bis W = 15 %-m in Stunden
1 (Referenz)	<b>85</b>	600	2,30	41,1	2,10	50,5
2	<b>70</b>	600	2,30	36,7	1,85	44,3
3	<b>55</b>	600	2,30	40,0	3,22	77,3
4	85	<b>450</b>	2,30	39,1	2,08	49,8
5	85	<b>300</b>	2,30	39,0	3,47	83,3
6	85	600	<b>0,75</b>	37,7	0,54	13,0

Abbildung 78 illustriert einen typischen Verlauf der einzelnen Messparameter in der Satz-trocknung des TFZ. Der Volumenstrom und die Energieverbräuche des Luftherhitzers und des Gebläses waren in allen Versuchen nahezu konstant. Aufgrund der Verwendung eines Luftherhitzers kam es zu einer deutlichen Temperaturerhöhung der Trocknungsluft. Durch die hierdurch bedingte Luftausdehnung stieg auch der Volumenstrom direkt vor der Satz-trocknung. Innerhalb der Trocknungsbox kühlte sich die Luft durch die Verdampfung des Wassers im Brennstoff wieder schnell ab.

Bei fortschreitender Trocknung der Charge konnte ein Temperaturanstieg in den unteren Bereichen der Trocknungskiste beobachtet werden (Abbildung 78). Dieser erreichte das-selbe Niveau, das für die Temperatur der Trocknungsluft direkt vor der Satz-trocknung gemessen worden war. Der Temperaturanstieg konnte i. d. R. nur bei der untersten Temperatursensorposition T1 (0,5 m Höhe), stellenweise auch bei T2 (1,0 m Höhe) beobachtet werden.

Die relative Luftfeuchte der Ansaugluft schwankte i. d. R. über den gesamten Trock-nungsverlauf. Durch Erhitzung der Trocknungsluft kam es zu einer deutlichen Absen-kung der relativen Luftfeuchte am Eingang in die Trocknungsbox. In den meisten Fällen war die Luft am Trocknerausgang über den gesamten Trocknungszeitraum hinweg ge-sättigt. Sie entsprach demnach fast durchgängig 100 % (Abbildung 78).

Die durchschnittlichen Temperaturen außerhalb der Trocknungsanlage sind in Tabelle 36 wiedergegeben. Die Ansaugluft und die Temperatur am Turbinenradgaszähler („Temperatur Volumenstrommessung“) schwankte um einen Wert von 25 °C. Aufgrund der Erwärmung der Trocknungsluft mittels des elektrisch beheizbaren Heißwasser-Luftherhitzers wurde am Eingang der Trocknungsbox eine durchschnittliche Trocknungs-lufttemperatur von 56,9 bis 63,3 °C (bei einer Voreinstellung von 85 °C im Kreislaufwas-ser im Luftherhitzer) gemessen. Diese Differenz ergibt sich aus der Auslegung des Wär-meübertragers im Luftherhitzer. Eine weitere Abkühlung erfolgt bei der Zuleitung in die Trocknungskiste, wobei hierfür ein nicht isolierter Kunststoffschlauch verwendet wurde (vgl. Abbildung 75).

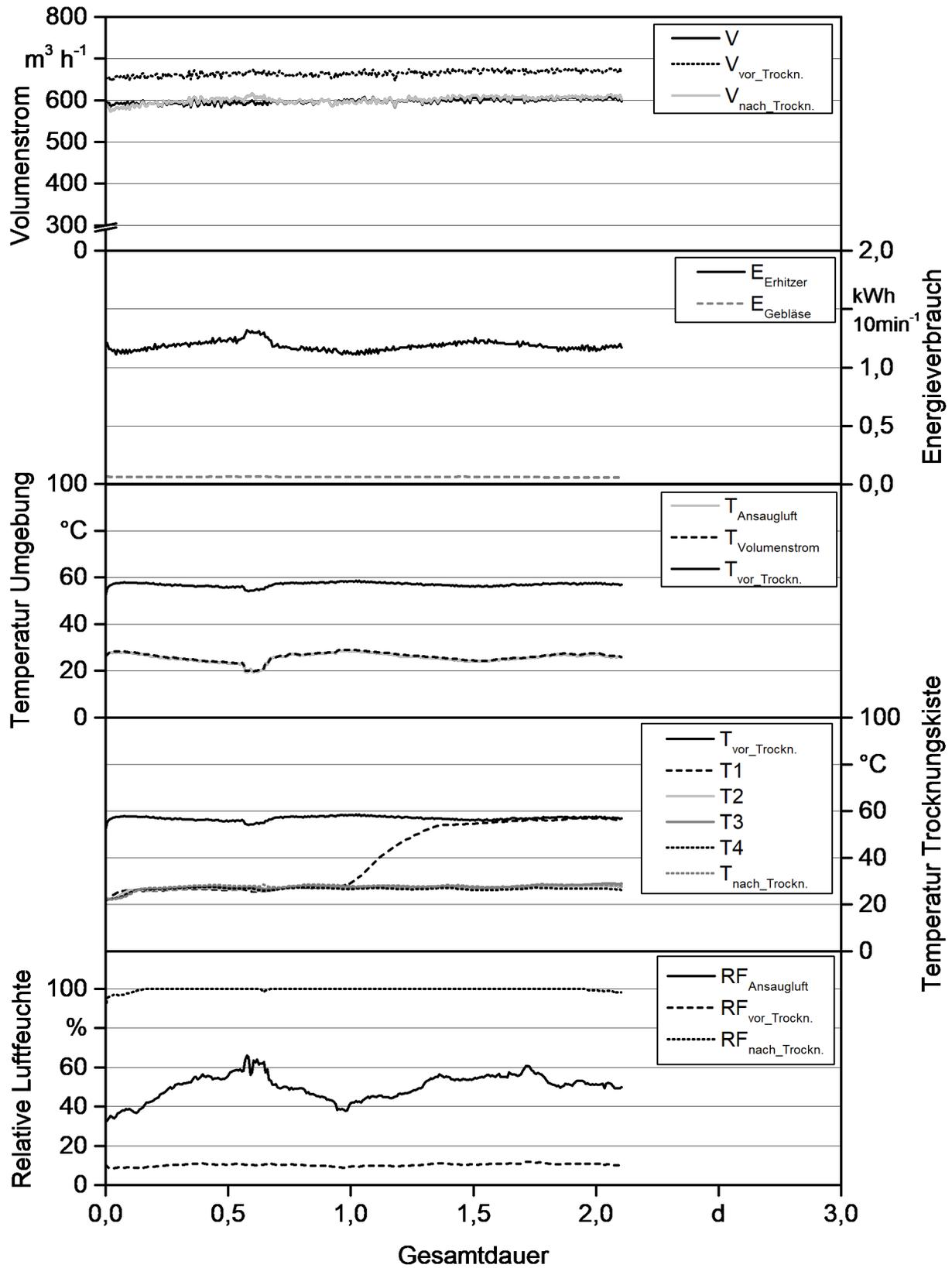


Abbildung 78: Zeitlicher Trocknungsverlauf der Referenzdrying (Beispiel)

Tabelle 36: Mittlere Temperaturen in °C ( $\pm$  Standardabweichung) bis zum Erreichen des Zielwassergehalts während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2

Charge	Temperatur Ansaugluft	Temperatur Volumenstrommessung	Temperatur Trocknungskiste Eingang	Temperatur Trocknungskiste Ausgang
1 (Referenz)	25,4 $\pm$ 1,8	26,1 $\pm$ 1,9	56,9 $\pm$ 1,0	27,4 $\pm$ 1,1
2	24,9 $\pm$ 2,6	25,8 $\pm$ 2,8	48,8 $\pm$ 1,4	26,2 $\pm$ 1,2
3	25,5 $\pm$ 1,7	26,5 $\pm$ 1,7	41,1 $\pm$ 0,8	23,9 $\pm$ 0,9
4	23,4 $\pm$ 2,3	23,7 $\pm$ 2,4	58,7 $\pm$ 2,6	26,5 $\pm$ 1,8
5	27,1 $\pm$ 2,0	27,2 $\pm$ 2,1	63,3 $\pm$ 1,5	28,4 $\pm$ 1,6
6	23,4 $\pm$ 1,9	24,0 $\pm$ 1,9	55,8 $\pm$ 1,0	26,8 $\pm$ 2,7

Eine Verringerung des Volumenstroms (Chargen 4 und 5) führte zu einer Erhöhung der Trocknungstemperatur (Tabelle 36). Vermutlich kam es durch die geringere Luftbewegung insgesamt zu einer geringeren Abkühlung der Trocknungsluft. Die Temperatur der Luft am Trocknerausgang entsprach somit fast den Temperaturen der Umgebungsluft, denn sie war im Vergleich zu dieser nur um maximal 3,4 K erhöht.

Der Volumenstrom ( $V$  in  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ , gemessen über den Turbinenradgaszähler) war über die gesamte Versuchsdauer sehr konstant (vgl. Abbildung 78 und Tabelle 37). Die gewünschten Voreinstellungen ( $600 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ ,  $450 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$  und  $300 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ ) konnten sehr genau erreicht werden. Aufgrund der Temperaturerhöhung durch den Lufterhitzer verändert sich das tatsächliche Luftvolumen, das in den Trockner geleitet wird. Die Berechnung hierzu ist in Formel (9.4) dargestellt, wobei  $V_0$  den Volumenstrom am Turbinenradgaszähler und  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz in Kelvin (K) darstellt:

$$\Delta V = \frac{1}{273 \text{ K}} \times V_0 \times \Delta T \quad (9.4)$$

Folglich steigt zwar der tatsächliche Volumenstrom durch die Erwärmung vor der Trocknung an. Aufgrund von Abkühlungsprozessen innerhalb der Trocknungsbox gleicht sich dieser Effekt jedoch rasch wieder aus (vgl. Abbildung 78).

Die mittlere relative Luftfeuchte der Ansaugluft schwankte zwischen den Versuchschargen von 46,4 bis 64,0 % (Tabelle 37). Aufgrund der Erhitzung der Trocknungsluft sank die relative Luftfeuchte am Eingang in die Satztrocknung auf Werte zwischen 8,3 und 20 %. Dies war stark von der Temperatur der Trocknungsluft abhängig, weshalb die niedrigsten Werte für die Trocknung von Charge 5 und die höchsten für die Trocknung von Charge 3 gemessen wurden (vgl. Tabelle 36 und Tabelle 37).

**Tabelle 37:** *Mittlere relative Luftfeuchte und mittlerer Volumenstrom ( $\pm$  Standardabweichung) der Ansaugluft und bei Eingang in die Trocknungskiste während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2*

Charge	rel. Feuchte Ansaugluft in %	Volumenstrom Ansaugluft in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	rel. Feuchte Trocknungskiste Eingang in %	Volumenstrom Trocknungskiste Eingang in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
1 (Referenz)	$50,1 \pm 6,5$	$597 \pm 6$	$10,2 \pm 0,7$	$665 \pm 7$
2	$62,1 \pm 8,9$	$599 \pm 5$	$17,2 \pm 1,4$	$650 \pm 7$
3	$46,4 \pm 6,4$	$598 \pm 5$	$20,0 \pm 1,9$	$627 \pm 5$
4	$64,0 \pm 8,2$	$449 \pm 3$	$10,8 \pm 4,2$	$507 \pm 5$
5	$47,8 \pm 9,0$	$307 \pm 2$	$8,3 \pm 1,3$	$346 \pm 3$
6	$47,1 \pm 4,7$	$607 \pm 2$	$9,1 \pm 0,4$	$678 \pm 3$

Je nach Charge wurden insgesamt 73,5 bis 312,6 kg Wasser aus den Brennstoffen verdunstet (Tabelle 38). Neben der Gesamtmasse an Brennstoff war hierfür vor allem der Ausgangswassergehalt verantwortlich.

**Tabelle 38:** *Absolute Trocknungsarbeit, mittlere Trocknungsleistung ( $\pm$  Standardabweichung) und Trocknerwirkungsgrad während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2*

Charge	Trocknungsarbeit in kg Wasser (absolut)	Trocknungsleistung in $\text{kg h}^{-1}$
1 (Referenz)	312,6	$6,2 \pm 1,3$
2	222,3	$5,0 \pm 0,9$
3	285,2	$3,7 \pm 0,8$
4	285,2	$4,7 \pm 0,7$
5	235,0	$3,8 \pm 0,5$
6	73,5	$5,7 \pm 1,6$

Die Trocknerleistung kann aus der Trocknungsdauer und der Masseveränderung der Charge berechnet werden. Diese betrug je nach Versuch 3,7 bis  $6,2 \text{ kg h}^{-1}$  (Tabelle 38). Die beste Trocknerleistung wurde bei der Referenz-trocknung und der Trocknung bei geringer Schütthöhe von nur 0,75 statt 2,3 m erzielt (Charge 6). Bezogen auf die Trocknungsdauer nahm die Trocknerleistung sowohl mit einer niedrigeren Trocknungstemperatur (Chargen 2 und 3) als auch mit einem niedrigeren Volumenstrom stark ab (Chargen 4 und 5). Vor allem bei einer Reduzierung der Trocknungstemperatur um 30 % (von Charge 1 auf Charge 3) oder bei einer Halbierung des Volumenstroms (von Charge 1 auf Charge 5) kam es zu einer Reduzierung der Trocknerleistung von 40 %.

**Tabelle 39:** *Absoluter und mittlerer Energiebedarf des Gebläses und des Luftherhitzers ( $\pm$  Standardabweichung) während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2*

Charge	Gesamtenergiebedarf des Gebläses in kWh	Mittlerer Energiebedarf des Gebläses in kWh 10 min <sup>-1</sup>	Gesamtenergiebedarf des Luftherhitzers in kWh	Mittlerer Energiebedarf des Luftherhitzers in kWh 10 min <sup>-1</sup>
1 (Referenz)	19,3	0,06 $\pm$ 0,00	358,9	1,18 $\pm$ 0,04
2	17,1	0,06 $\pm$ 0,00	240,1	0,90 $\pm$ 0,06
3	29,9	0,06 $\pm$ 0,00	263,1	0,57 $\pm$ 0,04
4	10,7	0,04 $\pm$ 0,00	320,5	1,07 $\pm$ 0,04
5	11,1	0,02 $\pm$ 0,00	404,0	0,81 $\pm$ 0,04
6	5,0	0,06 $\pm$ 0,00	96,9	1,24 $\pm$ 0,04

Der Energiebedarf der Trocknung hängt vor allem vom Energiebedarf des Luftherhitzers ab. Je nach Einstellung der Satztrocknung macht der Luftherhitzer 90 bis 97 % des Gesamtenergiebedarfs aus (Tabelle 39, Tabelle 40).

**Tabelle 40:** *Gesamtenergiebedarf und spezifischer Energiebedarf in MJ kg<sup>-1</sup> Wasserverdampfung während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2*

Charge	Gesamtenergiebedarf in kWh	Gesamtenergiebedarf in MJ	Spezifischer Energiebedarf in MJ kg <sup>-1</sup> Trocknung
1 (Referenz)	378,2	1361,1	4,4
2	257,2	925,9	4,2
3	293,0	1054,8	3,7
4	331,2	1192,1	5,1
5	415,1	1494,2	5,8
6	101,9	366,8	5,0

Bezieht man den Gesamtenergiebedarf auf die Masse an Wasser, die durch die Trocknung aus den Brennstoffen entfernt wurde, ergibt sich der spezifische Energiebedarf (Tabelle 40). Dieser schwankt je nach Einstellung zwischen 3,7 und 5,8 MJ kg<sup>-1</sup>. Eine Verringerung der Trocknungstemperatur (von 70 auf 55 °C Heizregistereinstellung in Variante 2 und 3) bewirkt eine Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs, da zwar die Trocknungsdauer erhöht wird, der durchschnittliche Energiebedarf jedoch sinkt, weil mit dem etwas höheren Wassergehalt (vgl. Tabelle 35) auch mehr leicht verdampfendes, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen vorhanden ist. Im Gegensatz dazu erhöht sich bei einem geringeren Volumenstrom die Dauer der Trocknung deutlich, wobei der

mittlere Energiebedarf durch dieselbe Einstellung des Lufterhitzers nahezu gleich bleibt. Als Folge steigt hier der spezifische Energiebedarf durch Reduzierung des Volumenstroms auf bis zu  $5,8 \text{ MJ kg}^{-1}$  Wasser an.

*Tabelle 41: Theoretisches Trocknungsvermögen und elektrischer Trocknerwirkungsgrad während der Trocknungsversuche aus Versuchsreihe 2*

Charge	Theoretisches Trocknungsvermögen in kg Wasser	Elektrischer Trocknerwirkungsgrad in %
1 (Referenz)	558,0	56
2	379,5	59
3	432,3	66
4	488,6	48
5	612,4	42
6	150,3	49

Aus dem Gesamtenergiebedarf lässt sich das theoretische Trocknungsvermögen der Anlage berechnen. Hierbei wird die eingesetzte Energie (in MJ) durch den Faktor 2,44 geteilt. Dies entspricht der spezifischen Wärmemenge (in MJ), die für das Verdampfen von 1 kg Wasser bei  $25^\circ\text{C}$  benötigt wird [68]. Das theoretische Trocknungsvermögen lag demnach je Versuch zwischen 150,3 und 612,4 kg Wasser (Tabelle 41).

Bildet man den Quotienten zwischen theoretischem Trocknungsvermögen und der tatsächlichen Trocknungsarbeit (jeweils in kg Wasser) ergibt sich der Trocknungswirkungsgrad der Anlage (in %). Dieser lag bei der Satzrocknung des TFZ zwischen 42 und 66 % (Tabelle 41). Er entspricht somit typischen Werten für Satzrockner aus der Praxis [68]. Ausschlaggebend für den elektrischen Wirkungsgrad waren der durchschnittliche Energiebedarf und die Trocknungsdauer. So zeigte sich, dass die Trocknungsvariante 3 (niedrige Trocknungstemperatur) den besten Wirkungsgrad hatte (66 %). Gleichzeitig war die Trocknerleistung mit  $3,7 \text{ kg h}^{-1}$  am geringsten. Die schnellste Trocknung erfolgte mit der Referenzeinstellung (maximaler Volumenstrom, maximale Trocknungstemperatur). Dies ist aus rein energetischer Sicht jedoch nicht zu empfehlen, da hier nur ein Wirkungsgrad von 56 % erzielt wurde. Besonders negativ fielen die Versuche mit einer Verringerung des Volumenstroms auf, welche die Trocknungsdauer stark erhöhte und dadurch den Wirkungsgrad senkte.

Die optimale Einstellung für die Satzrocknung des TFZ ergibt sich somit aus der verfahrenstechnischen Frage, wie schnell das zu trocknende Gut benötigt wird. Ist eine längere Trocknung möglich, sollte die Temperatur des Lufterhitzers reduziert werden. Hierdurch ist eine energetische Wirkungsgradsteigerung von 10 % möglich. Alternativ könnten die Brennstoffe ab einer bestimmten Außentemperatur auch mit Kaltluft belüftet werden, wobei überhaupt keine Energie für den Lufterhitzer benötigt wird. Hier könnte ein möglichst

hoher Volumenstrom zielführend sein, da die zeitliche Trocknerleistung (in kg Wasser  $\text{h}^{-1}$ ) mit reduziertem Volumenstrom stark abnahm.

Für industrielle Anlagen stellt sich vornehmlich die Frage nach der Wärmequelle. Steht diese kostengünstig, ggf. sogar kostenlos zur Verfügung, wie es bei vielen Biogasanlagen der Fall ist, kann die Trocknung durch energiesparende Gebläse optimiert werden. Je nach Betriebskonzept lässt sich jedoch eine große Menge an Energie einsparen, wenn die Trocknungswärme gezielt reduziert werden kann. Dabei sind für die jeweilige Anlage auch ökonomische Aspekte zu beachten, vor allem bezüglich der Masse an Brennstoff, die in einer festgelegten Zeit getrocknet werden soll. Ist nur eine geringe Durchsatzrate vonnöten, könnte auch im industriellen Maßstab die energetische Trocknerleistung durch eine Verringerung der Trocknerwärme optimiert werden. Ist ein hoher Trocknerdurchsatz gewünscht, müssen die Trocknungstemperatur und der Volumenstrom entsprechend angepasst werden.

Eine Verringerung der Schüttguthöhe hatte in den hier dargestellten Versuchen nur einen geringen Einfluss auf die Trocknerleistung und den elektrischen Wirkungsgrad. In der Praxis könnte dies allerdings zu einer deutlichen Reduzierung des Belüftungswiderstands führen und den Einbau besonders energiesparender Gebläse ermöglichen [80]. Als Folge müsste der jeweilige Trockner allerdings häufiger befüllt und entleert werden.

#### 9.4 Schlussfolgerung der Trocknungsversuche

Die Ergebnisse der Trocknungsversuche am TFZ zeigten sowohl in Versuchsreihe 1 als auch in Versuchsreihe 2 wesentliche Aspekte auf, die bei der technischen Brennstofftrocknung beachtet werden müssen. Die in Versuchsreihe 1 beobachtete Zunahme der Inhomogenität beim Wassergehalt, die sich durch die Trocknung einstellt, könnte zu Problemen bei der Verbrennung in Kleinf Feuerungsanlagen führen. In den Versuchen kamen im Trocknungsgut Teilbereiche mit  $< 10 \text{ m-\%}$  wie auch mit  $> 40 \text{ m-\%}$  vor. Bei einem solchen Trocknungsergebnis ist anschließend auf eine ausreichende Durchmischung des Brennstoffs aus allen Trocknerbereichen zu achten. Geeignete Betriebskonzepte können diese Vermischung bereits in der Prozesskette gewährleisten (vgl. Kapitel 8). Vor allem bei selbstkonstruierten, kleinen Trocknungsanlagen, bei denen direkt vom Trocknungscontainer in den Brennstoffbunker gekippt wird, ist ein zusätzlicher Homogenisierungsschritt, beispielsweise mit einem Radlader, empfehlenswert.

Versuchsreihe 2 zeigte deutlich, dass der energetische Wirkungsgrad der technischen Trocknung stark von der Wärmequelle abhängt. Muss die Wärme für die Trocknung eigens erzeugt werden, kann der Wärmearaufwand für die Trocknung durch Anpassung der maximalen Trocknungstemperatur optimiert werden. Hierbei bilden Effizienz und Durchsatzleistung gegenläufige Ziele, die nach Kostengesichtspunkten zu beurteilen sind.

Insgesamt zeigen die Versuche am selbstkonstruierten Satzrockner des TFZ relevante Aspekte auf, die vor allem die landwirtschaftliche Praxis bei der Entwicklung eigener Lö-

sungen unterstützen kann. Gleichzeitig bieten die Ergebnisse eine Orientierung für die energetische Optimierung großtechnischer Anlagen.

## **10 Identifikation des maximalen Wassergehalts für volle Lagerstabilität**

HOFMANN, N.; BORCHERT, H.

### **10.1 Problem- und Zielstellung**

In waldfrischen Holzhackschnitzeln treten überwiegend durch mikrobielle Aktivität, aber auch durch chemisch-physikalische Vorgänge erhebliche Zersetzungsprozesse auf. Diese können vor allem in den ersten Wochen der Lagerung zu einem Trockenmasseverlust von bis zu 4 % pro Monat führen und somit den Gehalt an nutzbarer Energie deutlich verringern [60]. Die Zersetzung kann verhindert oder zumindest stark eingeschränkt werden, wenn die Holzhackschnitzel vor der Einlagerung technisch auf einen für mikrobielle Aktivität ungünstigen Wassergehalt getrocknet werden. Die technische Trocknung von Holzhackschnitzeln wird in der Praxis oftmals auch genutzt, um einen Wassergehalt zu erreichen, der für einen effizienten und emissionsarmen Betrieb der Feuerungsanlage notwendig ist (vgl. Kapitel 9 und 12). Allerdings werden dabei die Holzhackschnitzel regelmäßig auf sehr niedrige Wassergehalte (von deutlich unter 15 m-%) getrocknet, was viel Energie benötigt und auch nachteilig für die Feuerungsanlage sein kann. Zudem wird keine weitere positive Wirkung auf die Lagerstabilität erwartet, wenn die Holzhackschnitzel übertrocknet werden. Der maximale Wassergehalt von Holzhackschnitzeln, der Lagerstabilität garantiert, wurde jedoch bisher noch nicht intensiv untersucht und ist entsprechend unbekannt. Laut Literaturangaben liegt er in einem Bereich zwischen 15 m-% [72] und 30 m-% [96].

Ziel dieser Teilstudie war es, den Bereich des maximalen Wassergehalts, der eine volle Lagerstabilität von Holzhackschnitzeln gewährleistet, näher zu bestimmen, um künftig nur bis zu diesem Punkt technisch trocknen zu müssen und dadurch gegebenenfalls erhebliche Energieeinsparungen bei der Trocknung erreichen zu können. Die Ergebnisse ermöglichen zudem die Einschätzung, ob ein tatsächlich lagerstabiler Wassergehalt auch durch eine natürliche Trocknung in Mieten und in Poltern im Sommer, ggf. mit nachfolgender Homogenisierung oder durch Entfernen der feuchten Deckschicht, erreicht werden kann.

### **10.2 Material und Methoden**

#### **10.2.1 Praktische Durchführung**

Zur Beantwortung dieser Fragestellung erschien ein reiner Freilandversuch mit zahlreichen Holzhackschnitzelmieten im Praxismaßstab nicht realistisch umsetzbar. Die hohe Bandbreite zu untersuchender Wassergehalte hätte die homogene Trocknung sehr großer Holzhackschnitzelmengen auf viele verschiedene Zielwassergehalte erfordert, was technisch, zeitlich und finanziell nicht im notwendigen Umfang durchführbar gewesen wäre. Zudem galt die Annahme, dass sich der Wassergehalt der zielgenau getrockneten Holzhackschnitzel über die Lagerungsperiode voraussichtlich verändern würde und so-

mit keine Aussage zu einem ganz bestimmten Wassergehalt mehr möglich gewesen wäre.

Aus diesem Grund wurde – ähnlich wie bei den Sickerwasserversuchen (Kapitel 13) – eine Kombination aus Freiland- und Laborversuchen gewählt. Hierzu wurden im Februar 2018 die beiden Hauptsortimente Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel, überwiegend aus Fichte, offen im Freien gelagert (Lagerplatz Freising, Oberbayern, 48°24'32.3"N 11°42'55.1"E). Anschließend wurden aus beiden Sortimenten im wöchentlichen Turnus bis Mai 2018 Proben zur Untersuchung der Lagerstabilität entnommen.

Die Probenmenge sollte relativ klein sein, um den Aufwand für die technische Trocknung sowie die anschließende Lagerung der Probe möglichst gering zu halten und somit die Analyse einer großen Anzahl an Proben zu erlauben. Dies sollte zusätzlich durch eine möglichst kurze Lagerungsdauer unterstützt werden, die gleichzeitig für die Erhaltung eines konstanten Wassergehalts vorteilhaft war. Die kleine Probenmenge und die kurze Lagerungsdauer führten jedoch dazu, dass eine Messung des Trockenmasseverlusts über eine Masseänderung nicht hinreichend exakt erschien, auch da die Trockenmasse der Probe bei Einlagerung nur über den Wassergehalt von Referenzproben ermittelt werden kann, dieser aber immer geringe Abweichungen aufweist. Genauere Ergebnisse zu Zersetzungsprozessen sollten durch eine Messung der Sauerstoffkonzentration in der Umgebungsluft von Holzhackschnitzeln erreicht werden. Hintergrund ist, dass jegliche Trockenmassezersetzung mit einem Sauerstoffverbrauch einhergeht. Ein Rückgang der Sauerstoffkonzentration zeigt also einen instabilen Lagerungszustand. Wie groß der Sauerstoffverbrauch bei einem bestimmten Trockenmasseverlust ist, lässt sich stöchiometrisch berechnen (siehe Abschnitt 10.2.3). Dazu muss die Probe luftdicht eingeschlossen sein, was zudem den Vorteil hat, dass keine Wassergehaltsänderung durch Verdunstung mehr möglich ist (vgl. Kapitel 7).

Bei zahlreichen Vorversuchen im Herbst 2017 zeigte sich, dass die Lagerung der Holzhackschnitzelproben in luftdicht verschlossenen 10-l-Eimern über eine Dauer von 48 Stunden aussagekräftige Ergebnisse zum lagerstabilen Wassergehalt ermöglicht (vgl. Unterkapitel 10.3). Im Zuge dieser Vorversuche stellte sich heraus, dass die Lagerungstemperatur einen deutlichen Einfluss auf die Sauerstoffabnahme hatte. Deshalb wurden im Hauptversuch (Unterkapitel 10.4) alle Wassergehaltsstufen sowohl bei  $21 \pm 2 \text{ °C}$  als auch bei  $34 \pm 1 \text{ °C}$  untersucht. Die tatsächliche Temperatur in Mieten aus technisch getrockneten Holzhackschnitzeln war nicht bekannt und dürfte von vielen Faktoren abhängen (Jahreszeit, geografische Lage, Wassergehalt der Holzhackschnitzel, Schütthöhe etc.). Der Wassergehaltsbereich, bei dem relevante Abbauprozesse einsetzen, konnte bei den Vorversuchen auf ca. 15 bis 25 m-% eingegrenzt werden. Dennoch sollten zur Kontrolle auch Proben außerhalb dieses Bereichs berücksichtigt werden.

Insgesamt wurden so im Hauptversuch über einen Zeitraum von drei Monaten 96 Proben je Sortiment mit Wassergehalten von 3 bis 32 m-% untersucht. Die Versuchshackschnitzel wurden dabei immer unterhalb der Deckschicht entnommen, da die Deckschicht einen nur vergleichsweise geringen Anteil am Gesamtvolumen einer Miete besitzt und somit weniger repräsentativ für die Fragestellung in diesem Versuch war. Aus

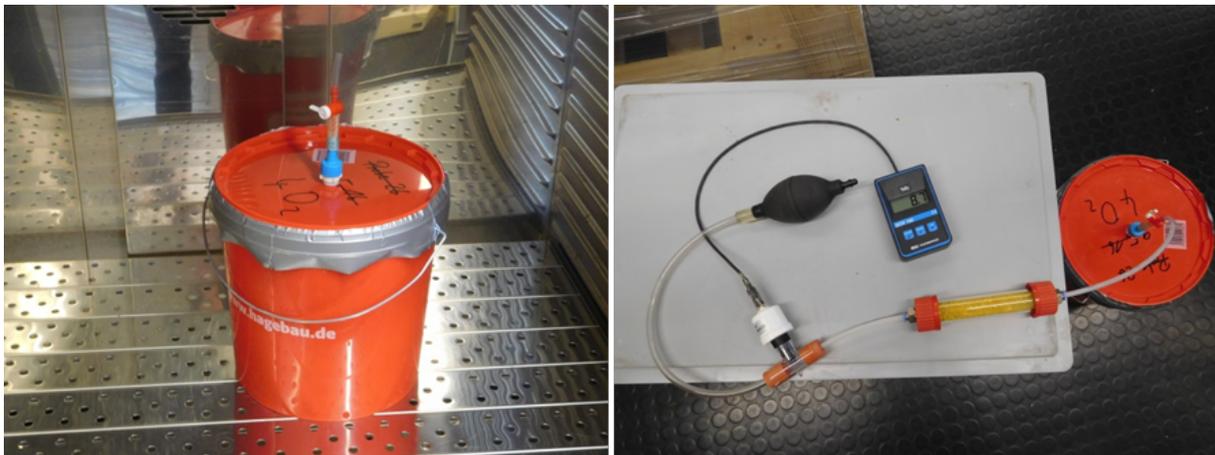
der homogenisierten Entnahmemenge wurden neben den eigentlichen Versuchshackschnitzeln für die Eimer bei jeder Beprobung zehn Wassergehaltsproben genommen, um den Ausgangswassergehalt der Holz hackschnitzel möglichst exakt zu bestimmen. Insgesamt wurden pro Probenahmetermin 16 Proben gewonnen (Abbildung 79), wobei die Eimer zunächst immer randvoll befüllt und dann durch Umverteilen der Holz hackschnitzel alle auf dieselbe Nettomasse gebracht wurden. Die 16 Eimer wurden anschließend in zwei Chargen à acht Proben geteilt.



*Abbildung 79: Holz hackschnitzelproben (hier des Sortiments Energierundholz) für die Untersuchung des lagerstabilen Wassergehalts nach Entnahme aus der Schüttung und Homogenisierung*

Danach wurden die Holz hackschnitzel aus den Eimern, um eine homogene Trocknung zu ermöglichen, in flachen Kunststoffboxen unter regelmäßiger Durchmischung bei 60 °C in Trockenschränken auf zuvor festgelegte Zielwassergehalte getrocknet. Die Holz hackschnitzelmasse, die zum Erreichen der Zielwassergehalte erforderlich war, wurde aus dem Wassergehalt der Referenzproben und der Ausgangsmasse der feuchten Holz hackschnitzel in den Boxen errechnet. Nach der Trocknung wurden die Holz hackschnitzel wieder in die entsprechenden Eimer gegeben und mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur ruhen gelassen, damit sich etwaige Rest-Inhomogenitäten im Wassergehalt ausgleichen konnten. Danach wurden die Eimer geöffnet, belüftet und anschließend luft-

dicht mit Klebeband verschlossen. Die Trocknungstemperatur von 60 °C wurde gewählt, da dies auch bei der technischen Holzhackschnitzeltrocknung in der Praxis ein realistischer Wert ist (vgl. Kapitel 9). Nach dem luftdichten Verschließen wurde für eine Dauer von 48 Stunden eine Charge bei  $21 \pm 2$  °C im Büro gelagert, die andere bei  $34 \pm 1$  °C im Trockenschrank. Anschließend wurde über ein Ventil im Deckel der Eimer die darin enthaltene Luft mithilfe einer Handpumpe zu einem Sauerstoffsensoren (GOX 100, GHM Messtechnik GmbH) gesaugt und die (Rest-)Sauerstoffkonzentration gemessen (Abbildung 80). Um am Sensor konstante Messbedingungen zu erhalten, wurde die angesaugte Luft zur Entfeuchtung und Abkühlung durch eine Kartusche mit Trockenmittel (Kieselgel) geleitet. Zudem wurde jede Messung mit exakt 20 Pumpstößen durchgeführt, da zuvor ein Laborversuch mit Stickstoff gezeigt hatte, dass dann eine komplette Umspülung des Sensors mit der angesaugten Luft gewährleistet ist. Nach der Sauerstoffmessung wurde der komplette Eimerinhalt bei 105 °C für 48 Stunden darrgetrocknet und dadurch der tatsächliche Wassergehalt ermittelt.



*Abbildung 80: Luftdicht verschlossener Eimer mit Ventilkonstruktion im Deckel, gefüllt mit Holzhacken (links). Messung der Sauerstoffkonzentration im Eimer nach 48 Stunden Lagerung (rechts)*

Um herauszufinden, ob der Stoffwechsel der Mikroorganismen und somit die Sauerstoffabnahmerate von der verfügbaren Sauerstoffkonzentration abhängen, wurde ein Nebenversuch mit insgesamt drei Durchgängen durchgeführt. Homogenisierte Holzhacken wurden in mehrere Eimer gefüllt, diese luftdicht verschlossen und bei  $21 \pm 2$  °C im Büro gelagert. Anschließend wurde in einer festgelegten Zeitfolge in jedem Eimer der Restsauerstoff gemessen. Nach der Sauerstoffmessung wurde der jeweilige Eimer aus dem Versuch genommen.

Zusätzlich wurden Nebenversuche mit Holzpellets durchgeführt, um die Sauerstoffabnahme bei sehr niedrigen Wassergehalten besser erklären zu können. Da die Rohdichte und Schüttdichte von Holzpellets wesentlich höher ist als die von Holzhacken, wurde der Versuch in zwei Durchgänge unterteilt. Im ersten Durchgang wurden wie bei den Holzhacken die Eimer randvoll befüllt. Dies resultierte in einer wesentlich

höheren Trockenmasse bei gleichzeitig geringerem Sauerstoffvolumen als bei den Holzhackschnitzeln. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde im zweiten Durchgang das Trockenmasse-Sauerstoff-Verhältnis der Pelleteimer denen der Holzhackschnitzeleimer angeglichen und die Eimer nur noch zu etwa einem Drittel (2219 g) mit Holzpellets befüllt.

### 10.2.2 Korrektur der Sauerstoffkonzentration

Der angezeigte Messwert wurde um zwei Faktoren korrigiert. Zum einen wurde mithilfe einer Stickstoffspülung der absolute Nullpunkt des Sensors ermittelt. Dieser lag nicht bei 0,0 Vol.-%, sondern bei 0,1 Vol.-% Sauerstoff. Zum anderen wurde in mehreren Versuchen überprüft, wie weit die Sauerstoffkonzentration allein durch den Messvorgang abnimmt, indem die Sauerstoffkonzentration in den Eimern sofort nach dem Verschließen gemessen wurde. Durch das Abpumpen der Luft verringerten sich der absolute Partialdruck des Sauerstoffs und somit auch die angezeigte Sauerstoffkonzentration, da das Messgerät im Umgebungsluftdruck kalibriert wurde. Beide Faktoren wurden in eine Korrekturformel integriert und diese dann bei jedem Messwert angewandt (Formel (10.1)).

$$O_2 = \frac{x - 0,1}{20,5} \times 20,9 \quad (10.1)$$

Wobei:

$O_2$	=	korrigierte Sauerstoffkonzentration (Vol.-%)
$x$	=	$O_2$ -Messwert (Vol.-%)
0,1	=	Nullpunkt des Messgeräts (Vol.-%)
20,5	=	$O_2$ -Konzentration durch Absenken des Luftdrucks im Eimer (Vol.-%)
20,9	=	$O_2$ -Gehalt der Umgebungsluft (Vol.-%)

### 10.2.3 Berechnung des Trockenmasseverlusts

Zur Berechnung der Sauerstoffmenge, die für die Umsetzung einer definierten Holzmasse benötigt wird, wurde in Anlehnung an [68] eine Elementverteilung von 50 m-% Kohlenstoff (C), 6 m-% Wasserstoff (H), 43 m-% Sauerstoff (O) und 1 m-% Rest (Stickstoff, Schwefel, Mineralien etc.) im Holz angenommen. Dies entspricht einer Stoffmengenverteilung von:

$$C: \frac{50\%}{12 \text{ g mol}^{-1}} = 4,17 \text{ Mol} - \text{Anteile} \quad (10.2)$$

$$H: \frac{6\%}{1 \text{ g mol}^{-1}} = 6,00 \text{ Mol} - \text{Anteile} \quad (10.3)$$

$$O: \frac{43\%}{16 \text{ g mol}^{-1}} = 2,69 \text{ Mol} - \text{Anteile} \quad (10.4)$$

In der Summe ergeben sich 12,86 Mol-Anteile. Bezogen auf 1000 Mol-Anteile ergibt sich demnach eine Verteilung von C, H und O im Holz von:

$$C: 4,17 \times \frac{1000}{12,86} = 324 \quad (10.5)$$

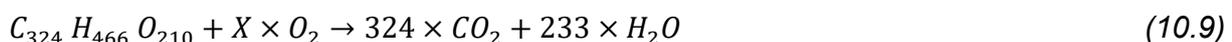
$$H: 6,00 \times \frac{1000}{12,86} = 466 \quad (10.6)$$

$$O: 2,69 \times \frac{1000}{12,86} = 210 \quad (10.7)$$

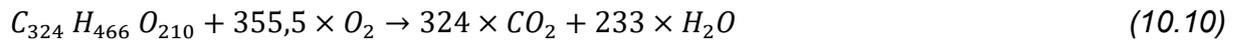
Folglich lautet die genäherte Summenformel für Holz ( $C_{324} H_{466} O_{210}$ ) $_n$ . Das Molekulargewicht von Holz entspricht für  $n = 1$ :

$$324 \times 12 \text{ g mol}^{-1} + 466 \times 1 \text{ g mol}^{-1} + 210 \times 16 \text{ g mol}^{-1} = 7714 \text{ g mol}^{-1} \quad (10.8)$$

Für die vollständige Umsetzung von Holz mit Sauerstoff zu  $CO_2$  und  $H_2O$  ergäbe sich dann:



Die bei der Umsetzung entstehenden 324  $CO_2$  beinhalten 324  $O_2$ . Die 233  $H_2O$  beinhalten 233 O (entspricht 116,5  $O_2$ ). Somit ergeben sich auf der rechten Seite der Gleichung (10.9) insgesamt 440,5  $O_2$ . Im Holz befinden sich davon bereits  $O_{210} = 105 O_2$ . Der noch benötigte Sauerstoff X für die vollständige Umsetzung des Holzes ergibt sich somit aus der Differenz  $440,5 O_2 - 105 O_2 = 335,5 O_2$ . Dieser muss aus der Umgebungsluft hinzukommen (d. h. „verbraucht werden“):



Für die vollständige Umsetzung von 1 „Mol“ Holz (entspricht 7714 g) werden somit 335,5 mol  $O_2$  benötigt.

Dies bedeutet für die Stoffmengen zur vollständigen Umsetzung von 1 g Holz:

$$\frac{335,5 \text{ mol } O_2}{7714 \text{ g}} = 43,5 \text{ mmol } O_2 \quad (10.11)$$

Unter Normalbedingungen (0 °C, 1013 hPa) beinhaltet 1 mol  $O_2$  ein Molvolumen von 22,4 l. Dementsprechend beinhalten 43,5 mmol  $O_2$  insgesamt 974 ml oder 0,974 l. Für die vollständige Umsetzung von 1 g Holz werden demzufolge 0,974 l Sauerstoff benötigt.

Das Luftvolumen in den Eimern wurde berechnet, indem das Volumen der Holzhackschnitzel vom Volumen der Eimer abgezogen wurde. Das Volumen der Holzhackschnitzel wurde aus deren Trockenmasse abgeleitet. Es wurde von einer Darrdichte von  $0,43 \text{ g cm}^{-3}$  für Fichtenholz ausgegangen [72]. Nach SELL (1997) [105] beträgt das differentielle Schwindmaß von Fichtenholz tangential 0,27 bis 0,36 und radial 0,15 bis 0,19 je 1 % Holzfeuchteänderung. Das mittlere differentielle Schwindmaß von Fichte ist somit 0,24 % je 1 % Holzfeuchteänderung. Unter Berücksichtigung dieser Volumenänderung bis zum Fasersättigungspunkt wurde die Holzdichte beim jeweiligen Wassergehalt berechnet. Nach Lohmann (2005) [85] liegt der Fasersättigungspunkt von Fichtenholz zwischen 30 und 34 % Holzfeuchte. Daher wurde die Grenze 32 % Holzfeuchte bzw. 24 % Wassergehalt als Fasersättigungspunkt gewählt. Die Division der Trockenmasse durch die Holzdichte ergab das Holzvolumen. Durch Multiplikation des Luftvolumens mit der Sauerstoffkonzentration wurde das Sauerstoffvolumen kalkuliert. Durch Abzug des Sauerstoffvolumens am Ende des Experiments von dem Volumen am Beginn wurde der Sauerstoffverbrauch berechnet. Der Trockenmasseabbau ergab sich durch Teilung des Sauerstoffverbrauchs durch das Sauerstoffvolumen, das für den Abbau von 1 g Holz nötig ist, also 0,974 l. Der relative Trockenmasseabbau ist das Verhältnis des Trockenmasseabbaus zur Trockenmasse zu Versuchsbeginn. Letztere errechnet sich aus der Summe der verbliebenen Trockenmasse bei Versuchsende und dem kalkulierten Trockenmasseabbau.

#### 10.2.4 Statistik

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Programm SAS 9.3 durchgeführt. Der Zusammenhang verschiedener Parameter mit dem Sauerstoffverbrauch wurde mithilfe von Streudiagrammen visuell analysiert. Ein multiples lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Rate des Trockenmasseabbaus wurde entwickelt. Dafür wurde die Rate

des Trockenmasseabbaus logarithmisch transformiert. Der Wassergehalt, das Holzhackschnittelsortiment, die Lagerdauer vor der Trocknung und die Temperatur bei Versuchsdurchführung wurden als erklärende Variablen verwendet. Die durch das Logarithmieren bedingte Verzerrung wurde mit  $1+RMSE^2/2$  [119] korrigiert. Die Normalverteilung der Residuen wurde mit dem Shapiro-Wilk-, dem Kolmogorov-Smirnov- und dem Anderson-Darling-Test überprüft. Die Varianzhomogenität der Residuen wurde mit dem White-Test analysiert. Ob Multikollinearität besteht, wurde anhand des Varianzinflationsfaktors überprüft.

### **10.3 Vorversuche**

Zur Ermittlung des optimalen Versuchsdesigns wurden im Sommer und Herbst 2017 mit Holzhackschnitzeln aus den Mieten für den Sickerwasserversuch (siehe Unterkapitel 13.3) umfassende Vorversuche zur Sauerstoffzehrung durchgeführt.

#### **10.3.1 Lagerungsdauer 24 Stunden bei niedriger Temperatur**

Zunächst wurden die Holzhackschnitzel der beiden Sortimente Waldrestholz und Energierundholz lediglich für insgesamt 24 Stunden und ausschließlich bei  $21 \pm 2$  °C luftdicht in den Eimern gelagert. Die Ergebnisse zeigten zwar eine durchweg niedrigere Sauerstoffkonzentration als bei der Einlagerung (20,9 Vol.-%), jedoch auch bei Wassergehalten von bis zu 25 m-% noch kein deutliches Absinken der Sauerstoffkonzentration (Abbildung 81). Da nur über eine deutliche Sauerstoffabnahme das Verlassen eines weitgehend lagerstabilen Bereichs ermittelt werden kann, wurde das Versuchsdesign entsprechend umgestellt. Speziell für das Sortiment Energierundholz waren mit dem hier erprobten Versuchsaufbau keine belastbaren Antworten auf die Forschungsfrage möglich.

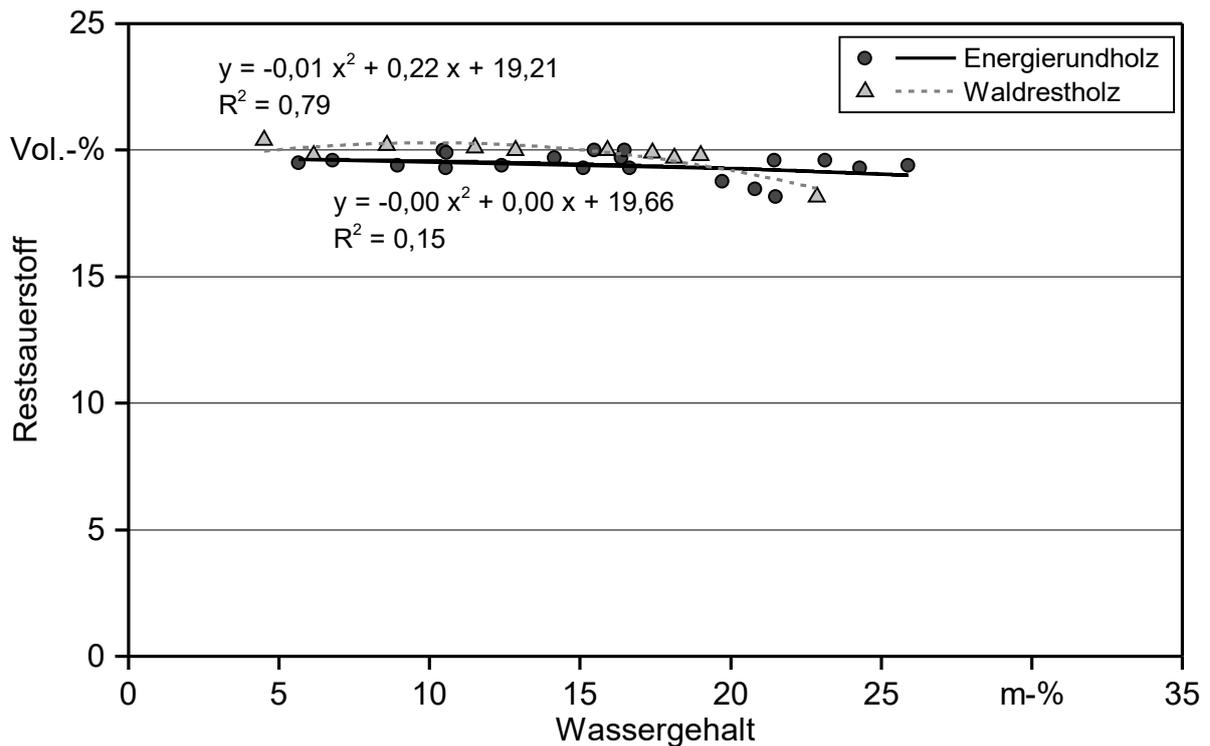


Abbildung 81: Korrelation von Restsauerstoff nach 24 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Waldrestholz hackschnitzel sowie Energierundholz hackschnitzel im Eimer bei  $21 \pm 2$  °C Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem ersten Vorversuch

### 10.3.2 Lagerungsdauer 48 Stunden bei niedriger und hoher Temperatur

Im folgenden Vorversuch wurde, um in den Bereich einer eindeutigen Sauerstoffabnahme zu kommen, die Lagerungsdauer in den Eimern auf 48 Stunden erhöht und der Versuch um eine Variante mit höherer Lagerungstemperatur ( $34 \pm 1$  °C) ergänzt. Zusätzlich wurden die Holz hackschnitzelproben teilweise auf höhere Wassergehalte als beim ersten Vorversuch konditioniert.

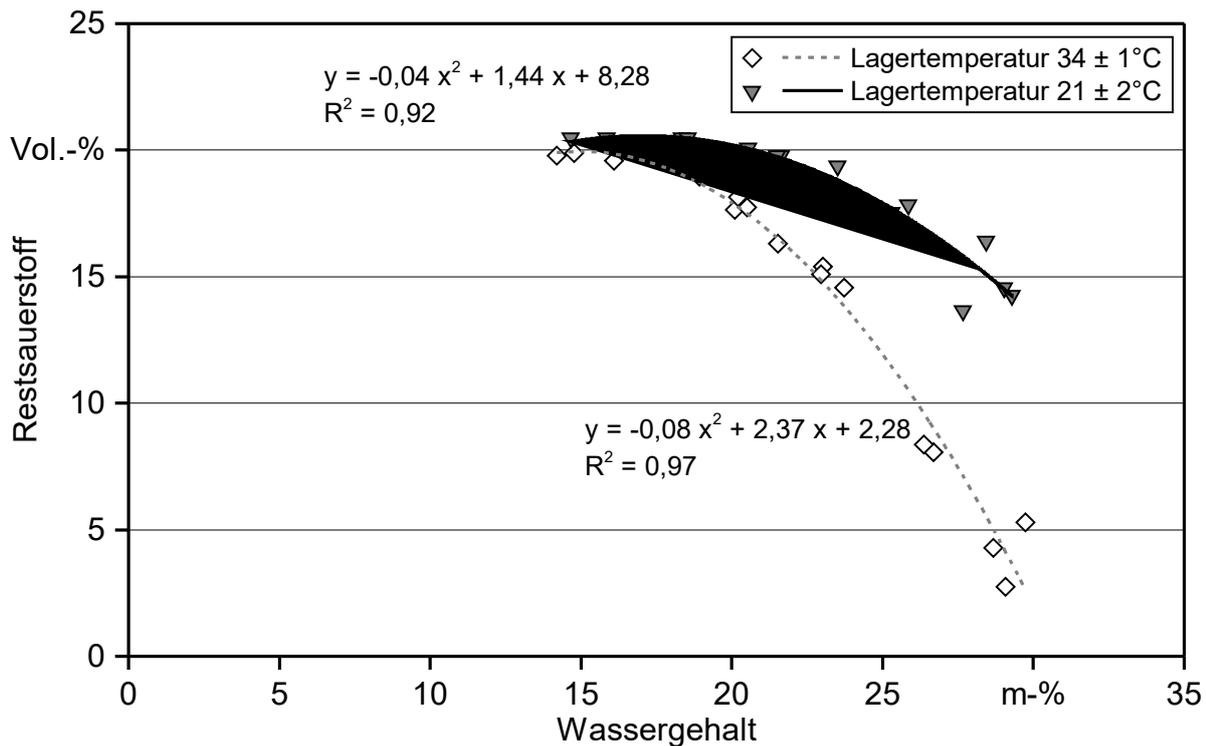


Abbildung 82: Korrelation von Restsauerstoff nach 48 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Waldrestholz hackschnitzel im Eimer bei niedriger ( $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und hoher ( $34 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem zweiten Vorversuch

Die Ergebnisse des zweiten Vorversuchs waren bei beiden Sortimenten vergleichbar. Bei der warmen Lagerung kam es ab einem Wassergehalt von ca. 18 m-% zu einer sehr deutlichen Sauerstoffabnahme, bei der kalten Lagerung ab ca. 23 m-% (Abbildung 82 und Abbildung 83). Die Zusammenhänge waren jeweils sehr deutlich ausgeprägt (Bestimmtheitsmaß  $R^2 > 0,9$ ). Somit wurde dieses Versuchsdesign für den Hauptversuch übernommen.

Im Hauptversuch sollte eine wesentlich größere Stichprobe die Datenbasis erweitern und zusätzlich Aussagen zum Einfluss der Lagerungsdauer der Holzhackschnitzel vor der Probenahme ermöglichen.

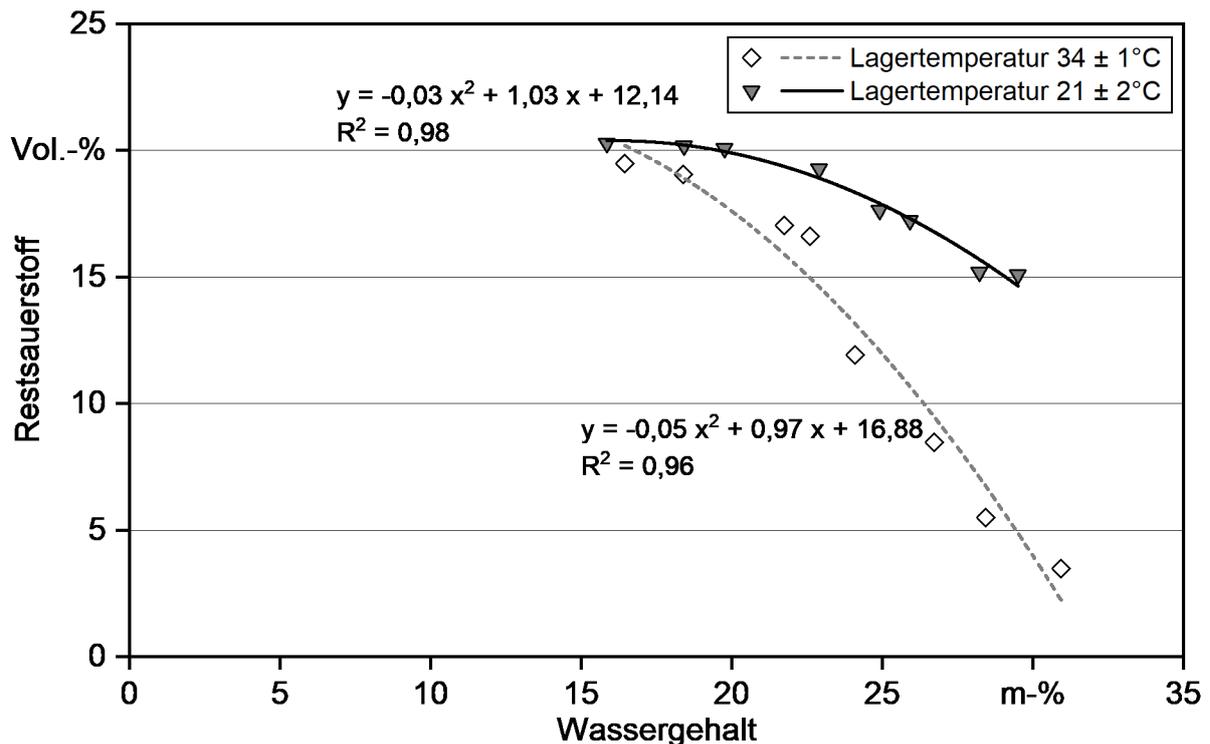


Abbildung 83: Korrelation von Restsauerstoff nach 48 Stunden Lagerungsdauer und Wassergehalt der Energierundholz hackschnitzel im Eimer bei niedriger ( $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und hoher ( $34 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Lagerungstemperatur. Ergebnis aus dem zweiten Vorversuch

## 10.4 Ergebnisse

### 10.4.1 Wassergehalt der Holz hackschnitzel vor der technischen Trocknung

Zum Zeitpunkt der Einlagerung im Februar 2018 lag der Wassergehalt bei den Waldrestholz hackschnitzeln mit 55,8 m-% im normalen, waldfrischen Bereich (Tabelle 42). Das Kronenmaterial stammte von einem Sturmwurf im Dezember. Dahingegen waren die Energierundholz hackschnitzeln mit einem Wassergehalt von 31,6 m-% deutlich trockener. Dies deutet auf eine starke Vortrocknung des Energierundholzes vor dem Hacken hin. Wahrscheinlich wurden die Stämme im Zuge der Borkenkäferbekämpfung bereits im vorangegangenen Sommer geschlagen und aufgepoltert. Die Verfügbarkeit von Energierundholz hackschnitzeln war bayernweit aufgrund des Sturmereignisses „Kolle“ erheblich eingeschränkt, da bei der Aufarbeitung und Räumung der Sturmflächen aus Waldschutzgründen ausschließlich Gipfelhackgut ausgehalten wurde. Deshalb musste als Substitut für das Energierundholz bei einer örtlichen Waldbesitzervereinigung Brennholz, das auf 2 m Länge ausgehalten war und in Durchmesser und Qualität dem Hackholzsoriment bei den BaySF entsprach, als Energierundholz umgewidmet werden. Zur Gewährleistung eines zeitlich reibungslosen Versuchsablaufs war dieser Schritt nicht vermeidbar. Während die Waldrestholz hackschnitzeln aufgrund der winterlichen Witterung ihren hohen Wassergehalt zunächst hielten, stieg der Wassergehalt der Holz hackschnitzeln aus dem vorgetrockneten Energierundholz an. Erst mit Einsetzen des Frühlings (Probenah-

men Nr. 4 und 5) sank der Wassergehalt dann bei beiden Sortimenten (wieder) ab, so dass die Wassergehalte ab PN 4 sehr ähnlich waren.

*Tabelle 42: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$  Standardabweichung,  $n = 10$ ) der Holzhackschnitzelproben für die Versuche zum lagerstabilen Wassergehalt vor der technischen Trocknung auf definierte Zielwassergehalte. Probenahmen zwischen Februar und Mai 2018*

	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5	PN 6
Waldrestholzhackschnitzel, Wassergehalt (m-%)	55,8 $\pm 1,7$	56,0 $\pm 0,9$	54,0 $\pm 1,5$	44,0 $\pm 1,2$	36,8 $\pm 1,3$	40,4 $\pm 1,3$
Energierundholzhackschnitzel, Wassergehalt (m-%)	31,6 $\pm 1,6$	42,5 $\pm 1,4$	42,9 $\pm 1,2$	43,7 $\pm 0,8$	34,7 $\pm 1,2$	39,6 $\pm 0,9$

#### 10.4.2 Aschegehalt

Der Aschegehalt der Waldrestholzhackschnitzel lag zum Zeitpunkt der Einlagerung bei  $6,3 \pm 1,1$  m-% ( $n = 5$ ), der Aschegehalt der Energierundholzhackschnitzel bei  $1,2 \pm 0,5$  m-% ( $n = 5$ ). Die Waldrestholzhackschnitzel wiesen optisch einen verhältnismäßig hohen Feinreisig- und Rindenanteil auf, der den vergleichsweise erhöhten Aschegehalt bewirkt haben könnte (vgl. Abschnitt 4.1.3). Die Energierundholzhackschnitzel waren dagegen optisch unauffällig und der Aschegehalt lag in einem normalen Bereich [80].

#### 10.4.3 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung lag unter Berücksichtigung des Ausgangsmaterials und der Maschineneinstellungen auch in diesem Versuch in einem typischen Bereich [1] [78]. Zwischen den beiden Sortimenten zeigten sich erwartungsgemäß Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung (Abbildung 84). Dies war in erster Linie rohstoffbedingt. Das Waldrestholz wies im Vergleich zum Energierundholz einen hohen Anteil an Nadeln und Feinreisig auf, weshalb die Waldrestholzhackschnitzel einen deutlich höheren Feinanteil (Partikel  $\leq 3,15$  mm) als die Energierundholzhackschnitzel besaßen. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung betrug dadurch bei den Waldrestholzhackschnitzeln 11,9 mm, bei den Energierundholzhackschnitzeln 15,5 mm. Die Ergebnisse der Siebanalyse zeigten, dass die Hauptfraktion ( $\geq 60$  m-%) der Partikel bei beiden Sortimenten eine Größe von 3,15 mm bis 31,5 mm aufwies. Somit konnten diese nach DIN EN ISO 17225-1 [27] mindestens in die Klasse P31 eingeteilt werden. Eine Einteilung in die Klasse P31S gemäß DIN EN ISO 17225-4 [28] war bei den Er-HS möglich, bei den Wrh-HS aufgrund der Überschreitung des Feingutanteils jedoch nicht. Hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung können die Er-HS demnach auch gut in Kleinf Feuerungsanlagen verwendet werden, die Wrh-HS eher nicht. Im Vergleich zu den Energierundholzhackschnitzeln aus den Versuchen zum Sickerwasser und zur Lagerung technisch getrockneter Holzhackschnitzel be-

saßen die Energierundholzhackschnitzel in diesem Versuch einen verhältnismäßig hohen Anteil an Partikeln in der Fraktion 16 bis 31,5 mm und an überlangen Partikeln > 100 mm. Dies war wahrscheinlich auf den Siebkorbeinsatz im Hacker mit einer relativ großen Lochweite (80 mm × 80 mm) bei diesem Versuch im Vergleich mit den beiden anderen Versuchen (Lochweiten 35 mm × 35 mm bzw. 30 mm × 30 mm) zurückzuführen.

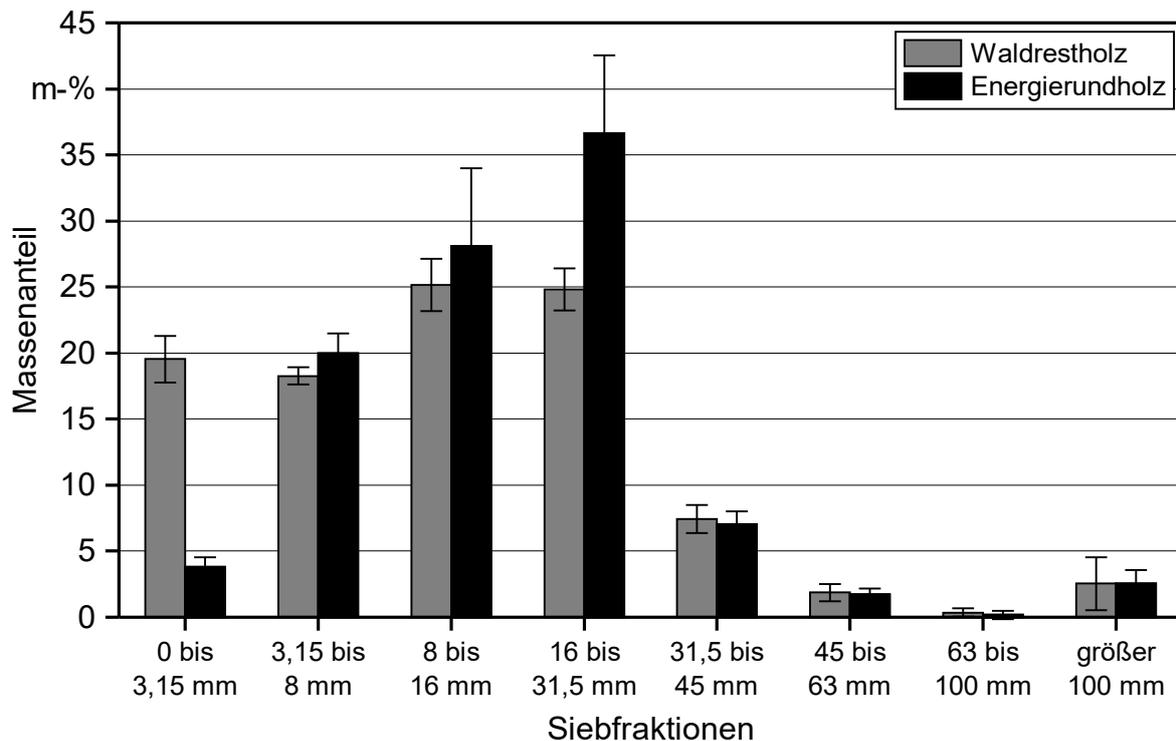


Abbildung 84: Mittlere Partikelgrößenverteilung der Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel ( $\pm$  Standardabweichung) für den Sauerstoffzehrungsversuch

#### 10.4.4 Nebenversuch zur Sauerstoffzehrungsrate

Die Sauerstoffzehrung in den Eimern verlief bis zu einer Restsauerstoffkonzentration von ca. 2 Vol.-% annähernd linear (Abbildung 85, Ergebnisse aus einem der drei Durchgänge). Die Mikroorganismen wurden bis zu dieser geringen Sauerstoffkonzentration anscheinend nicht in ihrem Stoffwechsel beeinträchtigt. Da in praxisüblichen Holzhackschnitzelhaufen nicht mit einer nahezu sauerstofffreien Umgebung gerechnet werden muss (siehe Unterkapitel 13.3), konnte die Berechnung des Trockenmasseverlusts aus dem Sauerstoffverbrauch ohne weitere Korrekturen erfolgen. Allerdings mussten aus der Korrelation von Restsauerstoff und Wassergehalt (siehe Abschnitt 10.4.5) Werte von < 2 Vol.-% Restsauerstoff als Extremwerte gelöscht werden, da diese die Ausgleichsfunktion verfälscht hätten. Eine weitere Absenkung war versuchsbedingt (begrenzt verfügbarer Sauerstoff im luftdicht verschlossenen Eimer) nicht möglich, unabhängig davon wie viel höher der Wassergehalt der Holzhackschnitzel gewesen wäre.

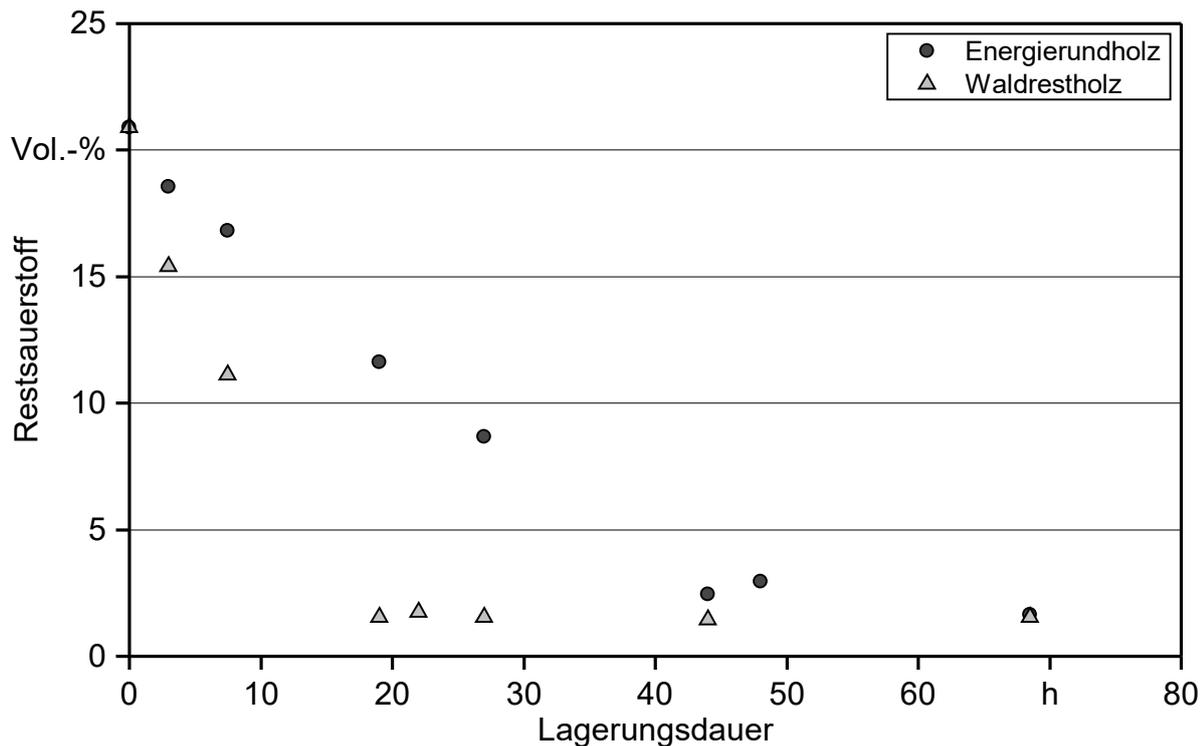


Abbildung 85: Entwicklung der Sauerstoffkonzentration in den Eimern über eine Dauer von knapp drei Tagen. Der Wassergehalt der Waldrestholzhackschnitzel lag bei  $63,6 \pm 0,3$  m-%, der Wassergehalt der Energierundholzhackschnitzel bei  $55,1 \pm 0,4$  m-% (jeweils  $n = 7$ ).

#### 10.4.5 Korrelation von Wassergehalt und Sauerstoffkonzentration

Die Ergebnisse zeigen für beide Sortimenten eine deutliche Korrelation zwischen dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel und dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während der 48 Stunden (Abbildung 86). Mit zunehmendem Wassergehalt stieg der Sauerstoffverbrauch exponentiell. Sogar sehr niedrige Wassergehalte ( $< 10$  m-%) führten zu einem leichten Sauerstoffverbrauch. Der Sauerstoffverbrauch war bei den Waldrestholzhackschnitzeln größer als bei den Holzhackschnitzeln aus Energierundholz. Bei den Waldrestholzhackschnitzeln war die Korrelation schwächer als im Fall von Holzhackschnitzeln aus Energierundholz, vermutlich weil die Lagerdauer der Holzhackschnitzel vor der Probenahme und Durchführung der Experimente im Fall von Waldrestholz die mikrobielle Aktivität deutlich beeinflusste (siehe auch Abschnitt 10.5.1).

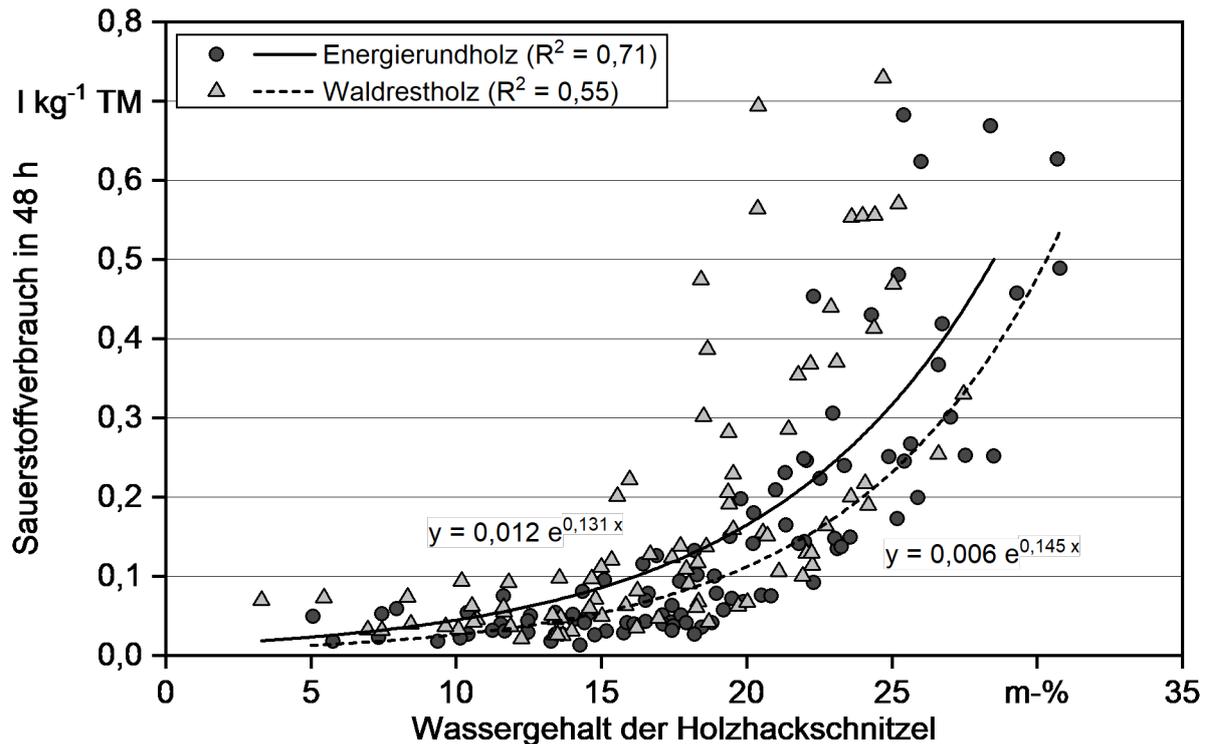


Abbildung 86: Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für beide Sortimenten

Wurden Proben während der ersten fünf Wochen der Lagerung aus der Miete entnommen, war vor allem bei Waldrestholzhackschnitzeln der Sauerstoffverbrauch größer als bei späterer Probenahme (Abbildung 87). Bei einer späteren Probenahme zeigten die Waldrestholzhackschnitzel eine sehr ähnliche Ausgleichskurve der Regression wie die Energierundholzhackschnitzel über die gesamte Lagerungsdauer. Eine höhere Temperatur während des Experiments bewirkte einen schnelleren Sauerstoffverbrauch (Abbildung 88).

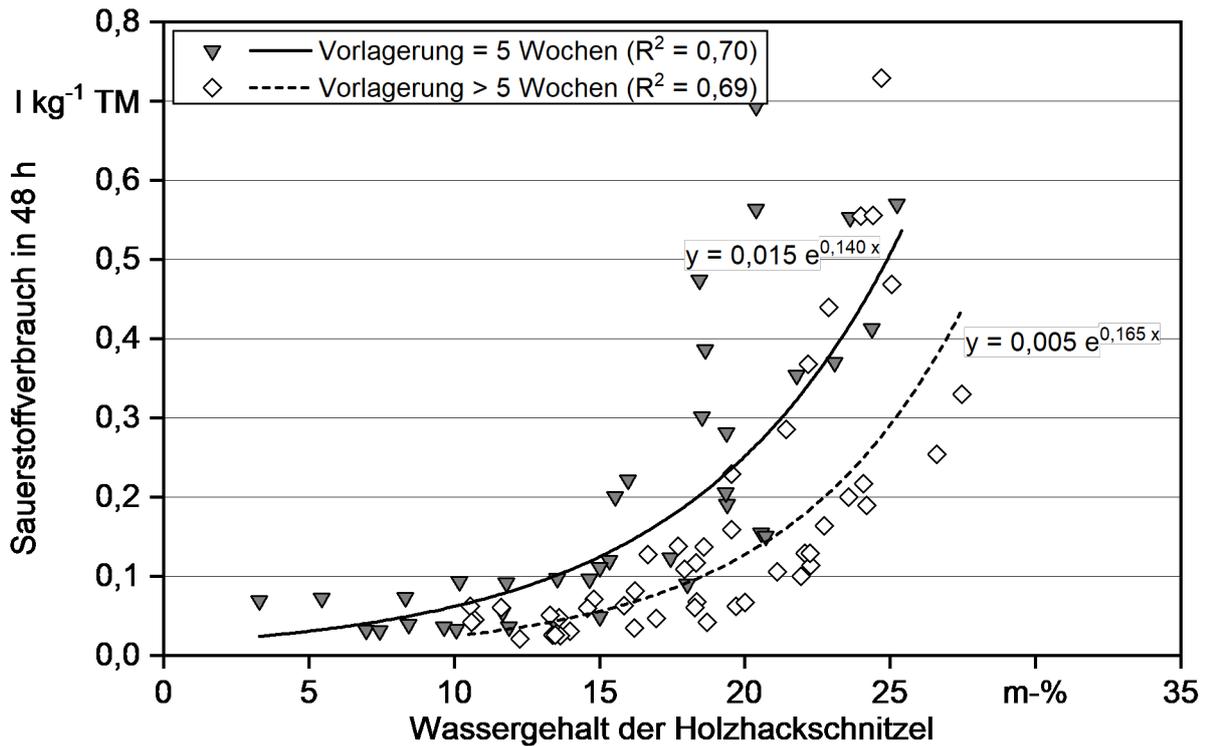


Abbildung 87: Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für eine unterschiedliche Lagerdauer vor der Trocknung bei Waldrestholz

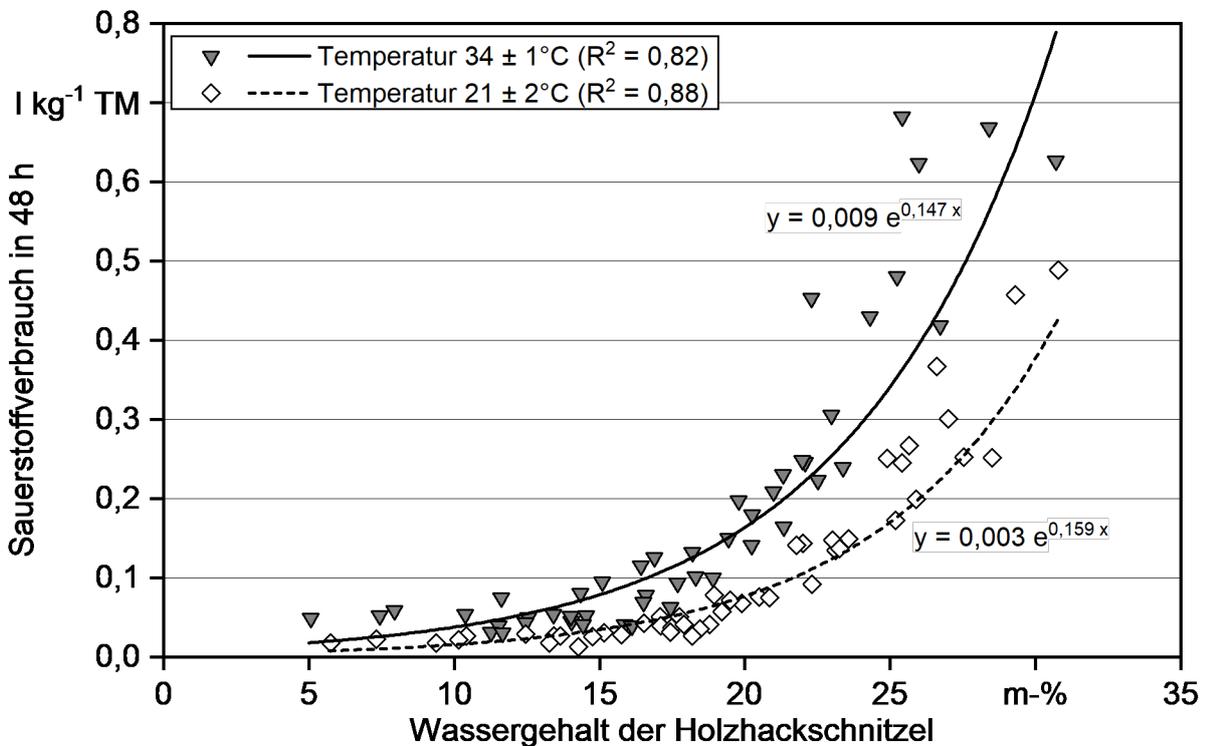


Abbildung 88: Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffverbrauch in den Eimern während 48 Stunden und dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel für unterschiedliche Temperaturniveaus während des Experiments bei Energie- rundholz

#### 10.4.6 Multiples lineares Regressionsmodell der Rate des Trockenmasseabbaus

Es wurden verschiedene Varianten für die Berücksichtigung der Lagerdauer in dem Regressionsmodell getestet. Sowohl die Lagerdauer in Tagen als metrische Variable als auch die Probenahmetermine als Dummy-Variablen bzw. Gruppen von Probenahmeterminen wurden gewählt. Den höchsten Erklärungsbeitrag erbringt die Lagerdauer, wenn lediglich die Zeiträume von bis zu fünf Wochen nach Lagerbeginn und mehr als fünf Wochen unterschieden werden. Alle Parameter in dem Modell sind auf dem Niveau von  $< 0,001$  signifikant. Das Bestimmtheitsmaß (korrigiertes  $R^2$ ) beträgt 0,88. Die Gleichung vermag also 88 % der Streuung der Werte zu erklären. Alle statistischen Voraussetzungen für die Gültigkeit des Modells sind erfüllt. Die erklärenden Variablen zeigen keine Multikollinearität. Der Trockenmasseabbau kann mit folgender Gleichung geschätzt werden:

$$TM_{Abb} = \left(1 + \frac{0,33^2}{2}\right) \times e^{-12,14 + 0,16 \times w - 0,18 \times T + 0,58 \times LD + 0,53 \times S} \quad (10.12)$$

Wobei:

$TM_{Abb}$	=	Trockenmasseabbau (%)
$w$	=	Wassergehalt (m-%)
$T$	=	Temperaturniveau – bei 21 °C ist 1 einzusetzen, bei 34 °C ist 0 einzusetzen
$LD$	=	Lagerdauer – bei Lagerung bis zu fünf Wochen vor der Trocknung ist 1 einzusetzen, bei längerer Vorlagerung ist 0 einzusetzen
$S$	=	Sortiment – bei Waldrestholz hackschnitzeln ist 1 einzusetzen, bei Energierundholz hackschnitzeln ist 0 einzusetzen

Wird anstelle des Wassergehalts die Holzfeuchte ( $U$  in %) verwendet, kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$TM_{Abb} = \left(1 + \frac{0,31^2}{2}\right) \times e^{-11,69 + 0,11 \times U - 0,81 \times T + 0,55 \times LD + 0,54 \times S} \quad (10.13)$$

Das korrigierte Bestimmtheitsmaß dieses Modells beträgt 0,90.

Die Effekte der verschiedenen erklärenden Parameter auf die Rate des Trockenmasseabbaus sind in Abbildung 89 dargestellt. Nach dem Wassergehalt der Holzhackschnitzel hat die Temperatur während des Experiments den größten Einfluss auf den Abbau. Die Lagerdauer vor Durchführung der Experimente hat die drittgrößte Wirkung. Das Holzhackschnitzelsortiment hat den geringsten Einfluss. Die in der Abbildung dargestellten Kurven dürfen keinesfalls für höhere Wassergehalte extrapoliert werden. Die Gültigkeit des Modells ist auf Wassergehalte bis etwa 30 m-% begrenzt.

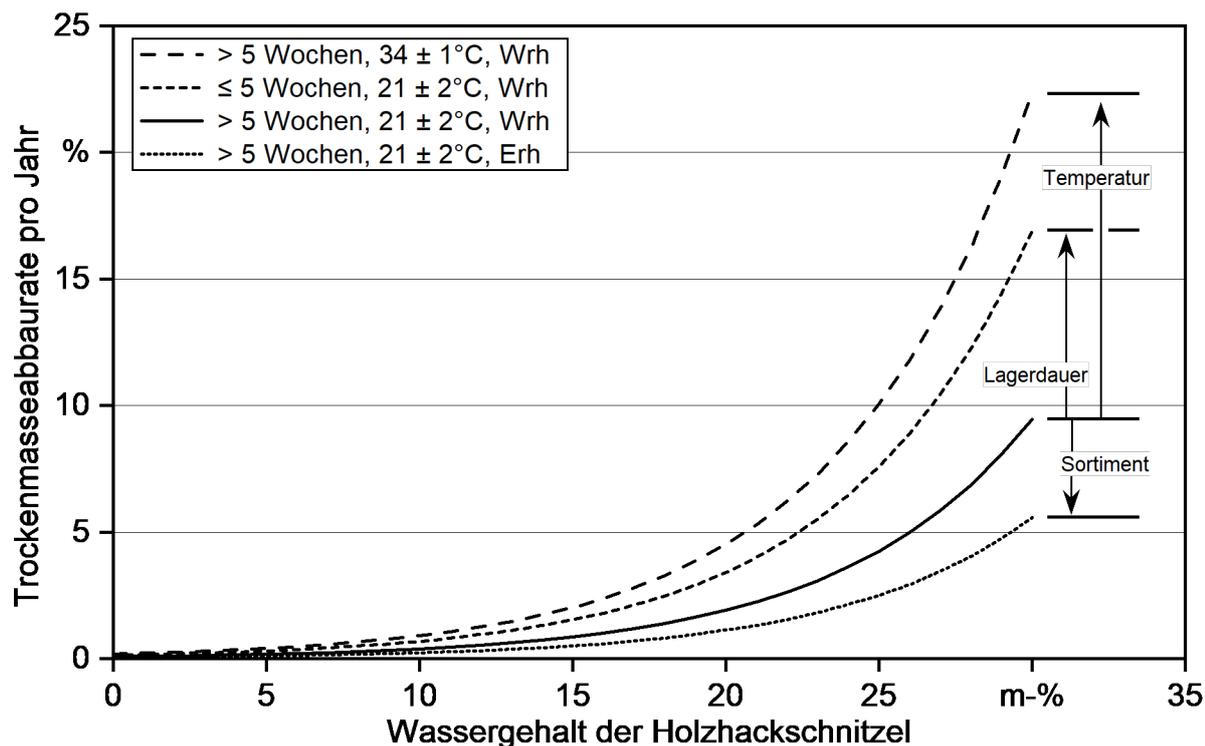


Abbildung 89: Der Einfluss von verschiedenen erklärenden Variablen auf die Abbaurrate. Die Rate bei den Waldrestholz hackschnitzeln bei 21 °C und einer Lagerdauer von mehr als fünf Wochen vor der Durchführung der Experimente dient als Referenz. Die Abbaurrate pro Jahr wurde berechnet, indem die mit Gleichung (10.12) ermittelten Werte mit  $365/2$  multipliziert wurden.

## 10.5 Diskussion

### 10.5.1 Diskussion der Ergebnisse

#### 10.5.1.1 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Der Wassergehalt der Waldrestholz hackschnitzeln war typisch für frisch gehäckselte forstliche Biomasse [27], während der Wassergehalt der Energierundholz hackschnitzeln auf eine Vortrocknung des Holzes vor dem Hacken hindeutet. Allerdings näherten sich die Wassergehalte beider Sortimente nach sechs Wochen Lagerdauer an und die Holz hackschnitzeln wurden ohnehin vor den Laborexperimenten technisch getrocknet. Der deutlich höhere Feinanteil und Aschegehalt der Waldrestholz hackschnitzeln erklärt sich aus dem höheren Anteil von Nadeln und Feinreisig der Kronenbiomasse. Der Aschegehalt der Waldrestholz hackschnitzeln war deutlich größer als 3 m-%, also außerhalb des für Waldrestholz typischen Rahmens [27]. Dies kann auf eine Verschmutzung mit Mineralboden im Zuge der Prozesskette hindeuten. Trotzdem können die Brennstoffqualitäten als weitgehend typisch für Holz hackschnitzeln sortimente in Mitteleuropa gelten [27] [28].

### 10.5.1.2 Korrelation von Wassergehalt und Sauerstoffverbrauch

Die Zunahme des Sauerstoffverbrauchs bei steigendem Wassergehalt und steigender Temperatur kann auf die Biologie der Mikroorganismen zurückgeführt werden: Hohe Wassergehalte und warme Temperaturen wirken sich positiv auf deren Stoffwechsel- und Vermehrungsrate aus. Dass diese beiden Faktoren die Trockenmasseverluste beschleunigen, wurde bereits in der vorangegangenen Studie [66] und vielen weiteren Untersuchungen gezeigt [6] [42] [57] [84]. In der vorliegenden Studie führten selbst sehr niedrige, für mikrobielle Aktivität eigentlich ungeeignete Wassergehalte ( $< 10$  m-%) zu einem leichten Sauerstoffverbrauch. Es stellt sich die Frage, ob diese auf chemische Prozesse zurückzuführen sind. Bei Holzpellets, die in der Regel Wassergehalte von unter 10 m-% aufweisen, ist die chemische Autooxidation von Fetten und Fettsäuren, die unter Sauerstoffverbrauch zu einer Ausgasung von Kohlenmonoxid (CO) führt, ein bekannter Vorgang. Durch die starke Zerkleinerung sowie Erhitzung während des Herstellungsprozesses entstehen viele oxidierbare Stoffe, die sich u. a. an den Oberflächen der Pellets konzentrieren [73]. Deshalb bestand die Annahme, dass es auch bei Holzpellets zu einer Sauerstoffabnahme kommt und diese sogar höher sein müsste als bei Holzhackschnitzeln mit vergleichbarem Wassergehalt. Dies wurde in einem Nebenversuch untersucht (siehe Abschnitt 10.5.1.3).

### 10.5.1.3 Sauerstoffzehrung bei Holzpellets

Die Holzpellets, die für diesen Versuch verwendet wurden, wiesen mit 8,2 m-% einen typischen Wassergehalt für Holzpellets zur nicht industriellen Verwendung auf. Der Sauerstoffgehalt fiel in den randvoll befüllten Eimern bereits innerhalb von 24 Stunden auf 1,9 Vol.-% (Lagerungstemperatur  $34 \pm 1$  °C) bzw. 6,8 Vol.-% (Lagerungstemperatur  $21 \pm 2$  °C) (Tabelle 34). Nach 48 Stunden war auch bei den kälter gelagerten Holzpellets ein Sauerstoffgehalt von nur  $1,6 \pm 0,1$  Vol.-% erreicht. Bei den Holzhackschnitzeln, die auf Wassergehalte  $< 10$  m-% getrocknet wurden, lagen die Sauerstoffgehalte bei mindestens 19,8 Vol.-% (Lagertemperatur  $21 \pm 2$  °C) bzw. 19,3 Vol.-% (Lagerungstemperatur  $34 \pm 1$  °C). Bei den Eimern mit dem an die Holzhackschnitzel angeglichenen Trockenmasse-Sauerstoff-Verhältnis betrug der Sauerstoffgehalt nach 48 Stunden bei den warm gelagerten Pellets  $10,9 \pm 0,4$  Vol.-%, bei den kalt gelagerten Pellets  $16,3 \pm 0,3$  Vol.-%. Der Sauerstoffgehalt lag also auch bei den Eimern mit wenigen Pellets noch deutlich unter dem der Eimer mit Holzhackschnitzeln, die auf vergleichbare Wassergehalte getrocknet wurden. Die These der Sauerstoffzehrung durch Autooxidation bei niedrigen Wassergehalten konnte mit diesem Versuch entsprechend bestärkt werden. Die geringere Sauerstoffzehrung von Holzhackschnitzeln im Vergleich zu Holzpellets gleichen Wassergehalts dürfte auf den niedrigeren Aufbereitungsgrad der Holzhackschnitzel zurückzuführen sein. Ähnliche Versuche mit Holzpellets wurden auch von einer anderen Forschergruppe durchgeführt [74]. In dieser Studie zeigte sich ebenfalls eine starke Sauerstoffzehrung, die sich mit steigender Lagerungstemperatur beschleunigte.

**Tabelle 43:** Nebenversuch zur Sauerstoffzehrung von Holzpellets (Wassergehalt: 8,2 m-%, Mischprobe). Obere Tabellenhälfte: Eimer randvoll befüllt (6560 g), untere Tabellenhälfte: Eimer zu ca. einem Drittel befüllt (2219 g)

Eimer-Nr.	Lagerungstemperatur in °C	Lagerungsdauer in h	Sauerstoffkonzentration in Vol.-%
P1_voll	34 ± 1	24	1,9
P2_voll	34 ± 1	30	1,8
P3_voll	34 ± 1	48	1,9
P4_voll	34 ± 1	48	1,7
P5_voll	34 ± 1	48	1,8
P6_voll	21 ± 2	24	6,8
P7_voll	21 ± 2	30	4,4
P8_voll	21 ± 2	48	1,6
P9_voll	21 ± 2	48	1,5
P10_voll	21 ± 2	48	1,6
P1_drittel	34 ± 1	23	14,8
P2_drittel	34 ± 1	42	11,5
P3_drittel	34 ± 1	48	10,4
P4_drittel	34 ± 1	48	11,2
P5_drittel	34 ± 1	48	11,1
P6_drittel	21 ± 2	23	18,5
P7_drittel	21 ± 2	42	16,8
P8_drittel	21 ± 2	48	16,4
P9_drittel	21 ± 2	48	16,5
P10_drittel	21 ± 2	48	16,0

#### 10.5.1.4 Einfluss der Lagerdauer vor der Trocknung und der Sortimente

Der Grund für den Einfluss der Lagerdauer vor der Beprobung könnte zum einen in dem größeren Anteil von Nadeln und Feinreisig in den Waldrestholz hackschnitzeln liegen, die eine größere Menge leicht verfügbarer Nährstoffe enthalten, die vor allem am Anfang der Lagerung die Vermehrung von Mikroorganismen fördern. Hinzu kommt, dass bei der Hacker-Zerkleinerung Extraktstoffe, die ungesättigte Fettsäuren enthalten können, an die Oberfläche treten und mit Sauerstoff in Berührung kommen. Deren chemische Oxidation setzt somit sofort ein, ohne Beteiligung von Mikroorganismen. Sie kommt nach einigen Wochen zum Erliegen, sodass bei länger lagernden Proben hierdurch kein zusätzlicher Sauerstoffverbrauch mehr zu erwarten ist. Außerdem könnte sich die Atmung der absterbenden Splintholzzellen ausgewirkt haben [6]. Für die letzten beiden Ursachen spricht, dass der Parameter „Lagerdauer“ auch auf dem Niveau von 0,001 signifikant

war, wenn die Regression nur mit den Daten der Energierundholzhackschnitzel durchgeführt wurde. Allerdings ist der Einfluss der Lagerdauer im Fall von Waldrestholzhackschnitzeln größer. Der Koeffizient dieser Variable ist in einem Modell nur für Waldrestholz mit 0,86 größer als in einem Modell allein für Energierundholz (0,36).

Die Experimente wurden mit Holzhackschnitzeln zweier unterschiedlicher Sortimente durchgeführt, die auch aus unterschiedlichen Gebieten Bayerns stammten. Allerdings gibt es keine Hinweise darauf, dass Holzhackschnitzel aus unterschiedlichen Gebieten eine unterschiedliche mikrobielle Zusammensetzung entwickeln würden. Viele Studien zeigen, dass die in Holzhackschnitzeln vorzufindenden Mikroben trotz unterschiedlicher Herkunftsorte der Holzhackschnitzel meist sehr ähnlich sind [4] [93] [6] [57]. Eine schlechte Holzhackschnitzelqualität und ein warmes Klima können die Diversität der Mikroorganismen erhöhen und deren Wachstum beschleunigen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auch für andere Fälle der Holzhackschnitzellagerung mit vergleichbaren Sortimenten und Klimabedingungen gültig sind.

Die Tatsachen, dass der Sauerstoff auch bei sehr niedrigen Wassergehalten verbraucht wurde und die Zunahme einem kontinuierlichen Trend folgt, zeigen, dass es weder einen lagerstabilen Wassergehalt noch einen klar definierbaren kritischen Wassergehalt gibt. In der Praxis ist daher zu entscheiden, welche Abbaurate akzeptiert werden kann, und dann der passende Wassergehalt auszuwählen.

#### **10.5.1.5 Abbaurate bei unterschiedlichen Wassergehalten**

In den Experimenten wurde die Abbaurate während eines Zeitraums von 48 Stunden gemessen. Für die Praxis ist es wichtig, wie sich die Abbaurate über längere Lagerzeiträume entwickelt. Solange sich die Bedingungen hinsichtlich Wassergehalts und Temperatur nicht ändern, ist anzunehmen, dass die Abbaurate zumindest nicht steigen wird. Wenn die Abbaurate von Holzhackschnitzeln, die vor der Trocknung bis zu fünf Wochen gelagert wurden, über 48 Stunden hinaus extrapoliert wird, dann wird der Trockenmasseabbau nicht überschätzt werden. Dieses Szenario stellt den ungünstigsten Fall dar. Unsere Untersuchung zeigt allerdings, dass die Abbaurate nach einigen Wochen der Vorlagerung sinkt. Ein realistisches Szenario könnte eine hohe Abbaurate während der ersten fünf Wochen und eine niedrigere danach sein. Tabelle 44 zeigt die Abbauraten für beide Szenarien bei einer Lagertemperatur von 21 °C. Eine mittlere Lagertemperatur von 21 °C in technisch getrockneten Hackschnitzeln ist für mitteleuropäische Klimabedingungen realistischer als 34 °C, wie die in Kapitel 11 beschriebenen Feldversuche zeigen. Die folgende Tabelle kann Praktikern bei der Entscheidung helfen, welchen Trockenmasseverlust sie bereit sind zu akzeptieren.

**Tabelle 44:** *Zwei Szenarios für die Rate des Trockenmasseabbaus bei technisch getrockneten Hackschnitzeln über einen Lagerzeitraum von sechs Monaten*

Wassergehalt in m-%	Trockenmasseabbau Energierundholz		Trockenmasseabbau Waldrestholz	
	realistischer	ungünstigster Fall	realistischer	ungünstigster Fall
10	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,3 %
15	0,3 %	0,5 %	0,5 %	0,8 %
20	0,6 %	1,0 %	1,1 %	1,7 %
25	1,4 %	2,2 %	2,4 %	3,8 %
30	3,2 %	5,0 %	5,4 %	8,4 %

### 10.5.2 Diskussion der Methoden

Das Sauerstoffvolumen in den Eimern war begrenzt. Bis zu einer Sauerstoffkonzentration von 2 Vol.-% hinab konnte im Mittel ein Volumen von 1,2 Liter Sauerstoff verbraucht werden. Somit konnten maximal 1,27 g Holz während der Dauer des Experiments von 48 Stunden abgebaut werden. Dies entspricht einer Abbaurrate von 0,0875 %. Im Fall von Waldrestholzhackschnitzeln, die weniger als fünf Wochen vor der Trocknung bei einer Temperatur von 21 °C gelagert werden, wird die Abbaurrate von 0,0875 % bei einem Wassergehalt von 29,5 m-% erreicht. Demnach liegt der höchste in Tabelle 44 gezeigte Wassergehalt leicht außerhalb des Gültigkeitsbereichs dieses Modells. Der Gültigkeitsbereich des Modells könnte nur durch Verwendung noch größerer Behälter bei den Experimenten erweitert werden. Die Spanne der in Tabelle 44 dargestellten Wassergehalte sollte allerdings die in der Praxis üblichen Zielwassergehalte bei der technischen Trocknung abdecken können.

Der exakte Wassergehalt der Holzhackschnitzelproben wurde erst nach Durchführung des Experiments bestimmt. Wasser ist jedoch ein Reaktionsprodukt beim Holzabbau. Der Abbau von 1 g Holz produziert 30,2 mmol H<sub>2</sub>O bzw. 0,54 g Wasser. Da maximal 1,27 g Holz abgebaut werden konnten, konnte auch lediglich eine Wassermenge von 0,69 g H<sub>2</sub>O produziert werden. Die durchschnittliche Trockenmasse in den Eimern betrug 1,483 g. Somit könnte der Ausgangswassergehalt um 0,05 % überschätzt worden sein, was völlig akzeptabel erscheint.

Das Holzvolumen bei Versuchsbeginn wurde aus der Trockenmasse abgeleitet. Die Trockenmasse wurde jedoch erst nach dem Versuch bestimmt. Somit war das Holzvolumen zu Beginn etwas größer und das Sauerstoffvolumen etwas niedriger. Der größte Trockenmasseverlust innerhalb der 48 Stunden betrug 0,075 %. Der entsprechende Verlust an Holzvolumen entsprach dann 0,0025 Liter, was in diesem Fall zu einer Überschätzung des Sauerstoffvolumens von 0,04 % geführt hat. Damit erscheint es gerechtfertigt, den Verlust an Holzvolumen zu vernachlässigen.

Der Aschegehalt der Waldrestholzhackschnitzel war mit 6,3 m-% deutlich höher, als zu erwarten gewesen wäre. Womöglich lag eine Verunreinigung mit Mineralboden vor. Somit könnte ein Teil der in den Eimern vorhandenen Trockenmasse kein Holz gewesen sein. Von den im Experiment verwendeten Einzelproben wurde der Aschegehalt allerdings nachträglich nicht bestimmt. Mineralboden hat eine erheblich höhere Dichte als Holz. Beispielsweise beträgt die Korndichte von Quarz  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Beim Holz wurde in den Berechnungen von einer Darrdichte von  $0,43 \text{ g/cm}^3$  ausgegangen. Eine Verunreinigung mit Mineralboden hätte zur Folge, dass das Sauerstoffvolumen in den Eimern unterschätzt worden wäre. Um den Effekt eines solchen Fehlers abzuschätzen, wurde die Trockenmasse pauschal um 5 % reduziert und das dadurch verringerte Holzvolumen sowie das vergrößerte Sauerstoffvolumen abgeleitet. Anschließend wurde die Regression mit den geänderten Werten neu durchgeführt. Die Abbaurate in Tabelle 44 würde sich bei den Waldrestholzhackschnitzeln im ungünstigsten Fall bei einem Wassergehalt von 30 % dadurch von 8,4 % auf 8,7 % erhöhen. Bei einem Wassergehalt von 20 m-% würde sich die Abbaurate um lediglich 0,05 Prozentpunkte erhöhen.

## 10.6 Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Hinblick auf einen Trockenmasseerhalt bei der Lagerung eine Trocknung der Holzhackschnitzel auf einen Wassergehalt von deutlich unter 20 m-% eine Energie- und Zeitverschwendung darstellt. Bei einer durchschnittlichen Lagerungsdauer von beispielsweise einem halben Jahr würden im Fall von Waldrestholz bei 20 m-% Wassergehalt selbst im ungünstigsten Szenario nur 1,7 Prozent der Trockenmasse zersetzt werden. Auch für den Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen ist ein Wassergehalt von 20 m-% ausreichend niedrig. Sofern der Heizungshersteller einen höheren Wassergehalt zulässt, können die Holzhackschnitzel auch auf diesen getrocknet werden. Spätestens ab einem Wassergehalt von 30 m-% ist mit einem deutlichen Verlust an nutzbarer Energie und damit auch mit spürbaren wirtschaftlichen Einbußen zu rechnen. Zudem besteht dann die Gefahr einer Schimmelpilzbildung mit Sporenflug im Holzhackschnitzellager.

Auch während trockener und warmer Sommer dürften Holzhackschnitzel bei einer Lagerung ohne vorherige technische Trocknung kaum Wassergehalte erreichen, die den Trockenmasseabbau ausreichend begrenzen, zumindest nicht innerhalb aller Bereiche der Holzhackschnitzelmiere [61]. Selbst wenn dies im Einzelfall geschehen sollte, sind die Trockenmasseverluste bis dahin erheblich. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, mit einer technischen Trocknung zu warten, bis die Holzhackschnitzel durch natürliche Prozesse vorgetrocknet sind.



## 11 Lagerung vorgetrockneter Holzhackschnitzel unter Vlies

HOFMANN, N.; RIEBLER, M.; SCHULMEYER, F.; KUPTZ, D.

### 11.1 Problem- und Zielstellung

Waldfrische Holzhackschnitzel weisen typischerweise Wassergehalte von etwa 50 m-% auf. Allerdings benötigen vor allem Kleinfeuerungsanlagen für einen optimalen Betrieb Wassergehalte von 15 bis 25 m-%. Durch die technische Trocknung vor der Lagerung können der Trockenmasse- und somit der Energieverlust minimiert werden (siehe Kapitel 9). Deshalb wird die technische Trocknung von Holzhackschnitzeln immer häufiger angewendet. Hinzu kommt, dass beispielsweise bei Biogasanlagen eine bestimmte Abwärmemenge genutzt werden muss, um Fördergelder in voller Höhe zu erhalten (EEG 2012 § 27 Absatz 4) [11]. Holzhackschnitzel mit der Abwärme von Biogasanlagen in Containern (Satz Trocknung) zu trocknen, ist eine weitverbreitete Methode.

Gelagert werden technisch getrocknete Holzhackschnitzel vor allem in Hallen, um eine Wiederbefeuchtung zu vermeiden. Lagerhallen erfordern jedoch eine verhältnismäßig hohe Investition, die eine lange Festlegung auf diese Nutzungsart einschließt [39]. Außerdem führt der Bau einer Lagerhalle oftmals zu langwierigen Genehmigungsverfahren. Wesentlich kostengünstiger ist die Lagerung von Holzhackschnitzeln im Freiland mit einem temporären Regenschutz. Bei der Freilandlagerung von Holzhackschnitzeln kann dazu ein diffusionsoffenes Vlies verwendet werden. Dieses lässt die Verdunstung von Feuchtigkeit aus der Miete zu und hält gleichzeitig große Teile des Niederschlags ab.

Das Ziel dieses Arbeitspakets war es deshalb herauszufinden, ob eine Abdeckung im Freien gelagerter, technisch getrockneter Holzhackschnitzel mit Vlies die Qualität genauso gut erhalten kann wie eine Lagerhalle. In einem Nebenversuch sollte zudem das tatsächliche Regenrückhaltevermögen des verwendeten Vlieses durch eine künstliche Beregnung untersucht werden.

### 11.2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurde das Holzhackschnitzelvlies Polytex (200 g m<sup>-2</sup>, Zill GmbH & Co. KG) verwendet. Dieses besteht aus Polypropylenendlosfasern, ist diffusionsoffen und gleichzeitig wasserabweisend. Es ist reißfest und wesentlich windunempfindlicher als Folien oder Planen. Die UV-Beständigkeit beträgt laut Hersteller vier bis sechs Jahre. Konkrete Angaben zum Niederschlagsschutz, also wie groß der Anteil des Niederschlags ist, den das Vlies abhält, fehlen.

### 11.2.1 Nebenversuch Vliesberegnung

Das Regenrückhaltevermögen des Vlieses sollte aufgrund der fehlenden Daten in einer Versuchsreihe mithilfe einer eigens dafür entworfenen Beregnungskonstruktion im Praxismaßstab näher bestimmt werden. Zudem sollte in einem Laborversuch in kleinerem Maßstab untersucht werden, ob die Alterung des Vlieses einen Einfluss auf dessen wasserabweisende Eigenschaften besitzt. Die Beregnung im Freiland wurde auf einem Holzhackschnitzellagerplatz in Freising (Oberbayern, 48°24'32.3"N 11°42'55.1"E) an einer ca. 3,5 m hohen kegelförmigen Schüttung aus Energierundholzhackschnitzeln durchgeführt (Abbildung 90).



**Abbildung 90:** Versuchsaufbau zur künstlichen Beregnung des Vlieses auf einer ca. 3,5 m hohen Schüttung aus Energierundholzhackschnitzeln: Beregnungsgestell, bestehend aus drei 1 × 1 m großen Beregnungsgittern mit je 110 gleichmäßig verteilten Tropflöchern. Hilfsgestell für die drei Beregnungskanister mit VE-Wasser. Laborschlauchpumpe (auf dem Handwagen) für die konstante Förderung der eingestellten Wassermenge und Trog zum Auffangen des abgeleiteten Beregnungswassers. Die drei verschlossenen Kanister auf dem Boden dienten als Beschwerung.

Auf die Schüttungsflanke, die einen Neigungswinkel von knapp  $45^\circ$  aufwies, wurde ein zuvor unbenutztes Vlies gelegt. Auf diesem wurde dann das Beregnungsgestell platziert, über welches das Vlies auf einer Länge von 4 m und einer Breite von 1 m eine Stunde lang gleichmäßig beregnet wurde. Das abgeleitete Beregnungswasser wurde an der Schüttungsbasis in einem Langtrog gesammelt. Das Vlies reichte dabei einige Zentimeter in den Trog hinein, damit das Wasser, das auf und innerhalb des Vlieses abgeleitet wurde, komplett aufgefangen werden konnte. Nach Beregnungsende wurde der Trog mit zwei Hängewaagen (HCB 50K20, KERN & Sohn GmbH, Messauflösung 20 g und Dini Argeo DFWLID-1, As-Wägetechnik GmbH, Messauflösung 10 g) gewogen, indem er mit zwei an den Enden des Trogs befestigten Schlaufen aufgehängt wurde.

Es wurden zwei Regenintensitäten untersucht: ein Starkregen mit 11,2 mm Niederschlagshöhe und ein schwacher bis mittlerer Regen mit 2,5 mm Niederschlagshöhe. Für die starke Beregnung war ursprünglich eine Niederschlagshöhe von 10 mm geplant, die Förderleistung der Laborpumpe lag jedoch aufgrund des Gefälles im Zu- und Ablauf etwas höher, wie Zwischentests ergaben. Die schwache Beregnung wurde aus ähnlichen Gründen wie bei den Sickerwasserversuchen auf 2,5 mm festgelegt. Einerseits sollte die schwache Beregnung so schwach wie möglich sein, da Niederschlagsereignisse in der Natur je häufiger auftreten, desto schwächer sie sind, andererseits war eine gewisse Beregnungsmenge allein deshalb erforderlich, um die Wasserspeicherkapazität des Vlieses (siehe Abschnitt 11.3.1.1) zu überschreiten. Ein Niederschlag von beispielsweise 1 mm Höhe wäre sehr wahrscheinlich komplett vom Vlies aufgesaugt worden und eine Versuchsreihe somit überflüssig gewesen.



*Abbildung 91: Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen Vliesausschnitts im 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln (links ohne Vlies, rechts mit Vlies)*

Um das (maximale) Wasseraufnahme- und -abgabevermögen besser beurteilen zu können und um herauszufinden, ob eine Benutzung und damit verbundene Alterung die Eigenschaften des Vlieses beeinflussen, wurden zwei kleine Ausschnitte des Vlieses im Labor untersucht. Ein Vliesstück war bislang ungebraucht, das andere war bereits zehn Monate im Freiland verwendet worden. Für den Versuch wurde jedes Vliesstück zuerst auf dem Labortisch ausgelegt und vollständig mit demineralisiertem Wasser durchnässt, bis die maximale Aufnahmekapazität erreicht war und das Wasser an den Rändern austrat. Dann wurde es gewogen und auf eine randvoll mit Energierundholzhackschnitzeln befüllte Kiste gelegt, die im 45°-Winkel aufgestellt war, um praxisnahe Oberflächen- und Neigungsbedingungen zu gewährleisten (Abbildung 91). Das abtropfende Wasser wurde mit zwei Auffangschalen unter der Kiste gesammelt. Innerhalb der folgenden drei Stunden wurde dann zehn Mal die Masse des Vlieses und des abgetropften Wassers gemessen, wobei die Messintervalle zu Beginn kürzer als am Ende waren, da in den ersten Minuten die größten Änderungen erwartet wurden. Zusätzlich wurde mit weiteren Schalen die Verdunstungsrate ( $\text{g min}^{-1}$ ) aus den Schalen ermittelt und diese dann bei der Berechnung der abgetropften Menge berücksichtigt.

Durch die Versuche konnten die maximale Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserabgabegeschwindigkeit des Vlieses direkt gemessen werden. Über die Differenz aus der Anfangswassermenge, der im Vlies verbliebenen Wassermenge und der Wassermenge in den Auffangschalen konnte zu jedem Messzeitpunkt auf die Wassermenge, die in die Holzhackschnitzel gelangt und/oder vom Vlies verdunstet sein musste, geschlossen werden.

### 11.2.2 Hauptversuch zum Vergleich der Freilandlagerung unter Vlies mit der Hallenlagerung

Hauptziel dieses Arbeitspakets war herauszufinden, ob eine Abdeckung technisch bis zur Lagerstabilität getrockneter Energierundholzhackschnitzel mit Vlies im Freiland die Brennstoffqualität und Trockenmasse im selben Maße erhalten kann wie eine Hallenlagerung.

Die Lagerungsdauer wurde entsprechend den Großversuchen des Vorgängerprojekts auf fünf Monate festgelegt [60]. Als Versuchsstandort wurde wie bei den Versuchen zur Lagerung von ungehacktem Holz (Kapitel 5) und zur Lagerung von gesiebten Holzhackschnitzeln (Kapitel 6) ein Lagerplatz südöstlich von München (Putzbrunn, Oberbayern) gewählt. Hier konnte für die Vergleichsmiete ein knapp 6 m breites Segment der Holzhackschnitzellagerhalle für den Versuchszeitraum genutzt und in unmittelbarer Nähe die Freilandmiete aufgebaut werden. Energierundholzhackschnitzel aus Fichte wurden als Sortiment gewählt. Fichte ist die häufigste Baumart in Bayern und Energierundholz hat aufgrund seiner Verwendbarkeit in Kleinf Feuerungsanlagen eine größere Bedeutung bei der technischen Trocknung als Waldrestholz.

Die beiden Versuchsmieten (Freiland und Halle) wurden wie im Vorgängerprojekt und in der Studie zur Lagerung gesiebter Holzhackschnitzel (vgl. Kapitel 6) in diesem Projekt mit Bilanzbeuteln beprobt. Um eine größere Repräsentativität zu erreichen und statistische Auswertungen zu ermöglichen, wurden beim Aufbau des Versuchs insgesamt drei identische Querschnitte mit jeweils zwölf gleichmäßig angeordneten Bilanzbeuteln angelegt (Abbildung 92). Beide Mieten wurden 3 m hoch aufgeschüttet, da dies eine Höhe ist, die mit einem normalen Radlader in der Regel ohne Befahrung des Haufwerks erreicht werden kann. Aus den drei Segmenten und der Höhe von 3 m resultierten ca. 10 m lange und 6 m breite Mieten mit einem Volumen von etwa 80 m<sup>3</sup>.

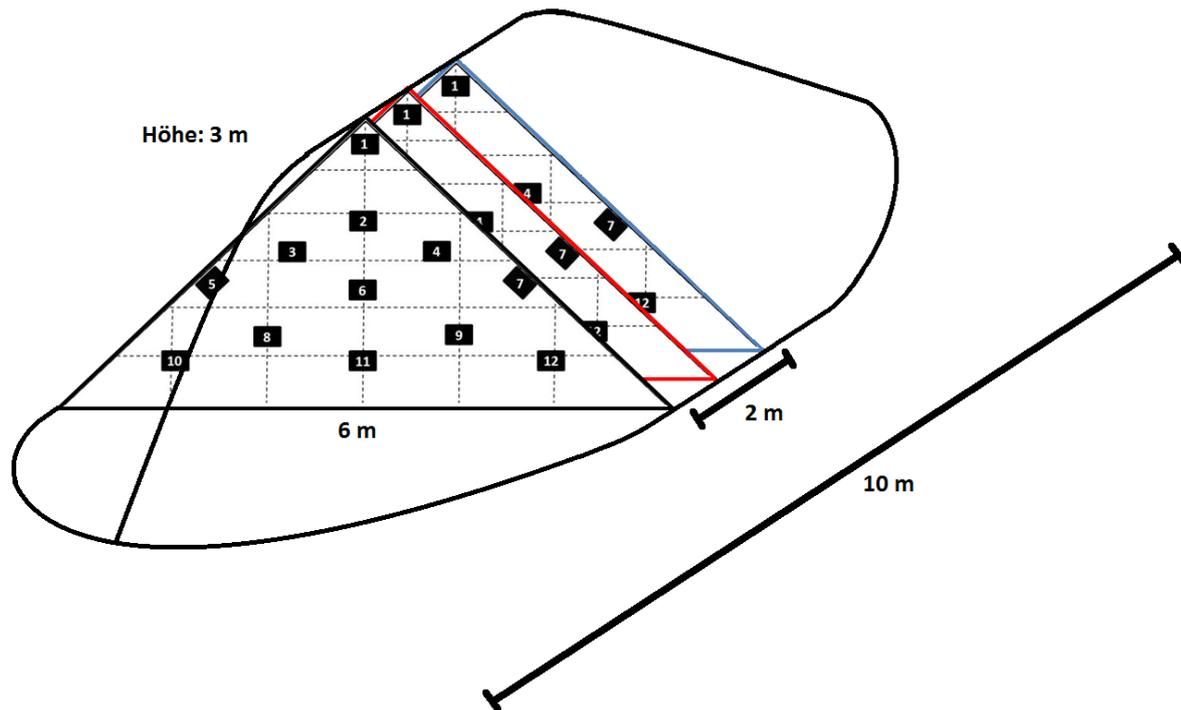


Abbildung 92: Anordnung der 36 Bilanzbeutel in der Holzhackschnitzelmiete im Freiland und der Vergleichsschüttung in der Halle

Ausgehend von den Versuchen zum lagerstabilen Wassergehalt (vgl. Kapitel 10) wurde entschieden, die Holzhackschnitzel auf einen Zielwassergehalt von möglichst 17 m-% technisch zu trocknen. Bei diesem Wassergehalt ist lediglich noch ein Trockenmasseverlust von ca. 1 bis 2 % pro Jahr zu erwarten, falls die Lagerungstemperatur  $34 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht (siehe Kapitel 10). Die Holzhackschnitzel sollten zudem sehr homogen getrocknet werden, um Feuchtenester mit höherer mikrobieller Aktivität zu verhindern und auch, um Aussagen über eine potenzielle Schichtbildung innerhalb der Mieten während der Lagerung treffen zu können. Eine ausreichend homogene Trocknung ist nur möglich, wenn die Holzhackschnitzel während des Trocknungsvorgangs ständig in Bewegung gehalten werden. Deshalb kam hierfür die häufigste Trocknungsart mittels Satzrockner nicht in Frage. Stattdessen wurde sich im Umkreis von ca. 150 km um den Versuchsstandort herum bei vier Firmen, die einen Band-, Wälzbett- oder Schubbodentrockner einsetzen, nach der Trocknungsdienstleistung erkundigt. Die Entscheidung fiel auf den Forstbetrieb Alois Probst (Geiersthal, Niederbayern), der einen Schubbodentrockner über die Abwärme einer „Holz-Kraft-Anlage“ der Firma Spanner Re<sup>2</sup> betreibt. Die Kontrolle des Wassergehalts erfolgt dabei über die Ablufttemperatur des Trockners und mit dem betriebs-eigenen Wassergehaltshandmessgerät (GMH 3810, GHM Messtechnik GmbH), die Regulierung des Zielwassergehalts über die Geschwindigkeit des Schubbodens. Die Genauigkeit der Wassergehaltskonditionierung wurde in einer Vorversuchsreihe überprüft, indem Holzhackschnitzelproben vor Ort mit dem Handmessgerät gemessen und anschließend an der LWF mittels Darrtrocknungsverfahren validiert wurden. Das Handmessgerät unterschätzte den tatsächlichen Wassergehalt im Mittel um 2,3 Prozentpunk-

te. Diese Abweichung wurde bei der Trocknung auf den Zielwassergehalt von 17 m-% für den Hauptversuch berücksichtigt. Laut Betreiber der Trocknungsanlage müsste man dennoch mit einer Unsicherheit von  $\pm 3$  Prozentpunkten bei der Trocknung auf einen bestimmten Zielwassergehalt rechnen. Diese Unsicherheit wurde akzeptiert.

Der Hauptversuch wurde im Juni 2018 begonnen. Nach der technischen Trocknung wurden die ca. 160 Srm Energierundholzhackschnitzel mit zwei Schubboden-Lkw zum Lagerplatz bei Putzbrunn gefahren. Während des Aufbaus wurden an jeder Miete repräsentative Proben für die Bestimmung des Wassergehalts, des Aschegehalts, der Schüttdichte und der Partikelgrößenverteilung genommen. Die Bilanzierung der Trockenmasseverluste erfolgte mithilfe der 36 Bilanzbeutel, die beim Aufbau der Mieten rasterförmig in diesen angeordnet (Abbildung 92) und am Ende der Lagerung wieder geborgen wurden.

Eine Holzhackschnitzelmiete (ca. 80 Srm) wurde auf einer wasserdichten Folie im Freien errichtet und mit Vlies abgedeckt, eine Vergleichsmiete ohne Vlies (ebenfalls ca. 80 Srm) wurde in einer Lagerhalle mit Betonboden auf demselben Lagerplatz aufgebaut (Abbildung 93). Die wasserdichte Folie (LDPE-Silofolie  $150 \text{ g m}^{-2}$ , dm-Folien GmbH) sollte verhindern, dass die Freilandmiete Feuchtigkeit vom unbefestigten, mit festgefahrenen Althackschnitzeln bedeckten Boden aufnehmen würde.

Neben der Holzhackschnitzelmiete im Freien wurde eine Wetterstation (iMETOS pro, Pessl Instruments GmbH, Abbildung 93, oberes Bild) aufgestellt, um kontinuierlich die Witterungsbedingungen während des kompletten Lagerungszeitraums direkt an der Versuchsmiete (v. a. Lufttemperatur und Niederschlag) sowie über eine angeschlossene Fühlerkette die Mietentemperatur zu messen. In der Vergleichsmiete wurden in drei ausgewählten Bilanzbeuteln insgesamt sechs Temperaturlogger (Thermo Button 21G, Fa. Proges Plus) platziert, um die Temperaturentwicklung beider Mieten miteinander vergleichen zu können.

Die Bilanzbeutel wurden Anfang November 2018 nach fünf Monaten Lagerungsdauer händisch und mithilfe eines Radladers geborgen und hinsichtlich ihres Wassergehalts und Trockenmasseverlusts analysiert. Rückstellproben für eventuelle Analysen weiterer physikalischer Brennstoffparameter (Aschegehalt, Partikelgrößenverteilung etc.) wurden genommen und aufbewahrt, falls die Wassergehalts- und Trockenmasseänderungen einen Einfluss auf diese Parameter vermuten ließen. Die Trockenmasseverluste wurden um die Handling-Verluste der Beutel (Transport zur Miete, Eingraben, Ausgraben/Herausziehen, Abbürsten) gemäß den Ergebnissen aus Nebenversuchen des Vorgängerprojekts korrigiert [60].



*Abbildung 93: Miete aus technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln mit Vliesabdeckung und Wetterstation im Freien (oben). Aufbau der Vergleichsmiete in der Lagerhalle mit Bilanzbeuteln zur Probenahme (unten links). Fertiggestellte Vergleichsmiete (unten rechts)*

## 11.3 Ergebnisse und Diskussion

### 11.3.1 Nebenversuch Vliesberegnung

#### 11.3.1.1 Freilandversuch

Die künstliche Beregnung des Vlieses im Praxismaßstab ergab eine mittlere Regenrückhaltequote von  $62,3 \pm 9,7$  % bei starker Regenintensität und eine Rückhaltequote von  $89,9 \pm 4,3$  % bei schwacher bis mittlerer Regenintensität (Tabelle 45). Da Niederschlagsereignisse keiner Normalverteilung folgen, sondern ihre Häufigkeit mit der Stärke abnimmt (siehe Abschnitt 11.3.2.1), musste die hohe Rückhaltequote bei der schwachen bis mittleren Beregnung stärker gewichtet werden als die niedrigere Rückhaltequote bei der starken Beregnung. Setzt man eine leicht exponentielle Abnahme der Rückhaltequote mit steigender Niederschlagsintensität voraus, lag die mittlere effektive Rückhaltequote während des Hauptversuchs bei 84,7 %. Diese Quote kann jedoch regional und jahreszeitlich entsprechend der Verteilung der Niederschlagsintensitäten variieren.

*Tabelle 45: Regenrückhaltequote bei der künstlichen Beregnung des Hackschnitzelvlieses mit schwacher bis mittlerer (2,5 mm) und starker (11,2 mm) Regenintensität. Beregnungsdauer jeweils 60 Minuten, beregnete Fläche 4 m<sup>2</sup>*

Durchgangs-Nr.	Regenrückhaltequote in %	
	Starkregen (11,2 mm)	Schwacher bis mittlerer Regen (2,5 mm)
1	78,8	85,6
2	59,9	94,2
3	53,5	90,0
4	56,2	–
5	60,6	–
6	79,0	–
7	68,2	–
8	56,3	–
9	53,5	–
10	57,0	–
Mittelwert	62,3	89,9
Standardabweichung	9,7	4,3

Auffällig ist die relativ hohe Standardabweichung bei den Versuchen mit starker Beregnung. Es bestand keine Korrelation zwischen Regenrückhaltequote und relativer Luftfeuchtigkeit oder Lufttemperatur während der Beregnung. Die Verdunstung während des Versuchs hatte demnach keinen nachweisbaren Einfluss auf die Schwankungen der Er-

gebnisse. Unregelmäßigkeiten in der Förderleistung der Pumpe konnten durch Nebenversuche als Ursache ebenso ausgeschlossen werden. Mögliche Gründe waren z. B. Veränderungen der Wassergehalte der Holzhackschnitzel in der Deckschicht zwischen den Versuchsdurchgängen, die eventuell zu einer unterschiedlichen Wasseraufnahme geführt haben, oder Unterschiede in der im Vlies gespeicherten Restwassermenge zum Zeitpunkt der Wegnahme des Auffangtrogs. Insgesamt lagen die Schwankungen angesichts eines technisch anspruchsvollen Beregnungsversuchs im Praxismaßstab jedoch noch in einem vertretbaren Rahmen.

### **11.3.1.2 Laborversuch**

Sowohl das neue als auch das gebrauchte Vlies wurden je zweimal getestet. Die Verläufe waren bei beiden Durchgängen ähnlich. Das gebrauchte Vlies konnte mehr Wasser aufnehmen (mittlere max. Wasseraufnahme Vlies neu:  $1,64 \text{ l m}^{-2}$ , Vlies alt:  $1,99 \text{ l m}^{-2}$ ) und gab es auch etwas langsamer ab. Der nicht näher differenzierbare Anteil des Wassers, der in die Holzhackschnitzel gelangte oder während des Versuchs verdunstete (beides gemeinsam wird hier als „Restwasser“ bezeichnet), war bei den Durchgängen mit dem neuen Vlies leicht höher als bei denen mit dem gebrauchten Vlies (Abbildung 94 und Abbildung 95). Die Ursache könnte z. B. in einer Vergrößerung der inneren Oberfläche durch Staubpartikel gelegen haben. Das alte Vlies war nicht nur optisch verstaubt, sondern wog in trockenem Zustand auch ca. 25 % mehr als das neue, was ebenso auf Verschmutzungen hinwies. Insgesamt war jedoch von keiner relevanten Veränderung bzw. Funktionsbeeinträchtigung des Vlieses durch Alterung auszugehen, zumindest nicht nach knapp einem Jahr Benutzung im Freiland.

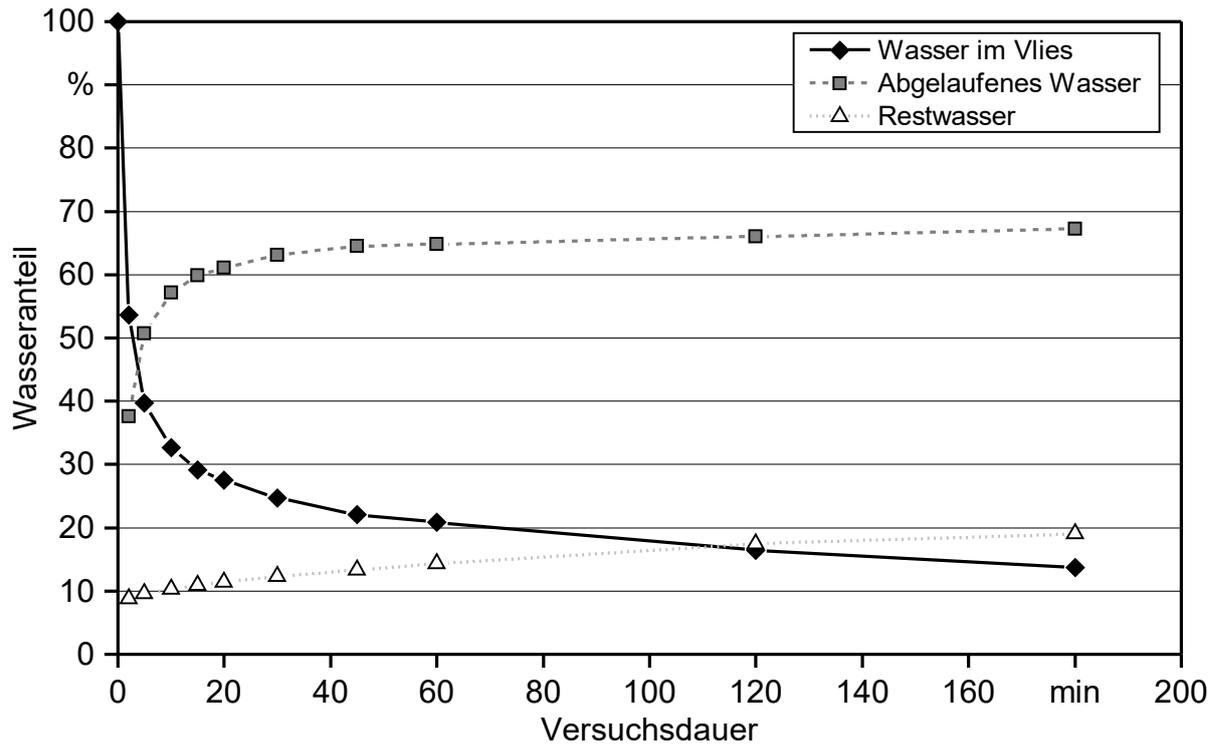


Abbildung 94: Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen, unbenutzten Vliesausschnitts in einem 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln

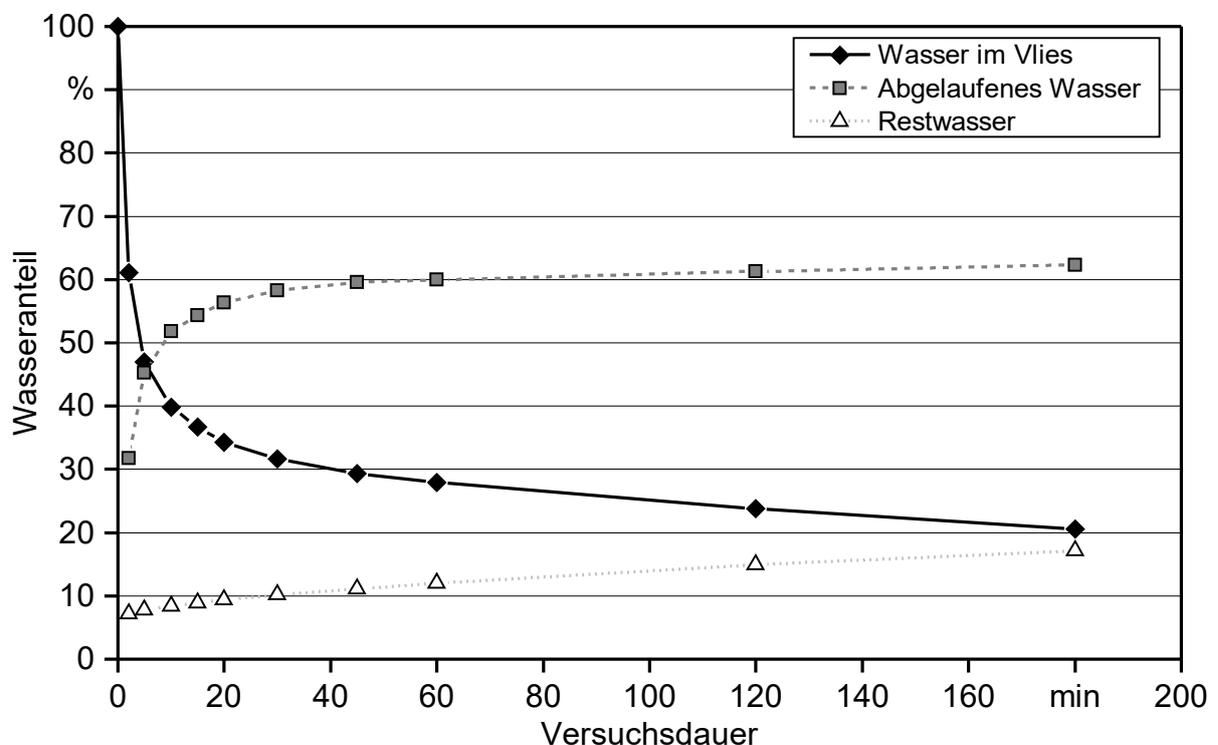


Abbildung 95: Labortest zum Wasseraufnahme- und -abgabevermögen eines 62 cm × 36 cm großen, bereits zehn Monate im Freilandland genutzten Vliesausschnitts in einem 45°-Winkel auf Energierundholzhackschnitzeln

### 11.3.2 Hauptversuch Freiland- und Hallenlagerung

#### 11.3.2.1 Witterung

Die durchschnittliche Lufttemperatur betrug auf dem Lagerplatz im Versuchszeitraum 15,0 °C, die Niederschlagssumme 462,6 mm (Abbildung 96). An der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Oberhaching-Laufzorn, 11 km entfernt) lagen die Lufttemperaturen im Versuchszeitraum um 1,3 °C über dem langjährigen Mittel und es fielen 87,4 % des langjährigen mittleren Niederschlags [24].

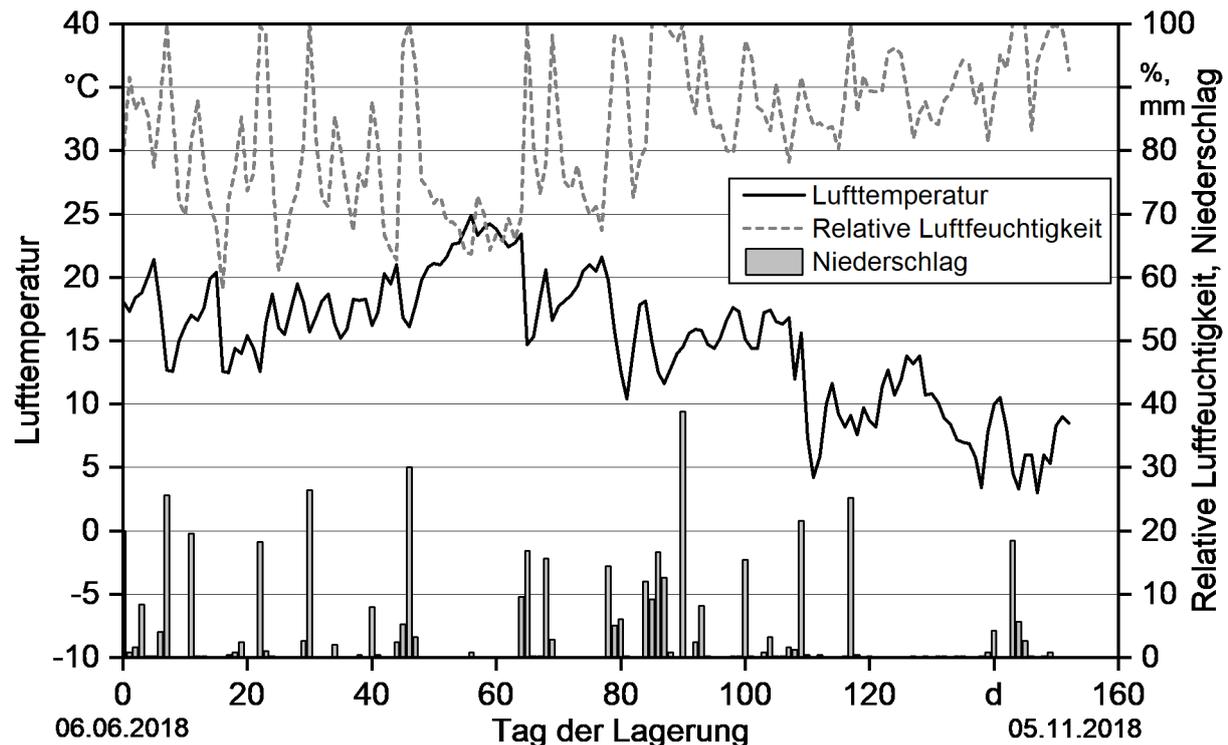


Abbildung 96: Niederschlag (Tagessumme), Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (jeweils Tagesmittelwerte) auf dem Lagerplatz während des fünfmonatigen Versuchs zur Lagerung technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzel

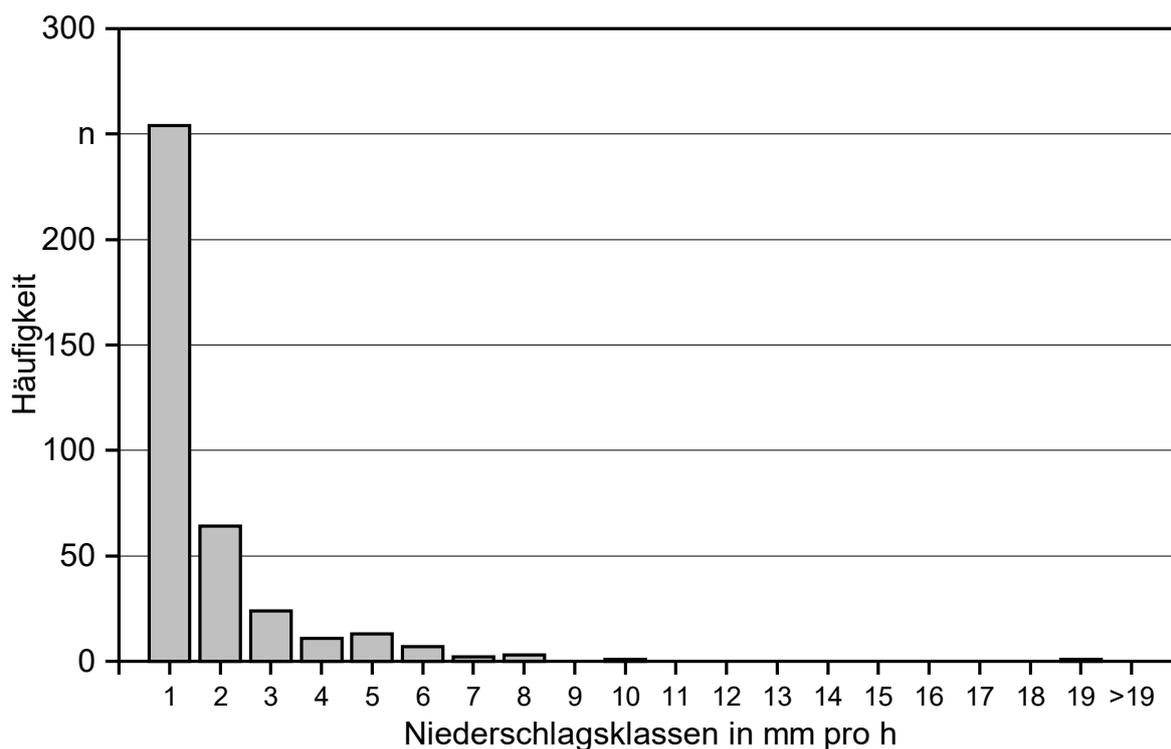


Abbildung 97: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsintensitäten auf dem Lagerplatz während des fünfmonatigen Versuchs (05.06.2018 bis 05.11.2018)

Die Verteilung der Niederschlagsintensitäten während des Versuchs zeigte, dass schwache Niederschlagsereignisse wesentlich häufiger auftreten als stärkere (Abbildung 97). Auf die Gesamtsumme des Niederschlags (462,6 mm) bezogen bedeutete dies, dass Ereignisse mit einer Intensität von  $\leq 1 \text{ mm h}^{-1}$  insgesamt 103,4 mm Niederschlag verursacht haben, Ereignisse mit einer Intensität von  $\leq 2,5 \text{ mm h}^{-1}$  insgesamt 236,6 mm und Ereignisse mit einer Intensität von  $\geq 10 \text{ mm h}^{-1}$  insgesamt 18,2 mm. Etwa die Hälfte der Niederschlagsmenge fiel demnach bei schwachen Niederschlagsintensitäten, knapp 45 % der Niederschlagsmenge zwischen 2,5 und  $10 \text{ mm h}^{-1}$  und nur ca. 4 % darüber. Die Verteilung der Niederschlagsintensitäten hatte entsprechend den Ergebnissen des Nebenversuchs zur Vliesberegnung einen direkten Einfluss auf die Effektivität des Holzhackschnitzelvlieses (siehe Abschnitt 11.3.1.2).

### 11.3.2.2 Mietentemperatur

Die Temperatur in den Mieten aus technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln folgte ungefähr der Umgebungslufttemperatur (Abbildung 98 und Abbildung 99).

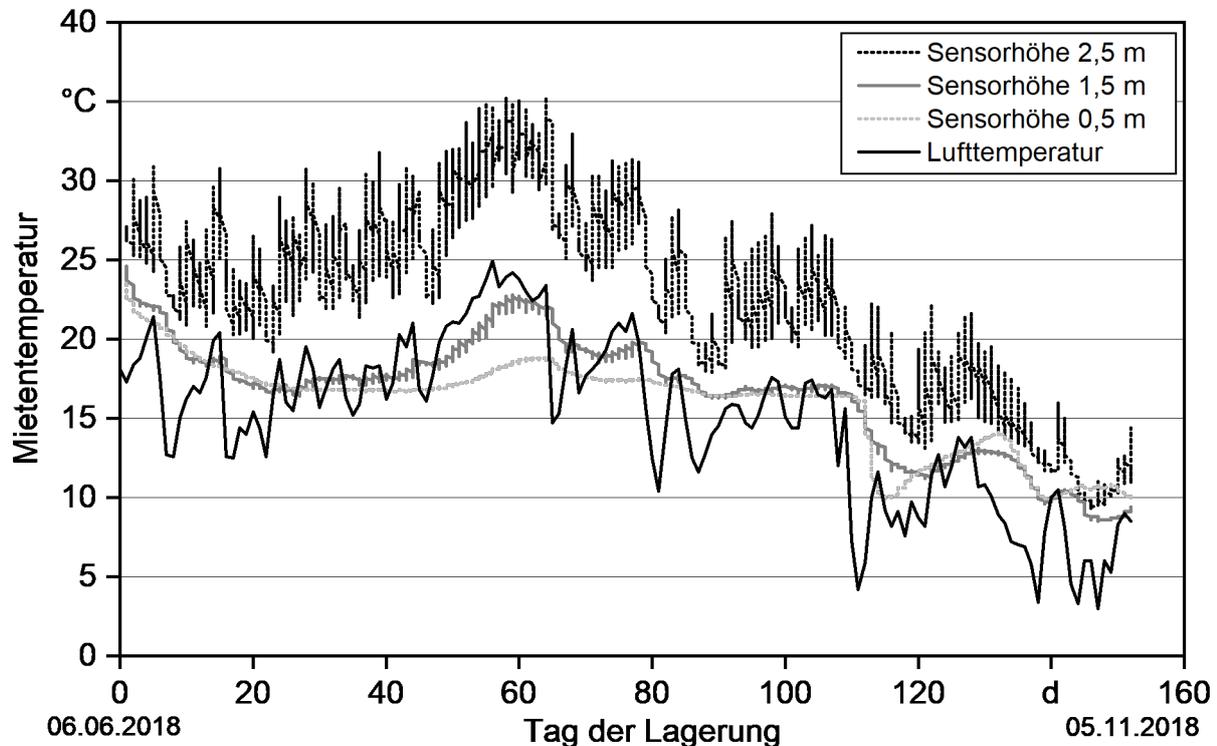


Abbildung 98: Mietentemperaturen in der Freilandmiete mit Vliesabdeckung in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund) während des fünfmonatigen Versuchs mit technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln

Ausnahmen bildeten die letzten Lagerungswochen und die Temperatur in 2,5 m Höhe bei der Freilandmiete. In den letzten Lagerungswochen lag die Lufttemperatur etwa 5 bis 10 °C unter den Mietentemperaturen. Die Ursache dafür waren Wärmespeichereffekte der Holzhackschnitzel, weshalb die Temperaturen vor allem nachts in den Mieten nicht so weit abfielen wie im Freien. Die erhöhten Mietentemperaturen am obersten Sensor der Freilandmiete waren auf die direkte Sonneneinstrahlung und einen Wärmestau unter dem Vlies zurückzuführen.

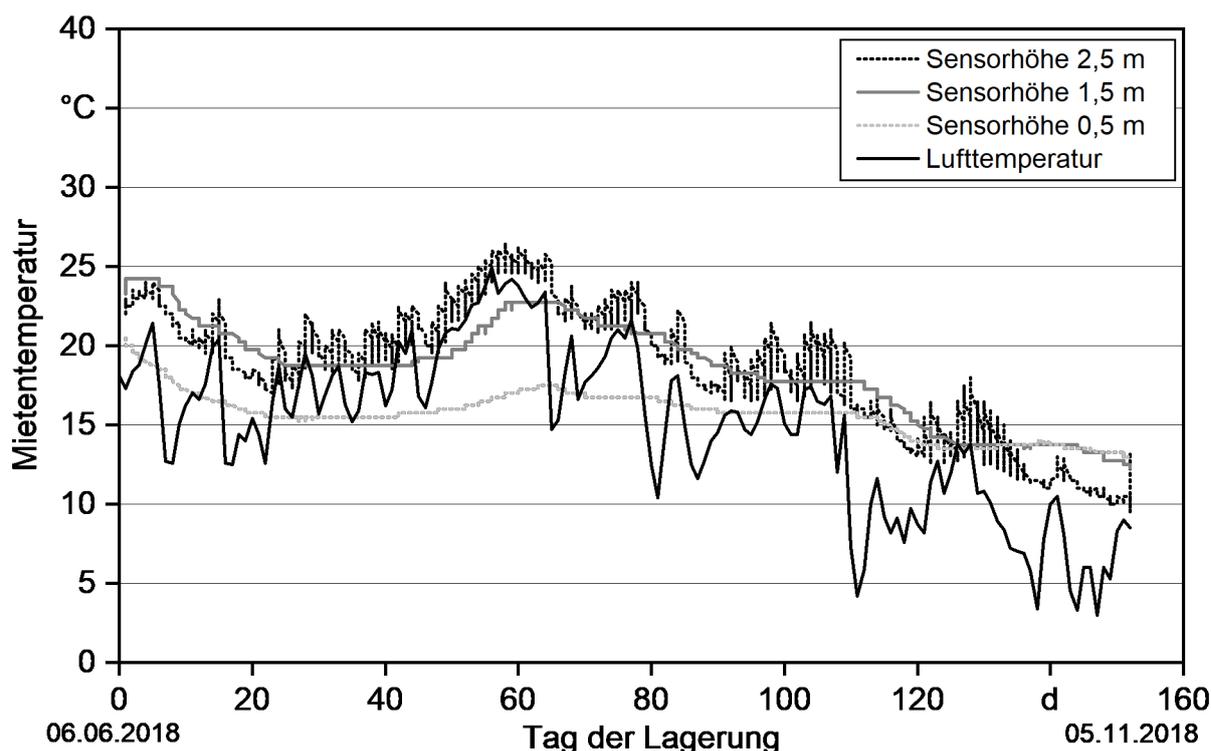


Abbildung 99: Mietentemperaturen in der Hallenmiete in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund) während des fünfmonatigen Versuchs mit technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzeln

Die mittleren Mietentemperaturen in 0,5 und 1,5 m Messhöhe unterschieden sich über die gesamte Lagerungsdauer zwischen den beiden Varianten Freiland- und Hallenlagerung nur geringfügig (Tabelle 46). In der Kernzone der Mieten konnte gegenüber der Umgebungslufttemperatur kaum ein Anstieg gemessen werden. Dies deutete darauf hin, dass es zu keiner nennenswerten mikrobiellen Aktivität in den Holzhackschnitzeln kam. Zudem lässt sich im Hinblick auf die Lagerstabilitätsversuche (siehe Kapitel 10) festhalten, dass die durchschnittlichen Temperaturen in Mieten aus technisch relativ stark getrockneten Holzhackschnitzeln unter mitteleuropäischen Klimabedingungen auch im Sommer eher bei 21 °C als bei 34 °C liegen.

Tabelle 46: Mittlere Mietentemperaturen während der fünfmonatigen Lagerungsdauer in der Freilandmiete mit Vlies und in der Hallenmiete in verschiedenen Höhen (0,5 m, 1,5 m und 2,5 m über Grund)

	Freilandmiete mit Vlies	Hallenmiete
Mietentemperatur 2,5 m (°C)	22,3	18,5
Mietentemperatur 1,5 m (°C)	16,6	18,5
Mietentemperatur 0,5 m (°C)	15,9	15,7

### 11.3.2.3 Wassergehalt

Der mittlere Wassergehalt der technisch getrockneten Energierundholzhackschnitzel betrug bei Einlagerung 14,2 m-% (Freilandmiete mit Vlies) bzw. 14,4 m-% (Hallenmiete) (Tabelle 47). Somit lag der mittlere Wassergehalt beider Mieten zwar unter dem eigentlich vorgegebenem Zielwassergehalt von 17 m-%, aber noch innerhalb des vom Betreiber der Trocknungsanlage zugesicherten Schwankungsbereichs von  $\pm 3$  Prozentpunkten. Die sehr geringen Standardabweichungen zeigten, dass mit dem eingesetzten Schubbodentrockner eine sehr homogene Trocknung erzielt werden konnte. Zudem waren mit nur 0,2 Prozentpunkten Abweichung die mittleren Wassergehalte beider Mieten nahezu identisch und somit die beiden unterschiedlichen Lagermethoden gut vergleichbar. Bei Auslagerung lag der mittlere Wassergehalt bei 14,1 m-% (Freilandmiete mit Vlies) bzw. bei 14,8 m-% (Hallenmiete). Folglich kam es praktisch zu keiner Veränderung des Wassergehalts während der fünfmonatigen Lagerung. Die Spanne der Wassergehalte aller Bilanzbeutel ( $n = 72$ ) lag zwischen 12,3 m-% und 16,5 m-%, mit Ausnahme eines Beutels an der Mietenbasis (20,4 m-%). Somit kam es während der Lagerung weder durch Niederschlag (Freiland) noch durch Kondensation zu einer Schichtbildung innerhalb der Mieten. Die im Nebenversuch ermittelte hohe Niederschlagsrückhaltequote des verwendeten Vlieses bestätigte sich also auch unter Praxisbedingungen im Freilandversuch.

*Tabelle 47: Wassergehalte und Trockenmasseverlust bei Freilandlagerung mit Vlies und bei Hallenlagerung. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung ( $n = 36$ )*

	Freilandmiete mit Vlies	Hallenmiete
Wassergehalt (m-%), Einlagerung	14,2 $\pm$ 0,4	14,4 $\pm$ 0,2
Wassergehalt (m-%), Auslagerung	14,1 $\pm$ 1,3	14,8 $\pm$ 0,6
Trockenmasseverlust (%), Auslagerung	0,0 $\pm$ 0,4	-0,1 $\pm$ 0,4

### 11.3.2.4 Trockenmasseverlust

Weder bei der Freilandmiete noch bei der Hallenmiete konnte nach fünf Monaten Lagerungsdauer ein Trockenmasseverlust nachgewiesen werden (Tabelle 47). Offensichtlich waren die Wassergehalte niedrig genug, um mikrobielle Aktivität zu verhindern. Auch eine fehlende oder zumindest sehr schwache Eigenerwärmung deutete darauf hin, dass kaum Zersetzungsprozesse auftraten (siehe Abschnitt 11.3.2.1). Zieht man die Ergebnisse aus den Versuchen zum lagerstabilen Wassergehalt heran (Sauerstoffzehrung, siehe Abschnitt 10.4.6), hätte in den Energierundholzhackschnitzeln bei einer Lagerungstemperatur von ca. 21 °C und einem Wassergehalt von 14,5 m-% in fünf Monaten ein Trockenmasseverlust von 0,2 bis maximal 0,3 % auftreten können. Dies stimmt sehr gut mit den Ergebnissen aus diesem Versuch überein. Weitere Untersuchungen könnten

mit einem höheren Wassergehalt, z. B. 20 m-%, durchgeführt werden, um herauszufinden, ob dann im Freiland und/oder in der Halle eine Schichtbildung und Zersetzung auftritt und wie gut sich die Ergebnisse der verschiedenen Forschungsansätze (Bilanzbeutel im Vergleich zur Sauerstoffmessung) decken. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind allerdings nur belastbar, wenn sich der Wassergehalt über die Lagerungsdauer nicht wesentlich ändert.

### 11.3.2.5 Aschegehalt, Schüttdichte und Partikelgrößenverteilung

Der mittlere Aschegehalt war mit deutlich unter 1 m-% bei beiden Mieten zum Zeitpunkt der Einlagerung sehr niedrig (Tabelle 48). Dies spricht für eine hohe Qualität des Hackholzes und eine saubere Aufbereitung. Auch beim Aschegehalt war die Standardabweichung extrem niedrig, was ebenfalls zeigt, dass die Hackschnitzel während der technischen Trocknung sehr gut homogenisiert wurden. Aufgrund der geringen bzw. ausgebliebenen Änderungen im Wassergehalt und in der Trockenmasse wurde auf eine Analyse des Aschegehalts der Rückstellproben von der Auslagerung verzichtet, da keine Veränderungen zu erwarten gewesen waren.

*Tabelle 48: Aschegehalt und Schüttdichte der Holzhackschnitzel für den Lagerungsversuch technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wf = wasserfreie Bezugsbasis)*

	Freilandmiete mit Vlies	Hallenmiete
Aschegehalt (m-%, wf)	0,6 $\pm$ 0,0 (n = 5)	0,7 $\pm$ 0,1 (n = 5)
Schüttdichte (kg m <sup>-3</sup> , wf)	169,9 $\pm$ 1,1 (n = 5)	173,1 $\pm$ 1,6 (n = 5)

Der Feinanteil (Partikel  $\leq$  3,15 mm) der in der Halle gelagerten Holzhackschnitzel war etwa doppelt so hoch wie bei den Holzhackschnitzeln der Freilandmiete (Abbildung 100). Deshalb lag der Medianwert der Größenverteilung bei den Freilandhackschnitzeln bei 9,7 mm, bei den Hallenhackschnitzeln bei 8,1 mm. Ursache für den unterschiedlich hohen Feinanteil waren vermutlich sehr dicke Stammabschnitte (Durchmesser bis 75 cm), die überwiegend in der zweiten Auftraghälfte gehackt wurden und laut Maschinenführer maschinenbedingt zu einem höheren Feinanteil führen. Offensichtlich hatte der höhere Feinanteil bei diesem niedrigen Wassergehalt jedoch keinen begünstigenden Effekt auf die Zersetzung (siehe Abschnitt 11.3.2.4). Die Hauptfraktion ( $\geq$  60 m-%) der Partikel wies bei beiden Mieten eine Größe zwischen 3,15 mm und 16 mm auf. Bei beiden Mieten war eine Einteilung nach DIN EN ISO 17225-4 [28] in die Klasse P16S möglich, die Holzhackschnitzel wären also auch für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet.

Die Schüttdichte (wf) lag um etwa 10 bis 20 kg m<sup>-3</sup> über dem Normalwert für Energierundholzhackschnitzel, da zum Zeitpunkt der Befüllung des Probengefäßes wegen des niedrigen Wassergehalts schon eine gewisse Schrumpfung eingetreten war und die Par-

tikel zudem weniger Reibungswiderstand aufwiesen (siehe Abschnitt 5.3.5). Die niedrige Standardabweichung zeigte erneut, dass die Holzhackschnitzel sehr gut homogenisiert waren. Die Schüttdichte lag bei der Hallenmiete etwas höher als bei der Freilandmiete. Dies könnte durch den bei dieser Miete höheren Feinanteil und eine damit verbundene bessere Auffüllung der Zwischenräume bedingt gewesen sein.

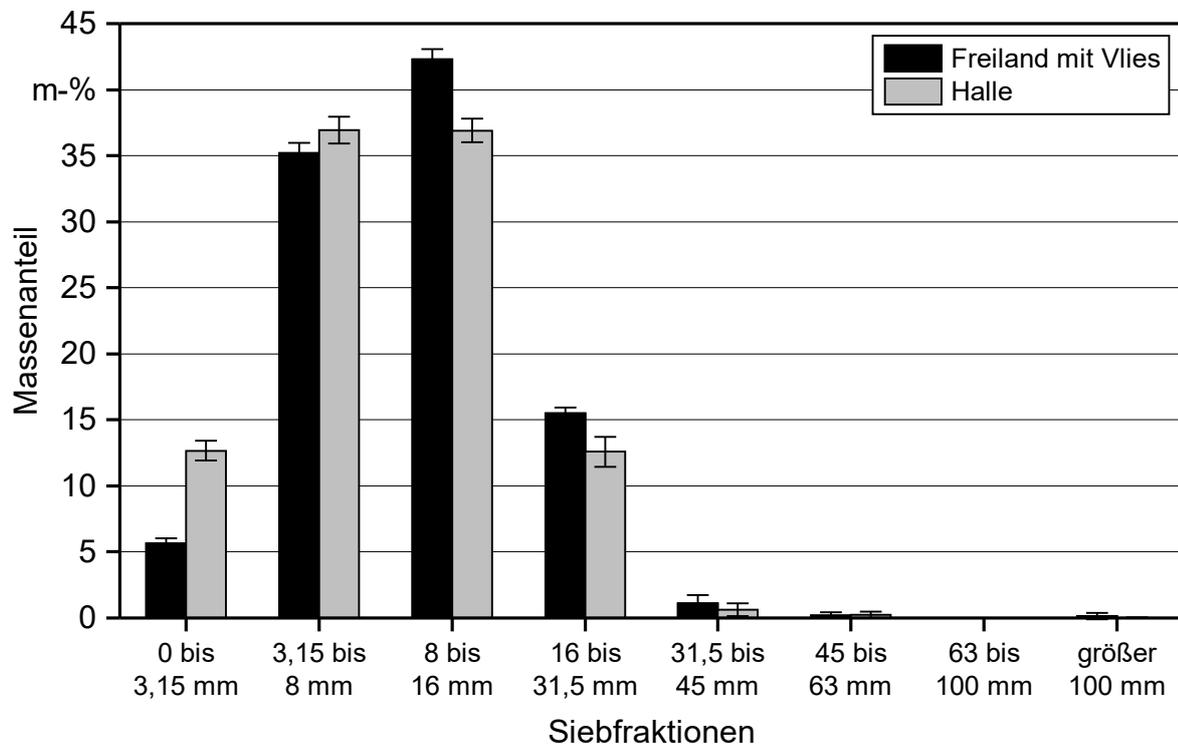


Abbildung 100: Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$  Standardabweichung) der Energie- rundholzhackschnitzel bei der Freilandlagerung mit Vlies und bei der Hallenlagerung

#### 11.4 Zusammenfassende Bewertung

Die vermehrte technische Trocknung von Holzhackschnitzeln erfordert den Einsatz re-gengeschützter Lagerungsmöglichkeiten. Lagerhallen sind dafür jedoch nicht immer die beste Option, da sie hohe Investitionskosten mit sich bringen, ein Genehmigungsverfahren bedingen und aufgrund der Kapitalbindung eine lange Nutzungsdauer voraussetzen. Eine Abdeckung der Holzhackschnitzel mit einem verhältnismäßig kostengünstigen Vlies während des Lagerungszeitraums kann als Alternative angesehen werden. Zudem ermöglicht der Einsatz von Abdeckvlies beispielsweise eine schnelle Reaktion auf günstig am Markt verfügbares Material und eine flexible Anordnung der Holzhackschnitzelmieten auf dem Betriebshof bzw. Lagerplatz des Nutzers.

In Nebenversuchen, bei denen das untersuchte Abdeckvlies (Polytex,  $200 \text{ g m}^{-2}$ , Zill GmbH & Co. KG) künstlich beregnet wurde, zeigte sich ein hohes Niederschlags-rückhaltevermögen von im Mittel mehr als 80 %. Ein einjähriger Gebrauch im Freiland

wirkte sich nicht negativ auf dessen Eigenschaften aus. Die Hauptversuche in diesem Arbeitspaket ergaben, dass die Lagerung technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzel unter dem diffusionsoffenen Abdeckvlies im Freiland die Qualität hinsichtlich des Wassergehalts und auch die Trockenmasse der Holzhackschnitzel genauso gut erhalten konnte, wie die Lagerung in einer großen Halle. In beiden Varianten veränderte sich über die Lagerungsdauer von fünf Monaten der mittlere Wassergehalt von ca. 14 m-% nur um weniger als einen Prozentpunkt. Die Niederschlagshöhe (462,2 mm) entsprach während des Versuchszeitraums ungefähr dem langjährigen Mittel am Lagerungsort bei München. Trockenmasseverluste wurden weder bei der Freiland- noch bei der Hallenvariante des Versuchs festgestellt. Somit blieb auch der bei der Verbrennung nutzbare Energieinhalt der Holzhackschnitzel während der Lagerung konstant. Eine Veränderung weiterer Qualitätsparameter, wie Aschegehalt und Partikelgrößenverteilung, wurde nicht gemessen, konnte jedoch aufgrund der fehlenden Zersetzungsprozesse nahezu ausgeschlossen werden.

Inwiefern die Lagerung im Freiland unter Vlies auch bei höheren Wassergehalten und Niederschlägen der Hallenlagerung ebenbürtig ist, konnte mit diesem Versuch nicht abschließend beurteilt werden.

Das Ab- und Aufdecken der Haufwerke bedeutet einen zusätzlichen Arbeitsschritt. Dieser kann bei Nässe bzw. Schnee- oder Eisanhaftungen aufgrund des hohen Flächengewichts des nassen Vliesstoffs erschwert sein. Generell wird dafür im Regelfall eine Maschine benötigt. Demnach ist die Nutzung von Vliesabdeckungen, wie in dieser Studie untersucht, für bessere Brennstoffqualitäten (z. B. Holzhackschnitzel aus Energierundholz oder aufbereitete Ware) empfehlenswert.



## 12 Änderung im Fließ- und Verbrennungsverhalten durch die Lagerung

KUPTZ, D.; MENDEL, T.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H.

Durch biologische Abbauprozesse können sich physikalische Brennstoffeigenschaften, z. B. die Schütt- und Rohdichte des Holzes, der Wassergehalt oder die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel ändern. Dies könnte sich auf das Fließverhalten auswirken, was z. B. durch eine veränderte Brückenbildungsneigung erkennbar wäre. Unterschiedliche Lagerungs- und Trocknungsarten könnten sich aber auch auf das Verbrennungsverhalten auswirken.

### 12.1 Problem- und Zielstellung

Die Brückenbildungsneigung von Festbrennstoffen ist besonders bei der Lagerung im Brennstoffbunker und bei der Förderung des Brennstoffs in den jeweiligen Kessel von Bedeutung. So können zum Beispiel ungünstige Fließeigenschaften durch Hohlraum- oder Brückenbildung die Brennstoffzufuhr behindern und im schlimmsten Fall eine Betriebsstörung verursachen [52] [58]. Glatte Partikeloberflächen und gleichmäßige Korngrößen wirken sich meist positiv auf die Brückenbildungsneigung von Festbrennstoffen aus, wohingegen ein hoher Wassergehalt, hohe Schütthöhen und eine hohe Anzahl langer Partikel die Brückenbildungsneigung verstärken [52] [58].

Je nach Art der Lagerung kann sich die Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln maßgeblich ändern, wodurch sich positive oder negative Effekte auf die Brückenbildungsneigung ergeben könnten. Ebenso könnte das Verbrennungsverhalten, vor allem die Freisetzung von gas- und partikelförmigen Emissionen, durch Zersetzungsprozesse der Brennstoffe bei der Lagerung verändert werden. Das Ziel dieser Studie war es daher, den Einfluss der Lagerungsart auf Fließ- und Verbrennungseigenschaften von Holzhackschnitzeln zu untersuchen. Dabei wurden bis zu vier Lagerungsvarianten je Holzhackschnitzelcharge verglichen:

- die technische Trocknung im Satzrockner,
- die technische Trocknung im Satzrockner mit anschließender fünfmonatiger Lagerung der getrockneten Brennstoffe,
- die natürliche Trocknung der Brennstoffe in Lagermieten (fünf Monate),
- die Konservierung der Brennstoffe in Lagersilos unter Luftabschluss (fünf Monate).

Anhand der Ergebnisse lässt sich der Einfluss der Lagerungsart sowohl auf den störungsfreien Anlagenbetrieb als auch auf die bei der Verbrennung freigesetzten Luftschadstoffe abschätzen.

## 12.2 Material und Methoden

### 12.2.1 Versuchsbrennstoffe

Bei den Versuchen wurden drei Sortimente verglichen: fein gehackte Energierundholz- und Waldrestholzhackschnitzel aus den Untersuchungen zu Kapitel 6 sowie grob gehackte Waldrestholzhackschnitzel aus den Versuchen zu Kapitel 7 (Versuchsreihe B). Die Brennstoffe entstammen somit realen Freilandmieten sowie den Siloversuchen zu Kapitel 7.4. Tabelle 49 zeigt eine Übersicht über die untersuchten Brennstoffe.

*Tabelle 49: Versuchsbrennstoffe für die Analyse der Fließ- und Verbrennungseigenschaften*

Brennstoff	Technisch getrocknet	Technisch getrocknet und gelagert	In Miete gelagert	In Silo gelagert
Fein gehackte Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (Kapitel 6)	X	X	X	
Fein gehackte Holzhackschnitzel aus Energierundholz (Kapitel 6)	X	X	X	
Grob gehackte Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (Unterkapitel 7.4)	X	X	X	X

Zum Zeitpunkt der Brennstoffanlieferung wurden von jeder Holzhackschnitzelcharge zunächst jeweils 4 Srm abgetrennt und am TFZ mithilfe eines Satzrockners auf einen Wassergehalt von 15 m-% technisch getrocknet. Der verwendete Satzrockner ist in Kapitel 9 beschrieben. Nach der Trocknung wurden die 4 Srm Holzhackschnitzel manuell homogenisiert und anschließend repräsentativ in zwei Teilchargen je 2 Srm geteilt. Eine der beiden Chargen wurde direkt nach der Trocknung für die Untersuchungen zu den Brückenbildungs- und Verbrennungseigenschaften verwendet. Die andere Charge wurde in Bigbags abgefüllt und für den Zeitraum von fünf Monaten (Mai bis Oktober) in einem wind- und regengeschützten Außenlager am Betriebshof des TFZ aufbewahrt.

Die übrigen Holzhackschnitzel je Liefercharge wurden entweder in Mieten oder in abgedichteten Silos jeweils für fünf Monate von Mai bis Oktober gelagert (siehe Kapitel 6 und 7). Nach der Lagerung wurden je Sortiment und Lagervariante ca. 2 Srm an Probe gewonnen. Diese wurden ebenfalls auf einen Wassergehalt von 15 m-% im Satzrockner des TFZ getrocknet, sofern dieser Wert nicht bereits durch die vorangegangene natürliche Trocknung erreicht worden war.

Vor der Analyse der Brückenbildungsneigung (siehe Abschnitt 12.2.2) wurde jede Charge durch dreimaliges manuelles Umschütten mit Schaufeln in Anlehnung an DIN EN ISO

14780 [34] homogenisiert. Dieser Vorgang erfolgte auf einer Plane, um einen Eintrag von Fremdstoffen zu verhindern. Aus dem homogenisierten Haufen wurden Proben zur Wassergehaltsbestimmung ( $n = 5$ , DIN EN ISO 18134-2 [32]) und für die Messung der Partikelgrößenverteilung mittels Sieb- und Bildanalyse ( $n = 3$ , DIN EN ISO 17827-1 [29]) genommen. Zusätzlich wurde die Schüttdichte bestimmt ( $n = 5$ , DIN EN ISO 17828 [30]).

Neben der Siebanalyse nach DIN EN ISO 17827-1 [29] wurde dieselbe Probe mit einem fotooptischen Bildanalyseverfahren untersucht. Das Verfahren misst über ein Bildanalysegerät (CP4, Haver & Boecker OHG, Oelde) die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform einer Brennstoffprobe. Die aus einem Probenbehälter herausrutschenden Hackschnitzel werden mittels einer Vibrorinne (langsamer Transport) und eines anschließenden Förderbands (schneller Transport) voneinander losgelöst. Nach dem Förderband fliegen die Einzelpartikel an einer linearen Lichtquelle vorbei, die gegenüber einer digitalen CCD-Kamera angebracht ist. Die Kamera misst kontinuierlich 4096 Pixel über eine Breite von 382 mm. Die Auflösung pro Pixel beträgt  $98 \times 98 \mu\text{m}$ . Die Kamera nimmt dabei ein 2D-Schattenbild von jedem Partikel auf. Neben verschiedenen Längen- und Breitenparametern wird daraus 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 [58] [80].

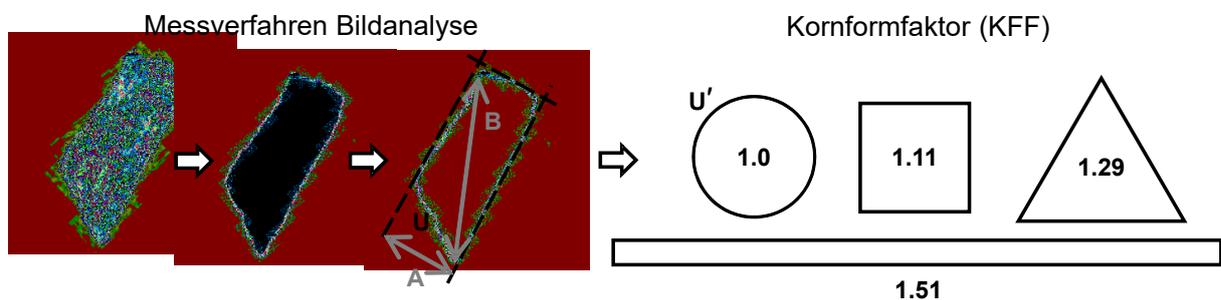


Abbildung 101: Messverfahren der Bildanalyse und Beispiele für den Kornformfaktor;  $A$  = Minimaler Feret,  $B$  = Maximale Partikellänge,  $U$  = Partikelumfang,  $U'$  = Umfang eines flächengleichen Kreises [80]

### 12.2.2 Messung der Brückenbildungsneigung

Die Bestimmung der Brückenbildungsneigung erfolgte in einer am TFZ weiterentwickelten kastenförmigen Prüfapparatur („Bridging tester“), in der eine Schüttgutbrücke bestehend aus  $1,65 \text{ m}^3$  Probenmaterial durch ein reibungsloses Aufschieben einer Bodenöffnung zum Einsturz gebracht wird (Abbildung 102). Nach Brückeneinsturz wird die Öffnungsweite des Behälterbodens bestimmt. Je höher die Öffnungsweite des Bodens, desto geringer ist die Fließfähigkeit bzw. desto größer ist die Brückenbildungsneigung eines Brennstoffs [52].

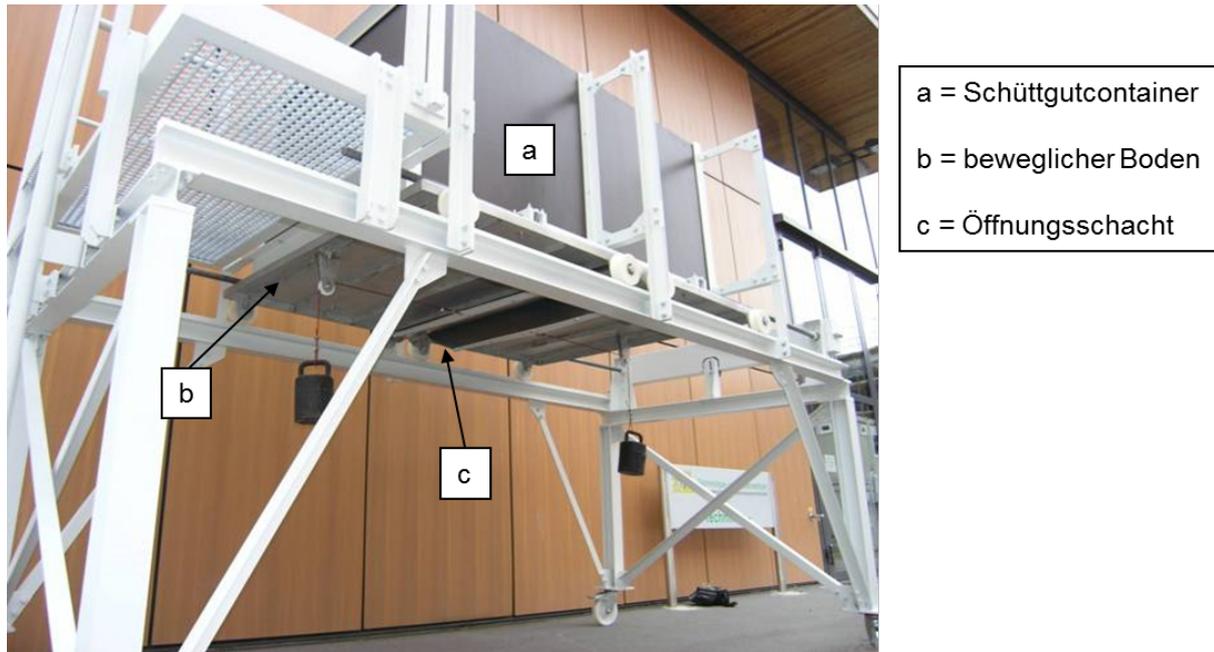


Abbildung 102: Aufbau des TFZ-Brückenbildungstesters ([58], basierend auf [90])

Das Messverfahren wurde bei jedem Sortiment und jeder Variante nach demselben Ablaufschema gemäß ISO DTR 23437 [38] durchgeführt (Abbildung 103). Zunächst wurde in den geschlossenen Prüfapparat eine Holzhackschnitzelprobe mit einem Volumen von 1,65 Srm über einen Kippcontainer gefüllt. Der Abstand des Kippcontainers zur Oberkante des Testgeräts wurde dabei konstant auf einer Höhe gehalten. Der Befüllvorgang erfolgte gleichmäßig und mittig. Nach dem Befüllen wurde die Holzhackschnitzelprobe mit einem Rechen nivelliert und der Kippcontainer unter dem Prüfapparat platziert. Die Messung wurde gestartet und die Bodenplatten mit einer Geschwindigkeit von 180 mm pro Minute gleichmäßig geöffnet. Der Öffnungsvorgang wurde beim „ersten Brückeneinsturz“, bei „> 50 % Einsturz“ und beim kompletten Einsturz der Brücke, d. h. bei „100 % Einsturz“, gestoppt und die jeweilige Öffnungsweite notiert. Alle in der Prüfapparatur verbliebenen Holzhackschnitzel wurden danach manuell in den Kippcontainer gekehrt. Die Bodenplatten wurden wieder geschlossen und die Messung konnte von Neuem beginnen. Pro Variante und Sortiment wurden zehn Messungen ( $n = 10$ ) durchgeführt.

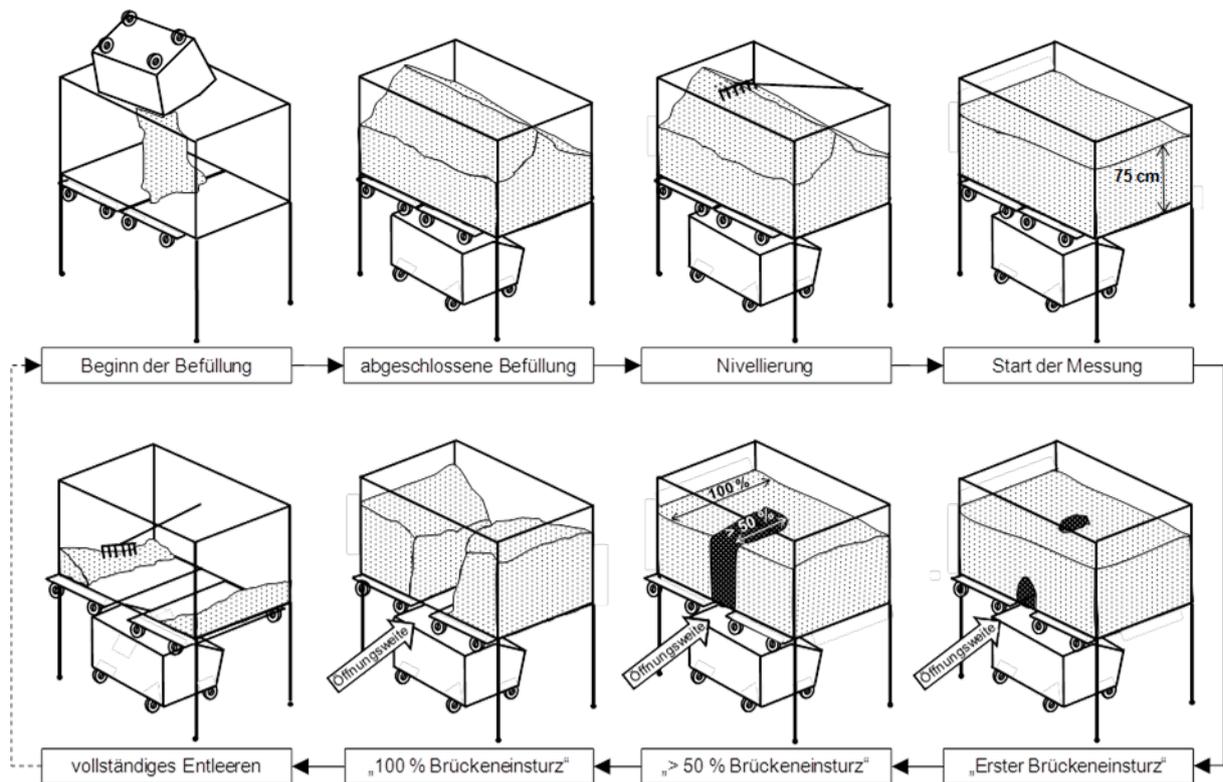


Abbildung 103: Messverfahren zur Bestimmung der Brückenbildung [58]

Nach den Messungen der Brückenbildungsneigung mussten die groben Brennstoffe aus den Versuchen zu Kapitel 7 zerkleinert werden, da die Partikelgrößenverteilung nicht für die Verbrennung in Kleinf Feuerungsanlagen geeignet war. Hierzu kam ein stationärer Trommelhacker (VTH 45/12/2, Vecoplan, Bad Marienberg) am TFZ zum Einsatz. Der Hacker wurde mit einem 40 × 40 mm Siebkorb und scharfen Messern ausgestattet.

### 12.2.3 Messung der Verbrennungseigenschaften

Im Anschluss an die Versuche zur Brückenbildungsneigung wurde jede Holzhackschnitzelprobe auf dem Feuerungsprüfstand des TFZ in einem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel (Guntamatic Powerchip 20/30) verbrannt. Der Aufbau des Versuchsstands ist in Abbildung 104 wiedergegeben.

Bei jedem Brennstoff wurde am jeweiligen Versuchstag erneut der Wassergehalt nach DIN EN ISO 18134-2 bestimmt ( $n = 3$ ) [32]. Bei den nachträglich weiter zerkleinerten Brennstoffen aus Kapitel 7 erfolgte eine zusätzliche Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17827-1 [29].

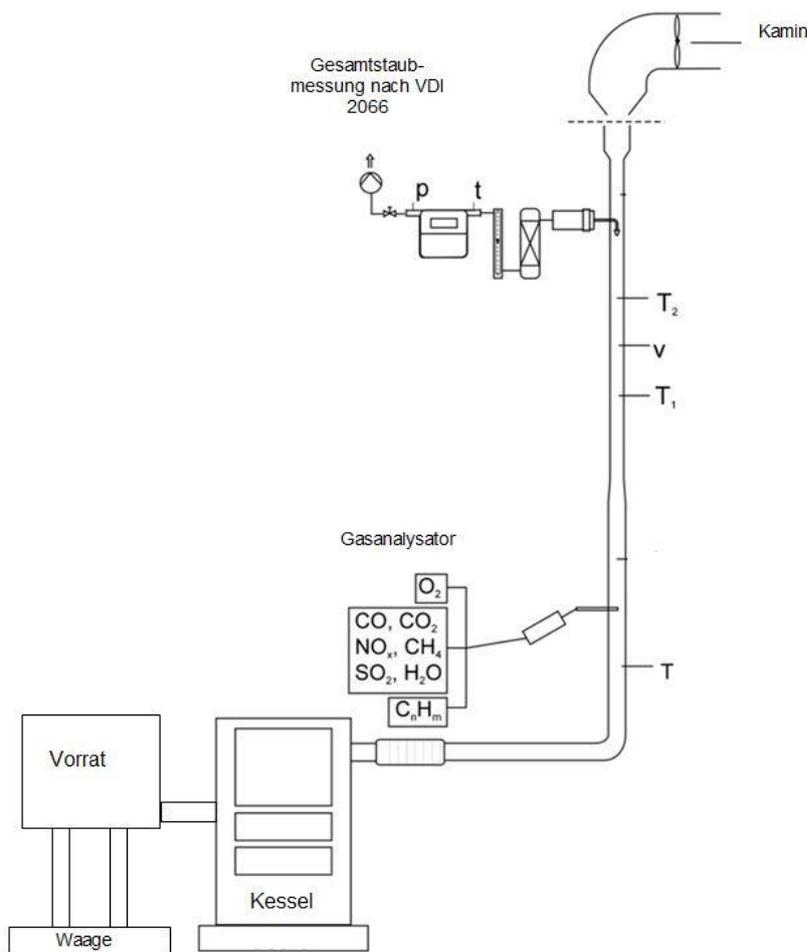


Abbildung 104: Testaufbau am Feuerungsprüfstand des TFZ ( $T$  = Temperaturmessung,  $v$  = Gasgeschwindigkeitsmessung)

Um den Brennstoffverbrauch während der Feuerungsversuche zu bestimmen, wurde der Vorratsbehälter auf einer Plattformwaage (MT KD600, Mettler-Toledo GmbH) mit einer Genauigkeit von 0,005 kg platziert. Der Wärmeverbrauch wurde gemäß DIN EN 303-5 [26] dauerhaft auf eine Nennlast von 30 kW ( $\pm 8\%$ ) geregelt.

Die gasförmigen Komponenten  $CO$ ,  $CO_2$  und  $O_2$  wurden mit Einkomponentenanalysatoren (ABB AO2020, ABB Automation GmbH),  $NO_x$  mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLD 822 Mhr Analysator, Eco Physics GmbH) und der Wasserdampfgehalt,  $SO_x$ ,  $HCl$  und  $CH_4$  mit einem FTIR (DX4000N, Ansyco GmbH) bestimmt. Das Aufzeichnungsintervall für die kontinuierliche Messung wurde auf zehn Sekunden eingestellt (Abbildung 104).

Die gesamte Partikelmasse (TPM, „total particle matter“), d. h. der Gesamtstaub, wurde nach VDI 2066-1 [111] gemessen, wobei eine beheizte Filtersonde und eine Filtertemperatur vor und nach der Behandlung von 180 bzw. 160 °C angewendet wurden. Der Kessel wurde mit einem konstanten Abgaszug von  $-15 \pm 2$  Pa betrieben, wie vom Kesselhersteller vorgeschlagen. Der Durchmesser des Abgaskanals und des Verbindungsrohrs

betrug 150 mm. Die Abgasgeschwindigkeit wurde kontinuierlich mit einem in einer Engstelle der Messstrecke positionierten Flügelrad-Anemometer (ZS25/25-ZG4, Höntzsch GmbH) mit einem effektiven Durchmesser von 100 mm gemessen (Abbildung 104).

Vor jedem Versuch wurden die Brennkammer, der Wärmeübertrager und das Brennstoffzufuhrsystem vollständig mit einem Staubsauger, einer Bürste und Druckluft gereinigt. Der Vorratsbehälter wurde mit einer ausreichenden Menge des zu prüfenden Brennstoffs gefüllt. Anschließend wurde der Kessel gestartet und bei Nennlast (30 kW) innerhalb von etwa zwei Stunden auf einen stationären Betriebszustand aufgeheizt. Während des Nennlastbetriebs wurden fünf Partikelprobenahmen jeweils über 30 min und eine kontinuierliche Aufzeichnung der gasförmigen Emissionen durchgeführt. Die gasförmigen Emissionen wurden als Mittelwerte zeitgleich für alle Perioden der Partikelprobenahmen (30 min,  $n = 5$ ) ausgewertet. Alle gemessenen Emissionen beziehen sich auf trockenes Abgas bei 0 °C und 1013 hPa und basieren auf 13 % O<sub>2</sub>.

## 12.3 Ergebnisse und Diskussion

### 12.3.1 Brennstoffqualität

Die physikalische Brennstoffqualität der Holzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Verbrennungsversuche ist in Tabelle 50, Tabelle 51 und Tabelle 52 wiedergegeben.

*Tabelle 50: Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert und Schüttdichte der Brennstoffe (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = fünf Monate im Bigbag gelagert, M = in Miete gelagert (fünf Monate), S = in Silo gelagert (fünf Monate), wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand)*

Sortiment/ Variante	Wassergehalt „Bridging“ in m-%	Schüttdichte „Bridging“ in kg m <sup>-3</sup> , ar	Wassergehalt „Verbrennung“ in m-%	Aschegehalt in m-%, wf	Heizwert in MJ kg <sup>-1</sup> , wf
Wrh (T) <sup>a</sup>	14,7	207	15,2	1,0	18,6
Wrh (T, g) <sup>a</sup>	14,5	234	14,0	1,0	18,6
Wrh (M) <sup>a</sup>	13,8	218	14,4	1,0	18,9
Er (T) <sup>a</sup>	14,3	184	15,7	0,9	18,7
Er (T, g) <sup>a</sup>	14,5	186	14,1	0,9	18,7
Er (M) <sup>a</sup>	17,5	181	17,6	0,9	18,9
Wrh (T) <sup>b</sup>	13,1	208	12,1	1,5	19,4
Wrh (T, g) <sup>b</sup>	11,9	213	12,0	1,5	19,9
Wrh (S) <sup>b</sup>	15,0	205	17,0	2,0	19,5
Wrh (M) <sup>b</sup>	17,3	210	22,1	2,5	19,4

<sup>a</sup> = Fein gehackte Brennstoffe aus Kapitel 6, <sup>b</sup> = Grob gehackte Brennstoffe aus Kapitel 7

Der Wassergehalt der Brennstoffe lag nach der Trocknung im Satzrockner bei den Versuchen zur Brückenbildungsneigung zwischen 11,9 und 17,3 m-%. Zum Zeitpunkt der Verbrennung in dem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel lag er zwischen 12,0 und 22,1 m-% (Tabelle 50). Für die beiden Parameter Aschegehalt und Heizwert wurden die Analysewerte aus den Kapiteln 6 und 7 verwendet. Dabei wurde angenommen, dass sich weder der Aschegehalt noch der Heizwert während der fünfmonatigen Lagerung der technisch getrockneten Holzhackschnitzel veränderte (vgl. Kapitel 11).

**Tabelle 51:** *Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe für die Versuche zur Brückenbildungsneigung (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = im Bigbag gelagert (fünf Monate), M = in einer Miete gelagert (fünf Monate), S = in einem Silo gelagert)*

Sortiment/ Variante	0 bis 3,15 mm in m-%	3,15 bis 8 mm in m-%	8 bis 16 mm in m-%	16 bis 31,5 mm in m-%	31,5 bis 45 mm in m-%	45 bis 63 mm in m-%	> 63 mm in m-%	Max. Länge in mm
Wrh (T) <sup>a</sup>	8,9	8,8	9,0	69,7	2,6	0,9	0,0	124
Wrh (T, g) <sup>a</sup>	5,7	9,7	46,1	35,8	2,5	0,1	0,0	150
Wrh (M) <sup>a</sup>	8,5	11,5	8,5	69,8	1,4	0,2	0,0	120
Er (T) <sup>a</sup>	6,8	8,9	6,8	73,9	3,1	0,5	0,0	150
Er (T, g) <sup>a</sup>	2,5	5,0	11,7	76,8	3,8	0,3	0,0	140
Er (M) <sup>a</sup>	3,7	8,7	4,9	80,3	2,0	0,4	0,0	120
Wrh (T) <sup>b</sup>	5,8	6,5	17,4	33,8	19,3	11,5	5,7	151
Wrh (T, g) <sup>b</sup>	8,5	10,4	21,0	34,0	15,3	8,0	2,7	146
Wrh (S) <sup>b</sup>	8,7	9,3	18,2	38,6	16,9	7,0	1,3	148
Wrh (M) <sup>b</sup>	6,6	7,0	13,9	37,8	17,6	9,5	7,7	210

<sup>a</sup> = Fein gehackte Brennstoffe aus Kapitel 6, <sup>b</sup> = Grob gehackte Brennstoffe aus Kapitel 7

Die Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe entsprach den Werten, die bereits für die jeweiligen Materialien bei den Versuchen in den Kapiteln 6 und 7 festgestellt wurden (Tabelle 51). Zwischen den Sortimenten zeigt sich vor allem bei den groben Waldrestholzhackschnitzeln im Vergleich zu den beiden fein gehackten Sortimenten eine Verschiebung der Partikelmassen hin zu den Fraktionen > 31,5 mm (siehe Tabelle 51). Folglich ist beim grob gehackten Sortiment mit einer stärkeren Brückenbildungsneigung als bei den beiden fein gehackten Sortimenten zu rechnen [58].

Die gröbere Partikelstruktur der Waldrestholzhackschnitzel aus Kapitel 7 lässt sich auch anhand der Ergebnisse der Bildanalyse belegen (Tabelle 52). Hier lagen die Werte für die „mittlere Partikellänge“ im Schnitt 20 mm über den Werten der beiden fein gehackten Sortimente. Die Partikelform, beispielsweise der Kornformfaktor (KFF), deutet zudem auf einen Einfluss der Lagerungsart hin. Über alle Holzhackschnitzelsortimente waren die KFF-Werte für Brennstoffe, die in einer Miete gelagert wurden, gegenüber technisch getrockneten Brennstoffen geringer (Tabelle 52). Niedrigere Kornformfaktoren deuten dabei

auf rundere Partikel hin. Vermutlich zersetzten sich vor allem feine Oberflächenstrukturen der Holzhackschnitzel während der Lagerung in den Mieten aufgrund des Holzabbaus durch Mikroorganismen. Hierdurch ergibt sich eine insgesamt rundere Partikelform. Ein niedriger KFF sollte sich dabei positiv auf die Brückenbildungsneigung der Brennstoffe auswirken [58].

*Tabelle 52: Messparameter der Bildanalyse der Brennstoffe für die Versuche zur Brückenbildungsneigung (Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, T = technisch getrocknet, g = im Bigbag gelagert (fünf Monate), M = in einer Miete gelagert (fünf Monate), S = in einem Silo gelagert)*

Sortiment/ Variante	Mittlere Partikellänge der Gesamtprobe in mm	Max. Länge des größten Partikels in mm	Kornformfaktor (KFF)	Länge-zu- Breite- Verhältnis <sup>c</sup> (LzuB)
Wrh (T) <sup>a</sup>	36,2	114	2,05	4,93
Wrh (T, g) <sup>a</sup>	41,4	163	2,03	4,85
Wrh (M) <sup>a</sup>	34,7	110	1,79	4,86
Er (T) <sup>a</sup>	40,4	126	2,04	4,62
Er (T, g) <sup>a</sup>	41,2	118	1,92	4,54
Er (M) <sup>a</sup>	35,9	99	1,72	4,60
Wrh (T) <sup>b</sup>	58,4	153	2,33	5,04
Wrh (T, g) <sup>b</sup>	51,1	159	2,47	5,38
Wrh (S) <sup>b</sup>	51,7	132	2,27	5,50
Wrh (M) <sup>b</sup>	58,4	199	2,12	4,95

<sup>a</sup> = Fein gehackte Brennstoffe aus Kapitel 6, <sup>b</sup> = Grob gehackte Brennstoffe aus Kapitel 7, <sup>c</sup> = berechnet aus minimalem Feret-Durchmesser und der dazu orthogonalen Partikellänge (vgl. Abbildung 101)

Im Anschluss an die Versuche zur Brückenbildungsneigung wurden die groben Waldrestholzhackschnitzel erneut gehackt, um für die Verbrennungsversuche einsetzbar zu sein. Durch das Hacken reduzierten sich vor allem die Partikelfractionen > 31,5 mm auf Werte ≤ 3,5 m-%. Die Brennstoffe waren danach für den Einsatz in dem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel geeignet.

### 12.3.2 Brückenbildungsneigung

Die Öffnungsweite des Brückenbildungsapparats (1. Einsturz, > 50 % Einsturz und 100 % Einsturz, siehe Abbildung 105, Abbildung 106, Abbildung 107) war sowohl von den gemessenen Sortimenten („Energierundholz fein“, „Waldrestholz fein“, „Waldrestholz grob“) als auch von der Lagerungsart („technisch getrocknet“, „technisch getrocknet und gelagert“, „in Mieten gelagert“, „in Silo gelagert“) abhängig.

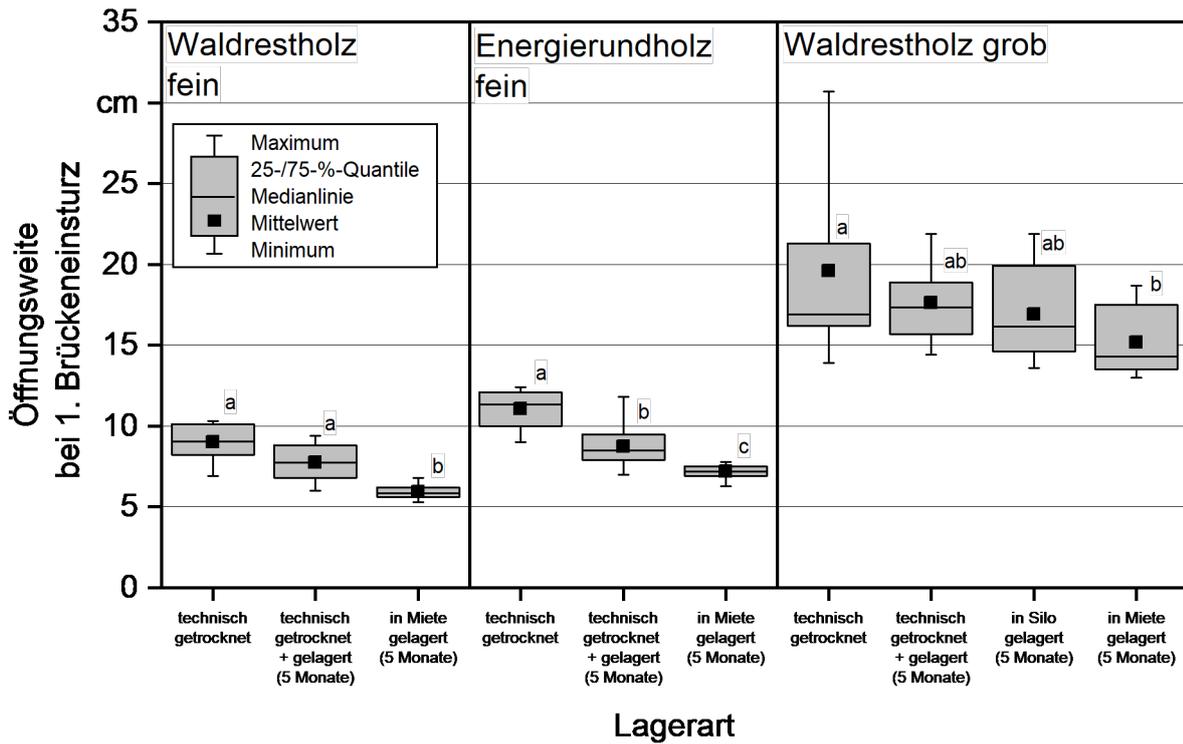


Abbildung 105: Öffnungsweite (1. Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

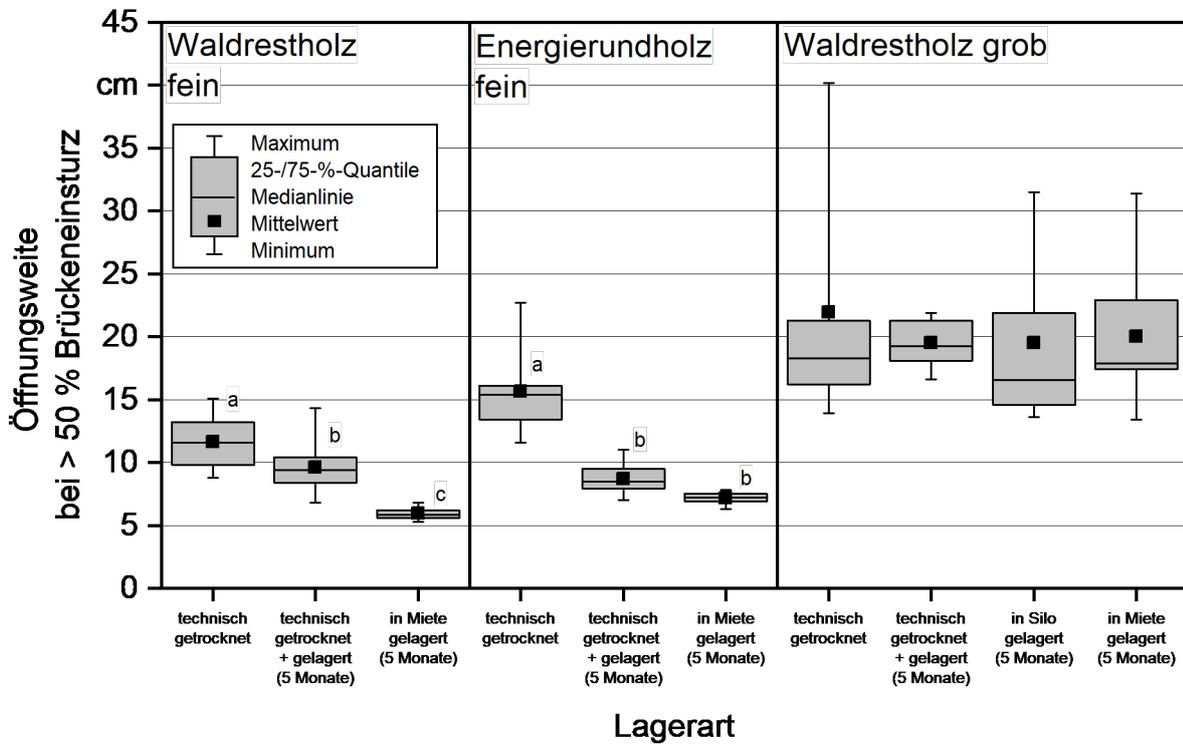


Abbildung 106: Öffnungsweite (> 50 % Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

Die feinen Waldrestholz hackschnitzel führten in den meisten Fällen zu den geringsten Öffnungsweiten des Bridging-Testers, gefolgt von den ebenfalls fein gehackten Brennstoffen aus Energierundholz (Abbildung 105, Abbildung 106, Abbildung 107). Die größten Öffnungsweiten wurden mit den grob gehackten Waldrestholz hackschnitzeln gemessen. In den meisten Fällen waren die Unterschiede der groben Holz hackschnitzel zu den beiden feineren Sortimenten bei gleicher Lagerungsart und bei gleichem Brückenbildungsparameter statistisch signifikant ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

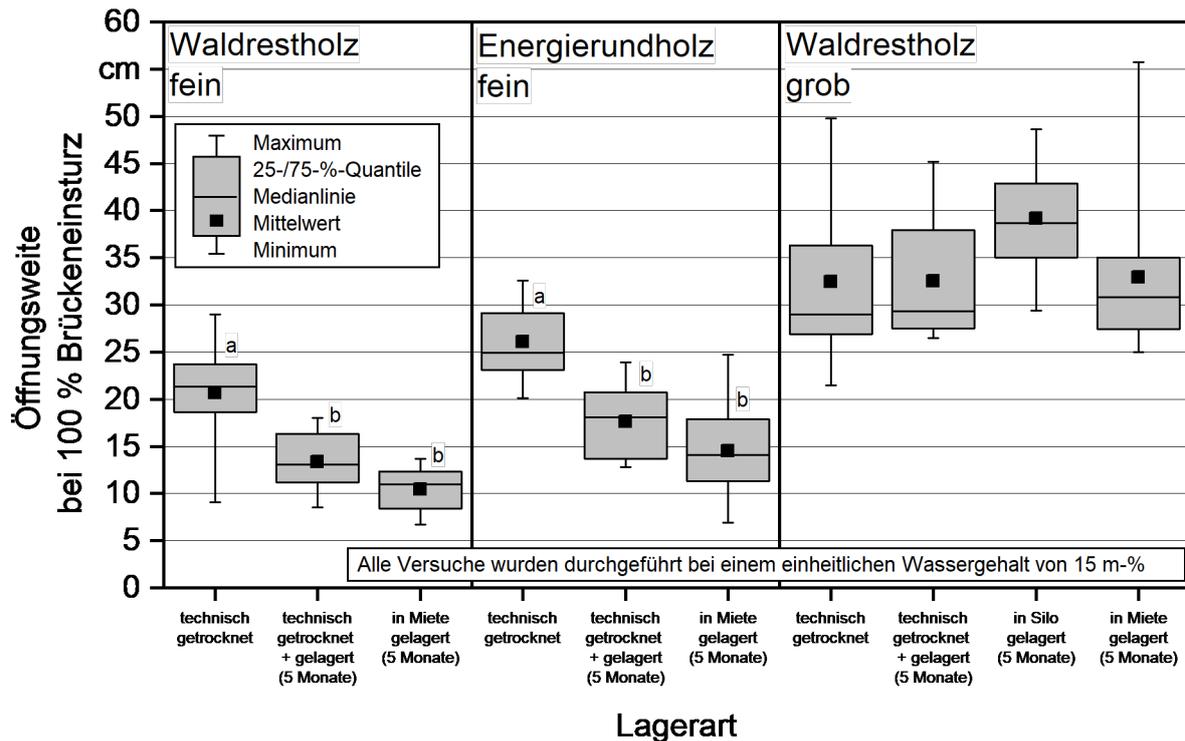


Abbildung 107: Öffnungsweite (100 % Brückeneinsturz) des Bridging-Testers je Brennstoff und Lagerungsart bei vergleichbaren Wassergehalten. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

Die Brückenbildungsneigung innerhalb der jeweiligen Holz hackschnitzelsortimente war direkt von der Lagerungsart abhängig (Abbildung 105, Abbildung 106, Abbildung 107). In allen Fällen war die mittlere Öffnungsweite des 1. Brückeneinsturzes bei der technisch getrockneten Variante deutlich größer als die Öffnungsweite der ebenfalls technisch getrockneten und anschließend für fünf Monate gelagerten Charge, gefolgt von den Holz hackschnitzeln aus einer Lagermiete (Abbildung 105). Die Lagerung in Mieten halbierte in vielen Fällen sogar die Öffnungsweite im Vergleich zu den rein technisch getrockneten Brennstoffen. Dieser Effekt war in den meisten Fällen signifikant ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test). Im Fall der beiden feinen Holz hackschnitzelsortimente trifft diese Aussage auch für die Öffnungsweiten „> 50 % Brückeneinsturz“ und „100 % Brückeneinsturz“ zu, nicht jedoch für die grob gehackten Waldrestholz hackschnitzel. Hier konnte kein signifikanter Effekt zwischen technischer Trocknung und Mietenlagerung für die Öffnungswei-

ten „> 50 % Brückeneinsturz“ oder „100 % Brückeneinsturz“ nachgewiesen werden. Im Fall der im Silo gelagerten, groben Waldrestholzhackschnitzel konnte ebenfalls kein eindeutiger Trend beobachtet werden. Allerdings zeigte diese Charge die höchsten Werte für den Parameter „100 % Brückeneinsturz“ und führte damit im Trend zu stärkerer Brückenbildung als die technisch getrockneten und gelagerten Holzhackschnitzel (Abbildung 105).

Die Brückenbildungsneigung lässt sich i. d. R. direkt auf die physikalischen Qualitätsparameter der Brennstoffe zurückführen. HINTERREITER et al. [58] wiesen nach, dass die Brückenbildungsneigung von dem Kornformfaktor ( $KFF$ ), dem Länge-zu-Breite-Verhältnis ( $LzuB$ ), der mittleren Partikellänge ( $MP$ ) und dem Wassergehalt ( $w$ ) beeinflusst wird. Die Autoren hatten mithilfe multipler linearer Regressionen Modelle entwickelt, anhand derer sich die Öffnungsweite des Brückenbildungsapparates mithilfe der physikalischen Brennstoffparameter berechnen lässt. Für Holzhackschnitzel gilt dabei:

$$OW_{100\%} = -4,5251 + 7,0553 \times KFF + 0,7031 \times MP - 0,2832 \times w \\ - 6,4037 \times LzuB + 0,2427 \times w \times LzuB - 0,0058 \times w \times MP \quad (12.1)$$

Eine vereinfachte Version des Holzhackschnitzelmodells berücksichtigt keine gekoppelten Effekte zwischen den Brennstoffparametern:

$$OW_{100\%} = -31,648 + 5,292 \times KFF + 3,0005 \times LzuB - 0,5005 \times MP + 0,527 \times w \quad (12.2)$$

In einem dritten Modell haben HINTERREITER et al. [58] die Öffnungsweite für eine breitere Auswahl an Brennstoffen, inklusive Schredderholz, Sägespänen und Häckselgut modelliert. Hier kommt die Schüttdichte bei einem Wassergehalt von 15 m-% ( $BD_{15}$ ) hinzu.

$$OW_{100\%} = -30,762 + 0,0728 \times BD_{15} - 8,1106 \times LzuB + 59,064 \times KFF \\ - 0,5819 \times MP + 0,0049 \times w^2 + 0,0016 \times BD_{15} \times MP \\ - 0,0948 \times BD_{15} \times KFF - 0,3058 \times MP \times KFF \\ + 0,2124 \times MP \times LzuB \quad (12.3)$$

Abbildung 108 stellt die anhand der drei Formeln modellierten Öffnungsweiten den tatsächlich gemessenen Werten der durchgeführten Versuche gegenüber. Alle drei Modelle

zeigen Bestimmtheitsmaße mit  $R^2 \geq 0,71$ . Das „Holzhackschnitzelmodell“ (Formel (12.1)) unterschätzte die tatsächlich gemessene Öffnungsweite um durchschnittlich 4 mm, das „allgemeine Modell“ (Formel (12.3)), das auch Nicht-Holzbrennstoffe und Presslinge berücksichtigt und daher relativ unspezifisch ist, überschätzte die Werte um durchschnittlich 11 mm. Die beste Übereinstimmung lieferte das „vereinfachte Holzhackschnitzelmodell“ (Formel (12.2)) mit einer durchschnittlichen Abweichung von 0,4 mm (–8,5 bis +8,6 mm).

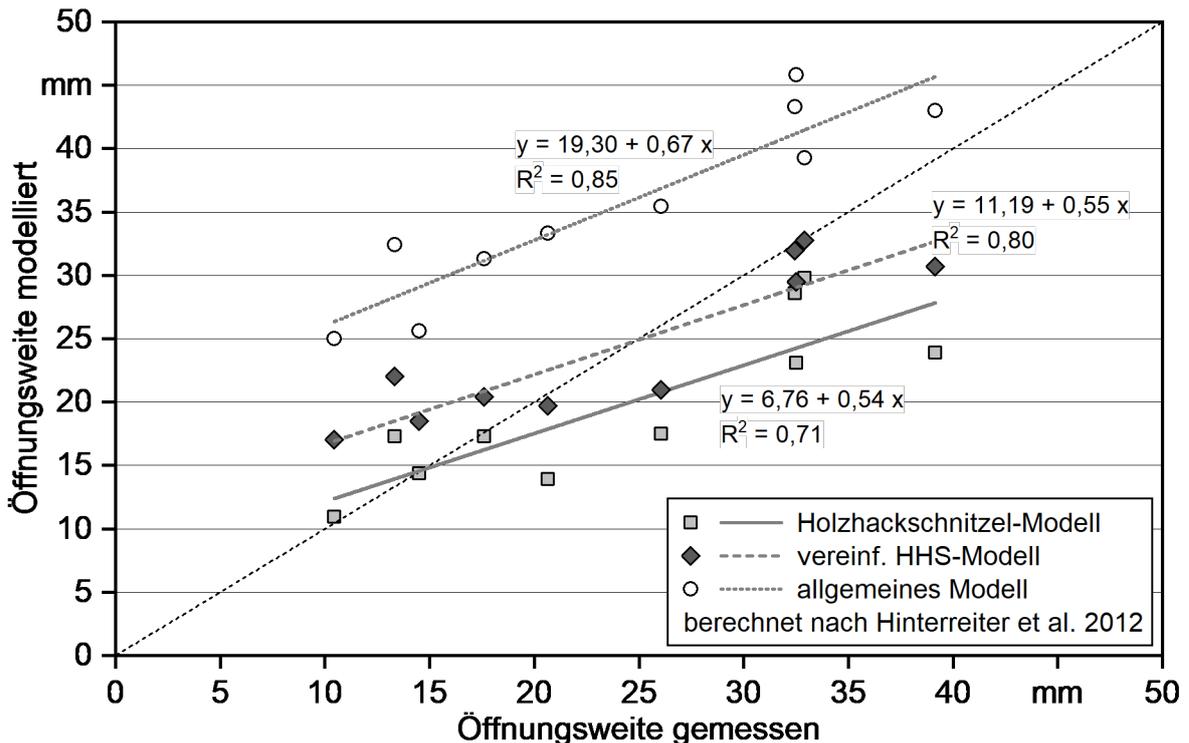


Abbildung 108: Vergleich modellierter und gemessener Werte für die Öffnungsweite des Bridging-Testers (100 % Einsturz) der untersuchten Brennstoffe (Modellberechnungen nach [58])

Ausgehend von den Überlegungen von HINTERREITER et al. [58] wurden mithilfe der gemessenen Brennstoffdaten und Öffnungsweiten eigene multiple lineare Regressionen anhand der für die beiden Holzhackschnitzelmodelle von den Autoren getroffenen Vorauswahl an unabhängigen Variablen gerechnet (Tabelle 53). Eine Neuberechnung mit den Parametern des „allgemeinen Modells“ war dagegen nicht möglich, da die Anzahl der unabhängigen Variablen die Anzahl der Messwerte überschritt.

Auch bei den Neuberechnungen der Modelle zeigt sich die Parameterauswahl des vereinfachten Holzhackschnitzelmodells als besser geeignet, die Öffnungsweite bei 100 % Einsturz darzustellen, als das reguläre Holzhackschnitzelmodell. In beiden Berechnungen („HHS“, „HHS vereinfacht“) konnte jedoch für keine der unabhängigen Variablen ein direkter signifikanter Einfluss auf das jeweilige Modell festgestellt werden. Dies lag vermutlich an der insgesamt geringen Anzahl an Messungen ( $n = 10$ ).

**Tabelle 53:** Modellgüte multipler linearer Regressionen des Parameters „Öffnungsweite 100 %“ des Bridging-Testers in Abhängigkeit der Variablen der Holzhackschnitzel-Modelle (HHS) nach HINTERREITER et al. [58] und nach eigener Auswahl

Modell	Korr. R <sup>2</sup>	F-Wert	Signifikanz
HHS	0,66	3,86	0,148
HHS vereinfacht	0,77	8,44	0,019
Eigene Auswahl*	0,94	31,47	0,003

\* Unabhängige Variablen: Wassergehalt ( $w$ ), Schüttdichte ( $BD_{15}$ ), Kornformfaktor ( $KFF$ ), mittlere Partikellänge ( $MP$ ) und Länge-zu-Breite-Verhältnis ( $LzuB$ )

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde eine multiple lineare Regression mit einer eigenen Parameterauswahl berechnet (Tabelle 53). Die unabhängigen Variablen waren  $KFF$ ,  $MP$ ,  $w$ ,  $LzuB$  und  $BD_{15}$ . Die Modellgüte war mit einem korrigierten  $R^2$  von 0,94 deutlich höher als bei den Holzhackschnitzelmodellen. Allerdings hatte nicht jede der ausgewählten, unabhängigen Variablen einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Modell (Tabelle 54), vermutlich aufgrund der sehr geringen Stichprobengröße von  $n = 10$ . Eine Entfernung nicht signifikanter Parameter aus dem Modell führte jedoch zu einer Abnahme des Bestimmtheitsmaßes und damit zu einer Verschlechterung der Güte des Gesamtmodells.

**Tabelle 54:** Modellberechnung und Signifikanz einer multiplen linearen Regression des Parameters „Öffnungsweite bei 100 % Einsturz“ des Bridging-Testers mit den unabhängigen Variablen  $KFF$ ,  $MP$ ,  $w$ ,  $LzuB$  und  $BD_{15}$

Parameter	Wert	Standardfehler	t-Wert	Signifikanz
Schnittpunkt y-Achse	-65,98	25,11	-2,63	0,058
$KFF$	18,19	11,22	1,62	0,180
$MP$	0,39	0,19	2,03	0,113
$w$	0,62	0,89	0,70	0,523
$LzuB$	14,26	4,80	2,97	0,041
$BD_{15}$	-0,22	0,05	-4,10	0,014

Eine Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte des multiplen linearen Regressionsmodells mit der eigenen Auswahl unabhängiger Variablen ist in Abbildung 109 wiedergegeben. Es zeigt sich eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung des Modells mit den realen Werten ( $R^2 = 0,97$ ).

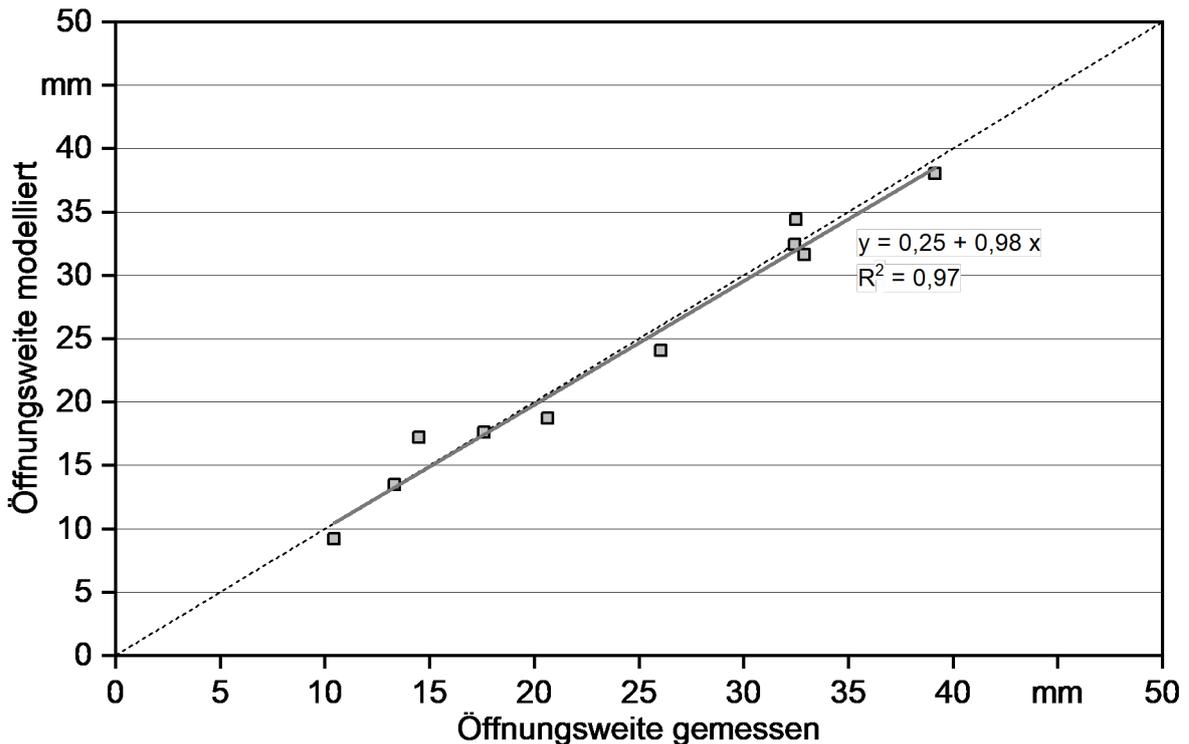


Abbildung 109: Vergleich modellierter und gemessener Werte für die Öffnungsweite des Bridging-Testers (100 % Einsturz) der untersuchten Brennstoffe (eigene Modellberechnungen nach Tabelle 54)

Anhand der bisherigen Ergebnisse zeigt sich, dass die physikalischen Parameter Kornformfaktor ( $KFF$ ), mittlere Partikellänge ( $MP$ ), Länge-zu-Breite-Verhältnis ( $LzuB$ ), Schüttdichte ( $BD_{15}$ ) und Wassergehalt einen Einfluss auf die Öffnungsweiten zu haben scheinen (Tabelle 54 [58]), auch wenn diese Effekte aufgrund der geringen Anzahl an Durchführungen in den berechneten Modellen nicht immer statistisch signifikant waren. Die Betrachtung des Einflusses einzelner Parameter auf die Öffnungsweite des Bridging-Testers unabhängig von der restlichen Modellierung ist im Folgenden dargestellt.

Einen deutlichen Einfluss auf die Öffnungsweite hatte der Kornformfaktor ( $KFF$ ) (Abbildung 110). Vor allem die Werte des „1. Brückeneinsturzes“ waren nahezu linear abhängig von diesem Parameter. Je niedriger der  $KFF$ , desto runder ist die Partikelform. Folglich erhöht sich die Fließeigenschaft der Brennstoffe, da die Partikel weniger stark ineinander verkanten. Die groben Waldrestholz hackschnitzel zeigten sowohl die höchsten Werte für den  $KFF$  (Tabelle 52) als auch die höchsten Öffnungsweiten (Abbildung 107). Die Ergebnisse unterstützen somit die Annahmen von HINTERREITER et al. [58].

Je nach Lagerungsart verringerte sich der  $KFF$  innerhalb der Chargen. Vor allem die Lagerung in Mieten führte zu niedrigeren Werten (Tabelle 52), vermutlich durch die intensivere mikrobielle Zersetzung der rauen Oberflächenstruktur der Partikel. Für die technisch getrockneten Brennstoffe kann eine solche Zersetzung dagegen weitgehend ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 11), weshalb sich hier auch die Partikeloberfläche nicht verändern sollte. In der Folge nahm die Öffnungsweite bei den fein gehackten Brennstoff-

fen durch Mietenlagerung signifikant ab. Bei den grob gehackten Holzhackschnitzeln konnte dieser Trend dagegen nur bei der Öffnungsweite zum „1. Einsturz“, nicht jedoch generell beobachtet werden.

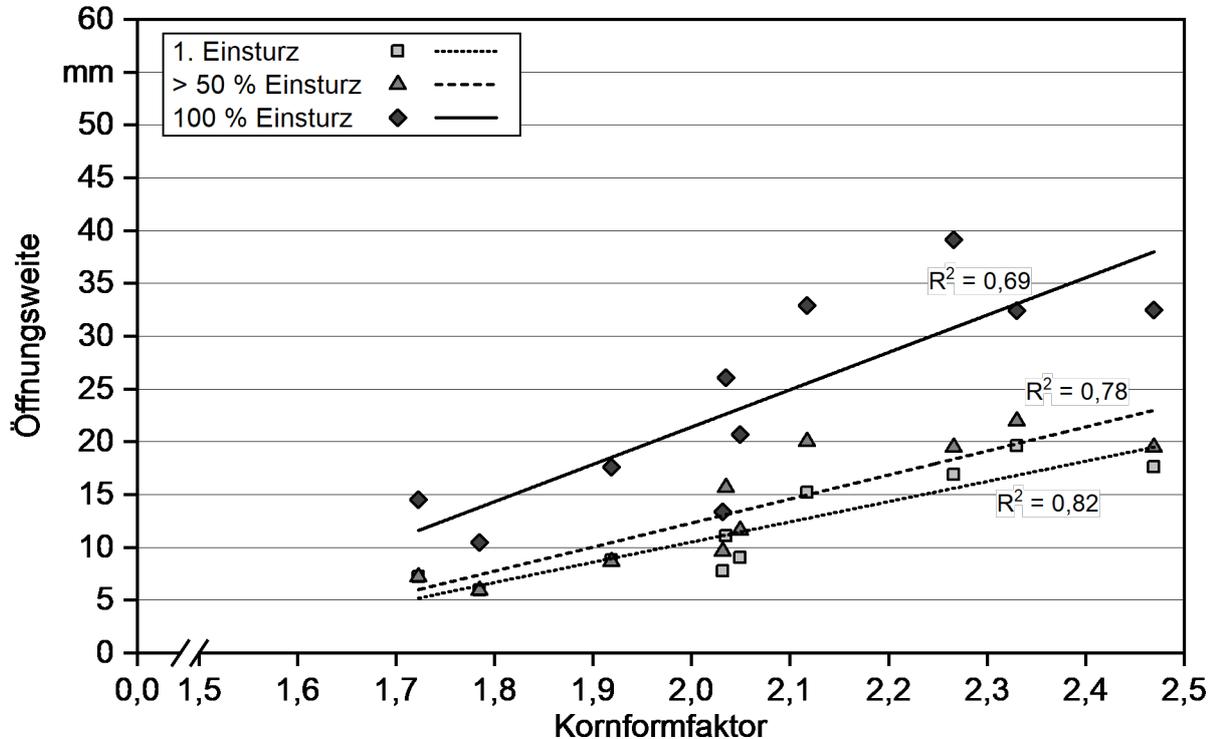


Abbildung 110: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit des Kornformfaktors

Ein weiterer die Öffnungsweite beeinflussender Parameter war die mittlere Partikellänge (MP, Abbildung 111). Mit zunehmender Größe der Partikel kommt es analog dem *KFF* zu einer stärkeren Brückenbildung durch Verkanten der Brennstoffe [58]. Als Folge zeigten die grob gehackten Waldrestholz hackschnitzel generell höhere Öffnungsweiten als die feinen Brennstoffe. Die mittlere Partikelgröße könnte vor allem bei diesem Sortiment einen größeren Effekt auf die Brückenbildungsneigung als der *KFF* haben, weshalb bei den groben Holz hackschnitzeln auch kein eindeutiger Trend zwischen den Lagerungsarten beobachtet werden konnte.

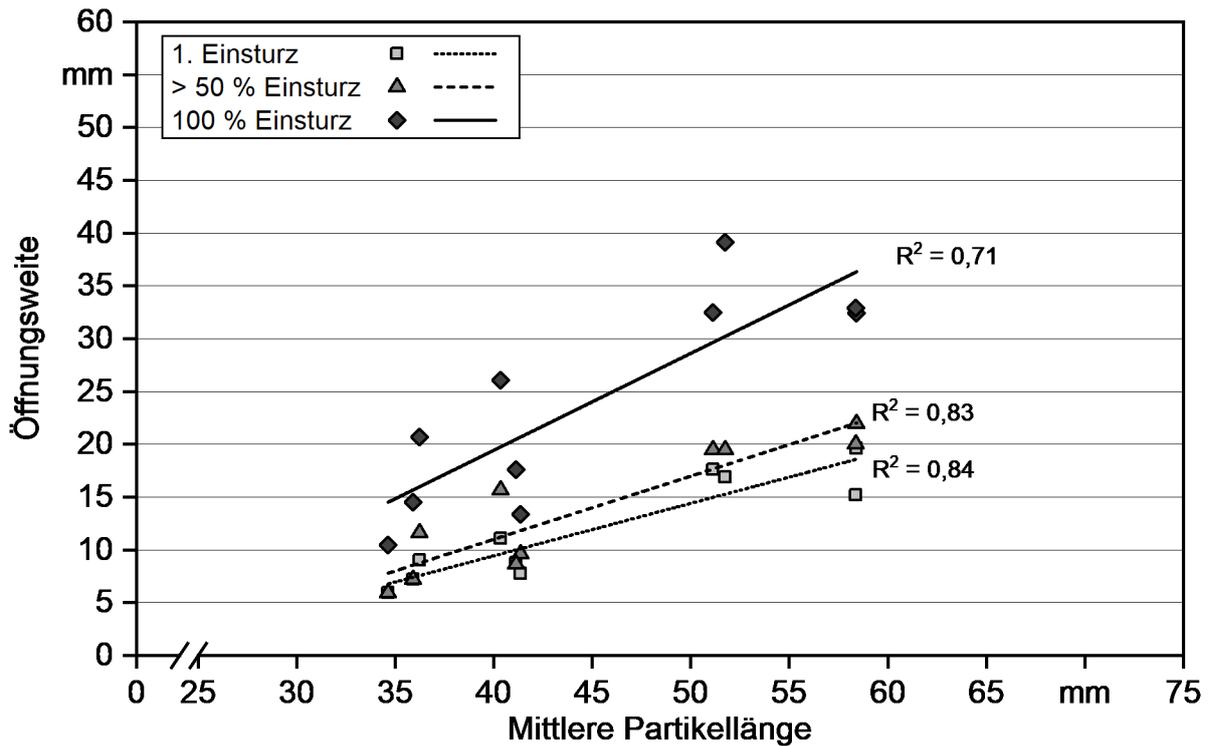


Abbildung 111: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit der mittleren Partikellänge

Das Länge-zu-Breite-Verhältnis (*LzuB*) hatte ebenfalls einen Einfluss auf die Öffnungsweite des Brückenbildungsapparats (Abbildung 112). Dieser war allerdings nicht so deutlich ausgeprägt wie beim *KFF* oder bei der mittleren Partikellänge. Bei steigender *LzuB* nahm die Öffnungsweite zu. Dies lässt sich erneut auf ein stärkeres Verkanten der Partikel zurückführen [58]. Die Lagerungsart zeigte dagegen keine deutlichen Effekte. Vor allem der Parameter *LzuB* hängt stark von der Repräsentativität der Probenahme ab, da hier die Messwerte von Einzelpartikeln besonders stark ins Gewicht fallen. In der Konsequenz streuen die Werte von *LzuB* stärker um den linearen Trend als beispielsweise *KFF* oder *MP* (Abbildung 112).

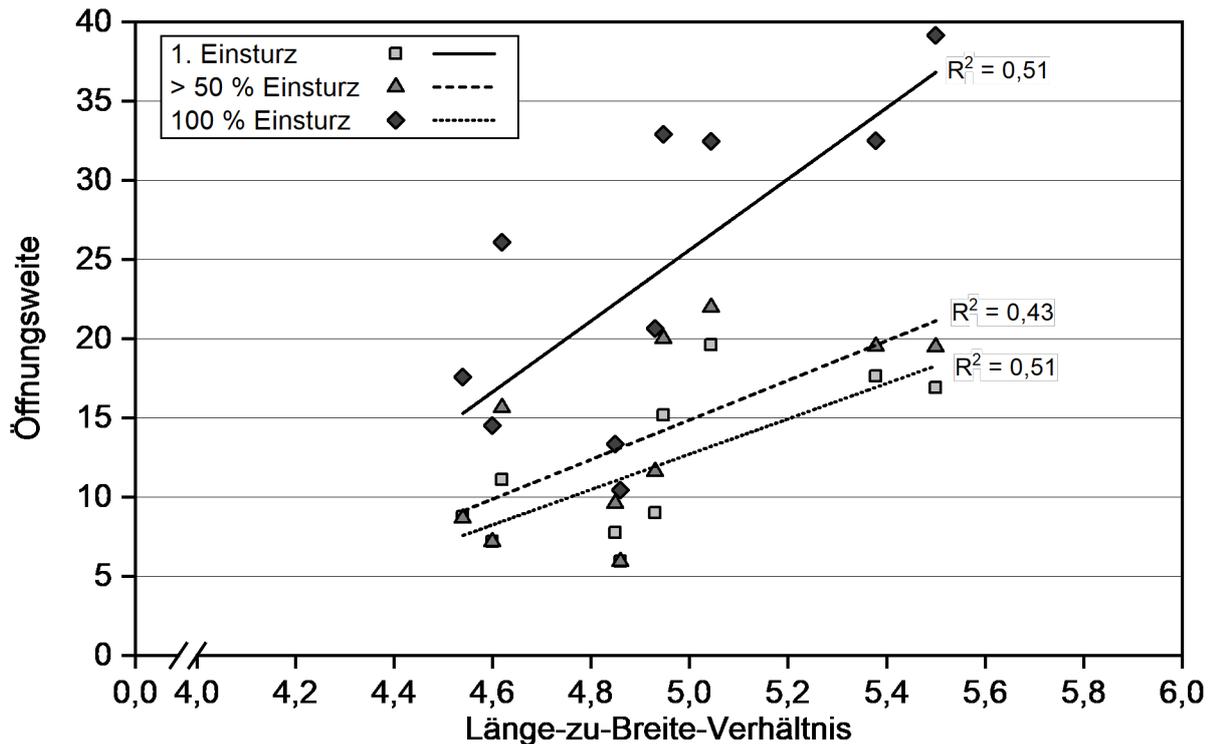


Abbildung 112: Öffnungsweite des Bridging-Testers beim Einsturz der Brücke (1. Einsturz, > 50 % und 100 %) in Abhängigkeit des Länge-zu-Breite-Verhältnisses

Betrachtet man die Einflüsse des Wassergehalts ( $w$ ) und der Schüttdichte ( $BD_{15}$ ) auf die Öffnungsweite getrennt von der restlichen Modellierung, zeigten sich beide Parameter kaum relevant für die Brückenbildungsneigung. Da bei steigendem Wassergehalt die Brückenbildungsneigung der Holzhackschnitzel laut Literatur zunimmt [58], wurden wie in Abschnitt 12.2.1 beschrieben alle Holzhackschnitzelproben vor den Versuchen auf einen nahezu einheitlichen Wassergehalt von 15 m-% getrocknet. Somit kann ein wesentlicher Einfluss des Wassergehalts auf die hier dargestellten Ergebnisse ausgeschlossen werden. Auch die Schwankungsbreite der Schüttdichte war sehr gering (Tabelle 50), da alle Proben aus ähnlichen Rohmaterialien (Nadelholz) hergestellt wurden [80].

Nach der von HINTERREITER et al. [58] durchgeführten Sensitivitätsanalyse ihrer Modelle steigt die Öffnungsweite des Bridging-Testers mit zunehmenden Werten der Brennstoffe für  $MP$ ,  $KFF$  und  $LzuB$ . Den stärksten Effekt hat laut den Autoren dabei  $MP$ , gefolgt von den anderen beiden Parametern. Die hier dargestellten Versuche deuten in eine ähnliche Richtung, denn auch hier war die mittlere Partikelgröße des eingelagerten Holzhackschnitzelsortiments für die Brückenbildungsneigung relevant (Abbildung 111). Ebenso hatten der Kornformfaktor und damit die Lagerungsart einen Einfluss (Abbildung 110, Tabelle 52). Vor allem durch die Lagerung in Mieten kam es auch zu einer leichten Verbesserung des Fließverhaltens der Brennstoffe.

Einen Sonderfall stellt die Lagerung in abgedichteten Silos dar. Hier zeigte sich keine eindeutige Verbesserung im Fließverhalten. Vielmehr konnte in vorangegangenen Kapiteln bereits dargestellt werden, dass es durch Myzelienwachstum häufig zu der Bildung größerer Verklumpungen kommt (vgl. Unterkapitel 7.4). Dies hat einen direkten Einfluss auf die mittlere Partikelgröße, wodurch es zu einer Verschlechterung des Fließverhaltens kommen kann. Theoretisch kann es somit auch bei der Lagerung sehr frischer Brennstoffe (z. B. KUP-Hackschnitzel) in größeren Holzhackschnitzelmieten zu ähnlichen Effekten kommen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die vornehmlich durch das Sortiment und durch den Prozessschritt „Hacken“ bestimmte mittlere Partikelgröße und der durch die Lagerungsart veränderte Kornformfaktor einen bedeutenden Einfluss auf die Fließeigenschaften haben können. Vor allem bei fein gehackten Brennstoffen kann sich die Brückenbildungsneigung durch die Lagerung in Mieten verbessern. Bei grob gehackten Brennstoffen war dieser Effekt dagegen nicht messbar.

### 12.3.3 Verbrennungseigenschaften

Im Anschluss an die Messung der Brückenbildungsneigung wurden alle Brennstoffchargen in Verbrennungsversuchen an einer 30-kW-Holzhackschnitzelfeuerung (Guntamatic Powerchip 20/30) eingesetzt. Die dabei gemessenen gas- und partikelförmigen Emissionen sind in Abbildung 113, Abbildung 116, Abbildung 118 und Abbildung 120 dargestellt.

Die gemessenen CO-Emissionen lagen in allen Fällen deutlich unterhalb des Stufe-2-Grenzwerts der 1. BImSchV von  $400 \text{ mg Nm}^{-3}$  (Abbildung 113). Über alle Sortimente hinweg waren die Emissionen der in Mieten gelagerten Brennstoffe signifikant höher als die der technisch getrockneten und anschließend im Bigbag gelagerten Varianten. Im Fall der Waldrestholzhackschnitzel kam es dabei sogar zu einer Verdoppelung der Werte. Insgesamt sind die gemessenen CO-Emissionen jedoch als unkritisch hinsichtlich der nationalen Gesetzgebung zur Luftreinhaltung zu bewerten.

Hohe CO-Emissionen deuten immer auf eine unvollständige Verbrennung hin. Möglicherweise kam es durch die Mietenlagerung zu einer Veränderung der Holzstruktur durch mikrobielle Zersetzung, die für die Lagerung technisch getrockneter Brennstoffe nahezu ausgeschlossen werden kann (vgl. Kapitel 11). Dies könnte einen Effekt auf die Energiedichte der Brennstoffe und damit auf das Brennstoffvolumen haben, das bei gleicher Leistung in den Kessel gefördert werden muss. Somit könnte es zu einer Überladung des Kessels und damit zu lokalem Luftmangel im Brennraum kommen, was wiederum zu einer unvollständigen Verbrennung der Gase führen kann. Ähnliche Effekte wurden in vorangegangenen Projekten für die Verbrennung von Holzhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb beschrieben [77]. Die in den Kapiteln 6 und 7 gemessenen absoluten Trockenmasseverluste von bis zu 8,4 m-% je Miete zeigen deutlich, dass eine Zersetzung der Brennstoffe stattgefunden hat. Allerdings konnten keine Effekte auf die Schüttdichte oder auf den Heizwert durch die Lagerung nachgewiesen werden.

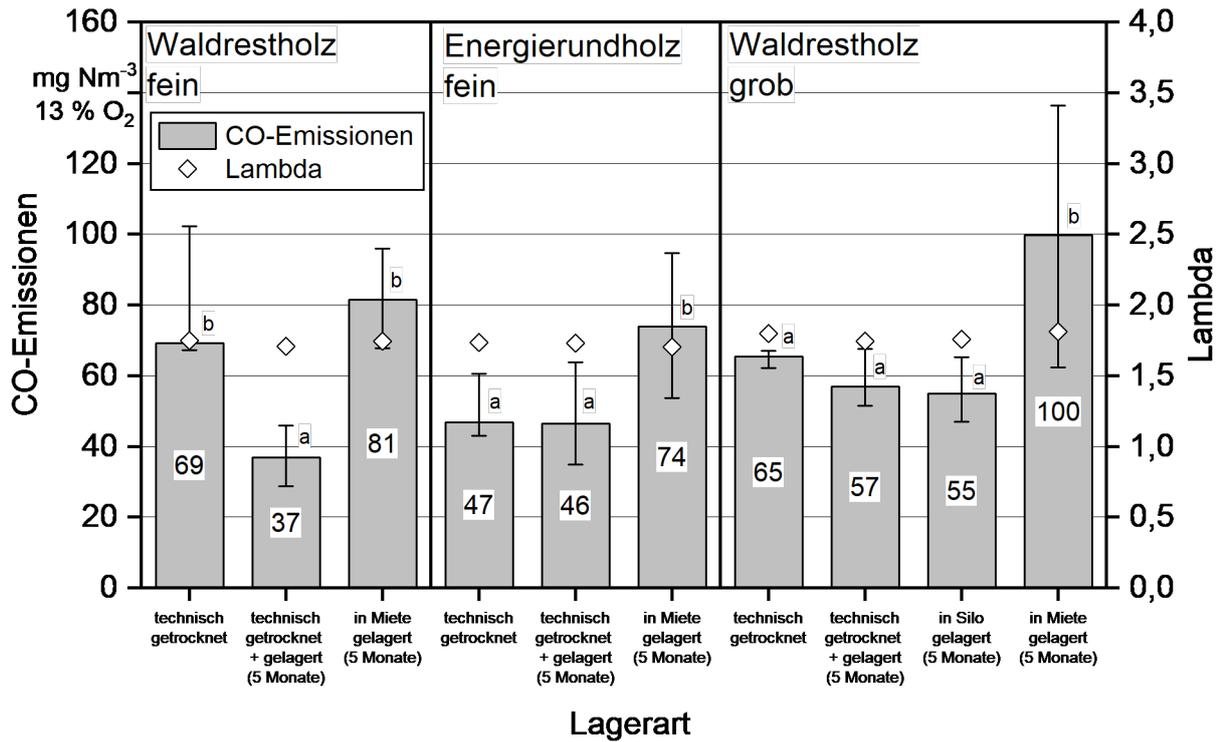


Abbildung 113: Mittlere CO-Emissionen und Luftüberschusszahl Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert  $\pm$  Min/Max ( $n = 5$ ). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

Ein weiterer Grund für eine unvollständige Verbrennung könnte ein für den Kessel zu hoher Wassergehalt sein, wodurch es zu einer Abkühlung der Brennraumtemperatur kommen kann [68] [102]. Messungen der Brennraumtemperatur wurden nicht für alle Versuche durchgeführt. Eine Betrachtung der Abgastemperaturen zeigt allerdings nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 114). Es wird daher davon ausgegangen, dass der Wassergehalt bei der Verbrennung nur einen geringen Effekt auf die CO-Emissionen hatte. Auch war die Varianz in diesem Parameter aufgrund der vorangegangenen Trocknung der Brennstoffe auf einen nahezu einheitlichen Wassergehalt von 15 m-% (Tabelle 50) nur gering. Dennoch wurden die höchsten CO-Emissionen an den in der Mietelagerten groben Waldrestholz hackschnitzeln gemessen, die zum Zeitpunkt der Verbrennung ebenfalls die höchsten Wassergehalte von ca. 22 m-% aufwiesen (Abbildung 113, Tabelle 50). Insgesamt zeigte sich über alle Versuche eine kaum gegebene Zunahme der CO-Emissionen mit steigendem Wassergehalt (Abbildung 115), die erst durch den letzten Datenpunkt ( $w = 22$  m-%) erkennbar wird.

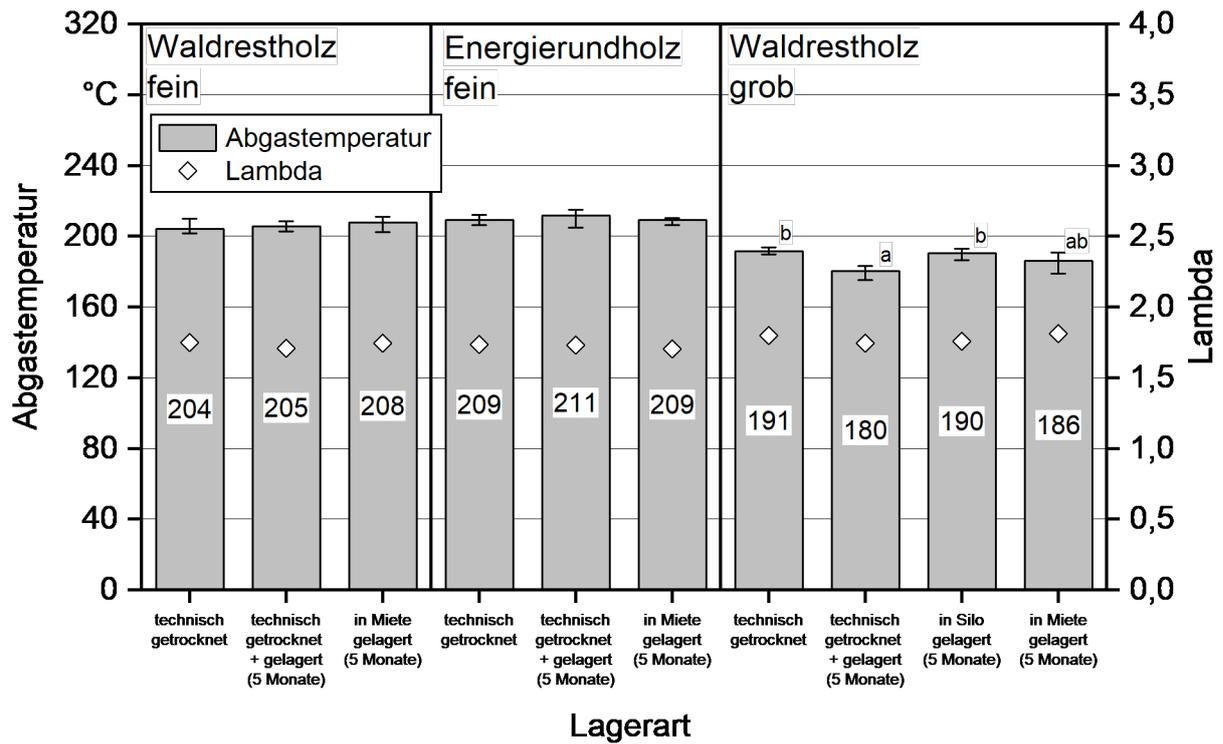


Abbildung 114: Mittlere Abgastemperaturen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert ± Min/Max (n = 5). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe (p ≤ 0,05, ANOVA mit Tukey-Test).

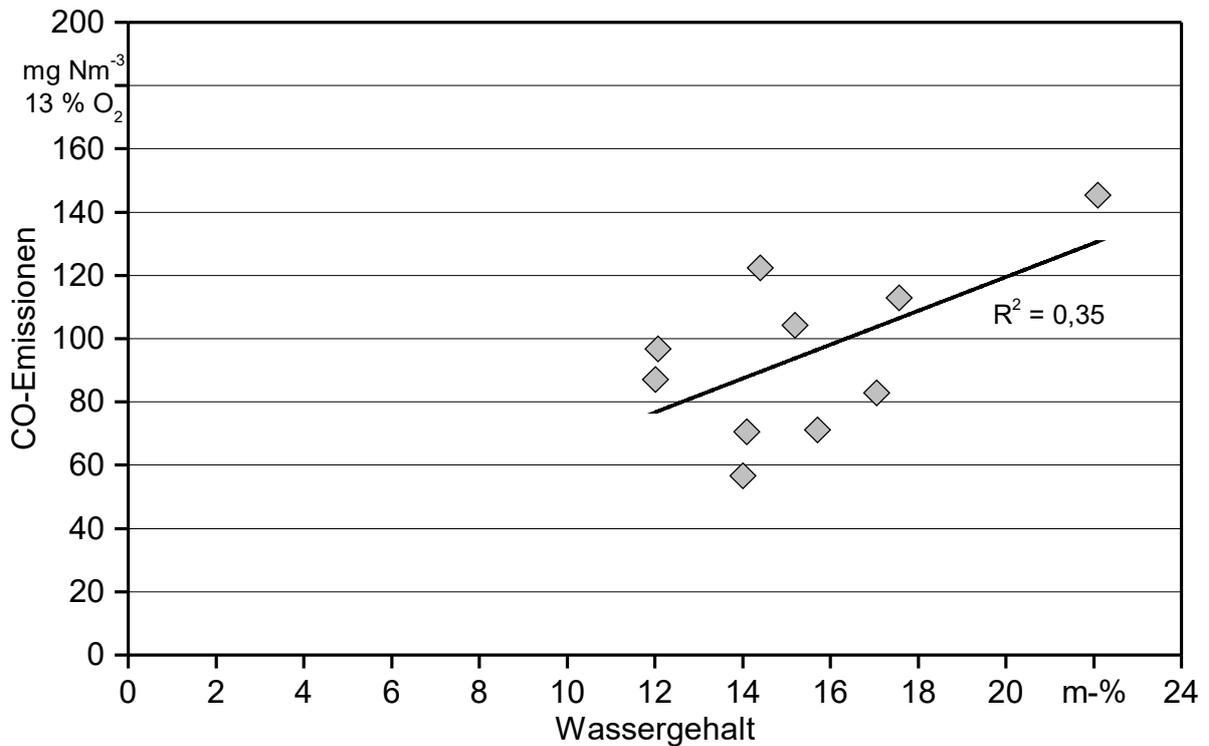


Abbildung 115: CO-Emissionen in Abhängigkeit des Wassergehalts

Auffällig war der hohe und signifikante Unterschied zwischen den CO-Emissionen der rein technisch getrockneten und der technisch getrockneten und anschließend gelagerten Waldrestholz hackschnitzel (Abbildung 113). Hierbei kam es fast zu einer Halbierung der Emissionswerte in der gelagerten Variante. Dieser Effekt ließ sich bei Waldrestholz und Energierundholz auch bei den Org.-C-Emissionen (Abbildung 116) und in geringem Maße auch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen (Abbildung 118) beobachten. Die rein technisch getrockneten Brennstoffe wurden Ende Mai 2017 verbrannt, die gelagerten Brennstoffe erst im November 2017. Eine Verbesserung des Emissionsverhaltens ist dabei nur bedingt durch Prozesse während der fünfmonatigen Lagerung erklärbar. Möglicherweise kam es während dieser Zeit zu einer zusätzlichen Trocknung der Brennstoffe (vgl. Tabelle 50). Eine weitere Erklärung könnte der Reinigungs- und Wartungszustand des Kessels bieten. Zwischen den Versuchen im Jahr 2017 wurden an demselben Kessel Verbrennungsversuche mit Agrarbrennstoffen (Weizenstroh, Gras, Sonnenblumenspelzen, KUP-Pappel) durchgeführt [77]. Dabei kam es zu teils sehr hohen Emissionen an CO und Gesamtstaub sowie zu einer ausgeprägten Schlackebildung. In Folge dessen wurde der Kessel nach Abschluss der Versuche mit den Agrarbrennstoffen umfassend gereinigt. Somit war die Feuerung zu Beginn der Versuche mit den technisch getrockneten und gelagerten Brennstoffen im November 2017 möglicherweise in einem etwas besseren Zustand als zum Zeitpunkt der ersten Verbrennungsversuche mit den rein technisch getrockneten Brennstoffen.

Die mittleren Emissionen organischer Kohlenstoffverbindungen (Org.-C) weisen einen ähnlichen Trend wie die CO-Emissionen auf (Abbildung 116). Vor allem bei den Brennstoffen aus den Versuchen zu Kapitel 7 wurde eine signifikante Zunahme der Org.-C-Emissionen bei den in einer Miete gelagerten Holz hackschnitzeln gemessen. Diese haben sich im Vergleich zu den technisch getrockneten Brennstoffen nahezu versechsfacht, allerdings auf einem extrem niedrigem Gesamtniveau. Analog zu CO treten hohe Org.-C-Emissionen vor allem bei einer unvollständigen Verbrennung auf. Vor allem hinsichtlich des Wassergehalts konnte ein nahezu linearer Zusammenhang gemessen werden (Abbildung 117). Ebenso zeigten die technisch getrockneten Holz hackschnitzel aus den Versuchen zu Kapitel 6 erneut signifikant höhere Werte als die technisch getrocknete und anschließend gelagerte Variante. Wie bereits für CO diskutiert könnte dies am Reinigungszustand des verwendeten Kessels liegen.

Im Gegensatz zu CO wurde beim Org.-C auch ein signifikanter Anstieg der Emissionen bei der im Silo gelagerten Variante im Vergleich mit den technisch getrockneten Brennstoffen gemessen (Abbildung 116). Dieser war nicht so stark ausgeprägt wie die Org.-C-Emissionen der in der Miete gelagerten Brennstoffe. Bei den Versuchen zur anaeroben Lagerung in Kapitel 7 zeigten die im Silo gelagerten Brennstoffe niedrigere Trockenmasseverluste als die dazugehörige Mietenvariante. Dementsprechend war die Zersetzung der Brennstoffe vermutlich geringer. Somit sollte es auch zu geringeren Problemen mit einer Brennraumüberlastung kommen (vgl. CO-Emissionen).

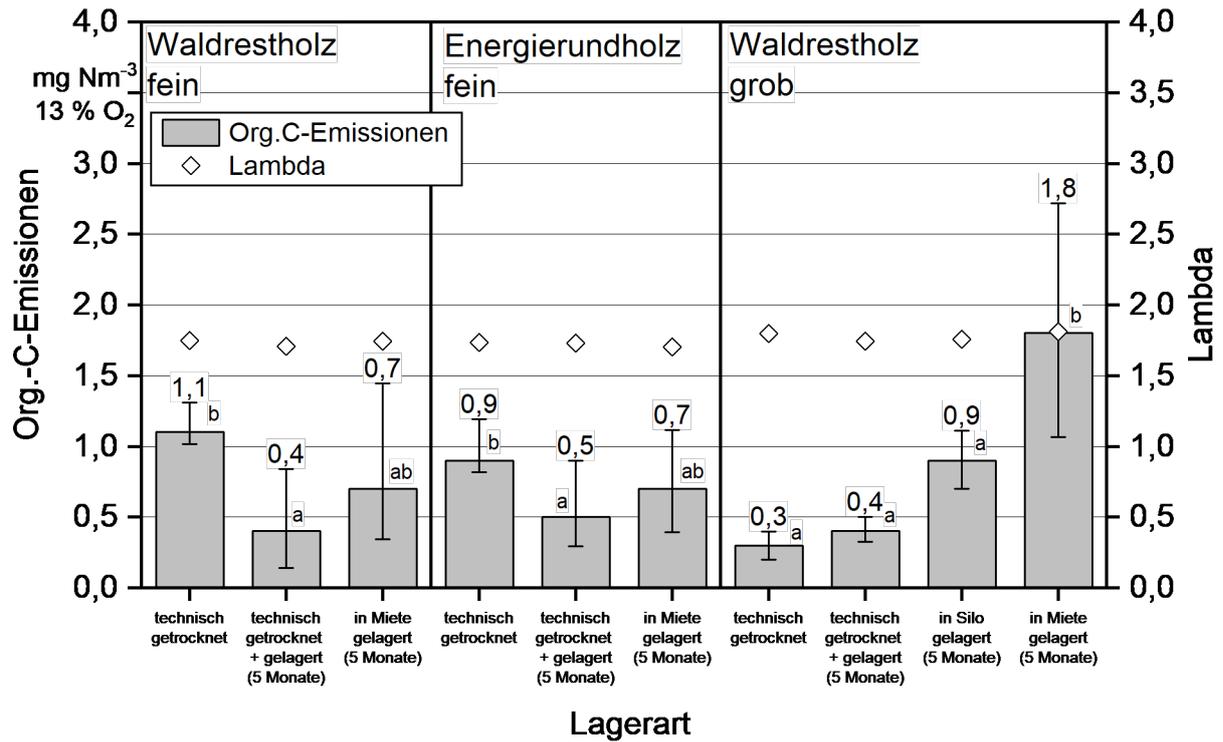


Abbildung 116: Mittlere Org.-C-Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert ± Min/Max (n = 5). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe (p ≤ 0,05, ANOVA mit Tukey-Test).

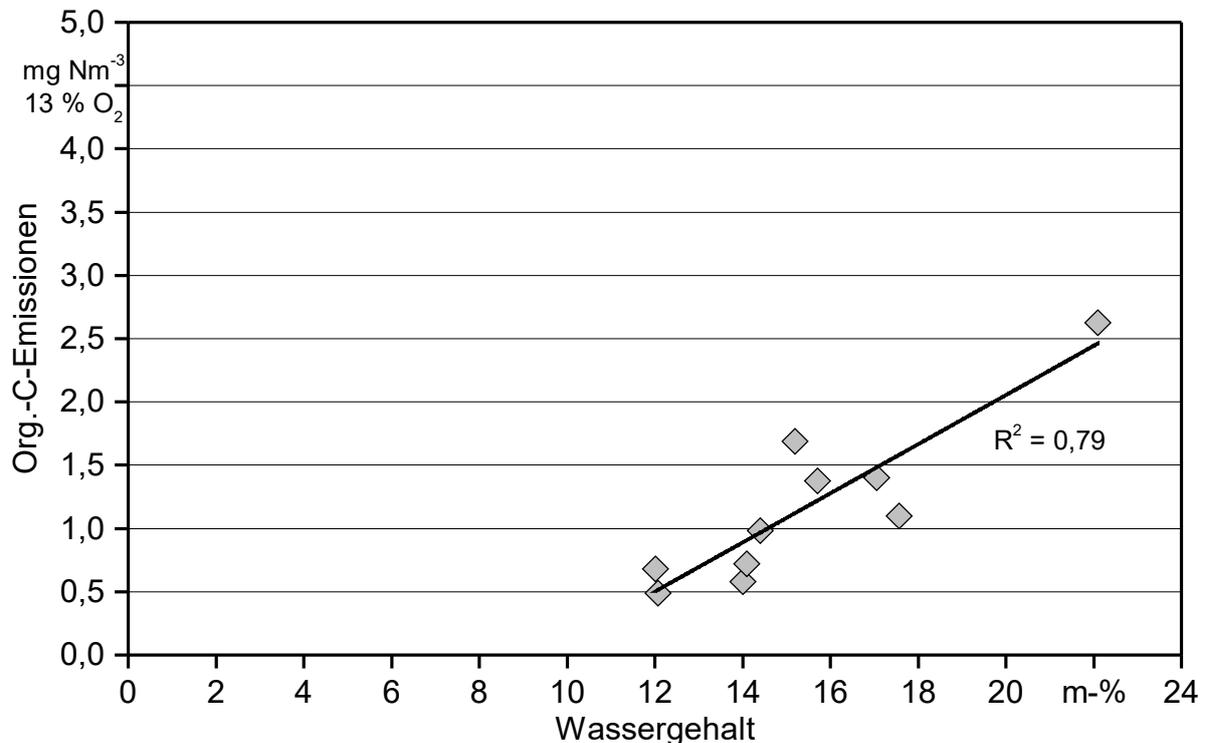


Abbildung 117: Org.-C-Emissionen in Abhängigkeit des Wassergehalts

Hinsichtlich der Emissionen an Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) zeigte sich kein eindeutiger Trend zwischen den Varianten (Abbildung 118). Zwar kam es stellenweise zu signifikanten Unterschieden zwischen den Versuchen, allerdings waren diese insgesamt relativ gering.  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind dabei hauptsächlich vom Stickstoffgehalt im Brennstoff abhängig. Wie erwartet folgten die  $\text{NO}_x$ -Emissionen auch in diesen Versuchen häufig einem linear ansteigenden Trend in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der Brennstoffe (Abbildung 119). Dieser Zusammenhang war im Vergleich zu Verbrennungsversuchen aus vorangegangenen Projekten des TFZ jedoch nur sehr gering ausgeprägt [102].

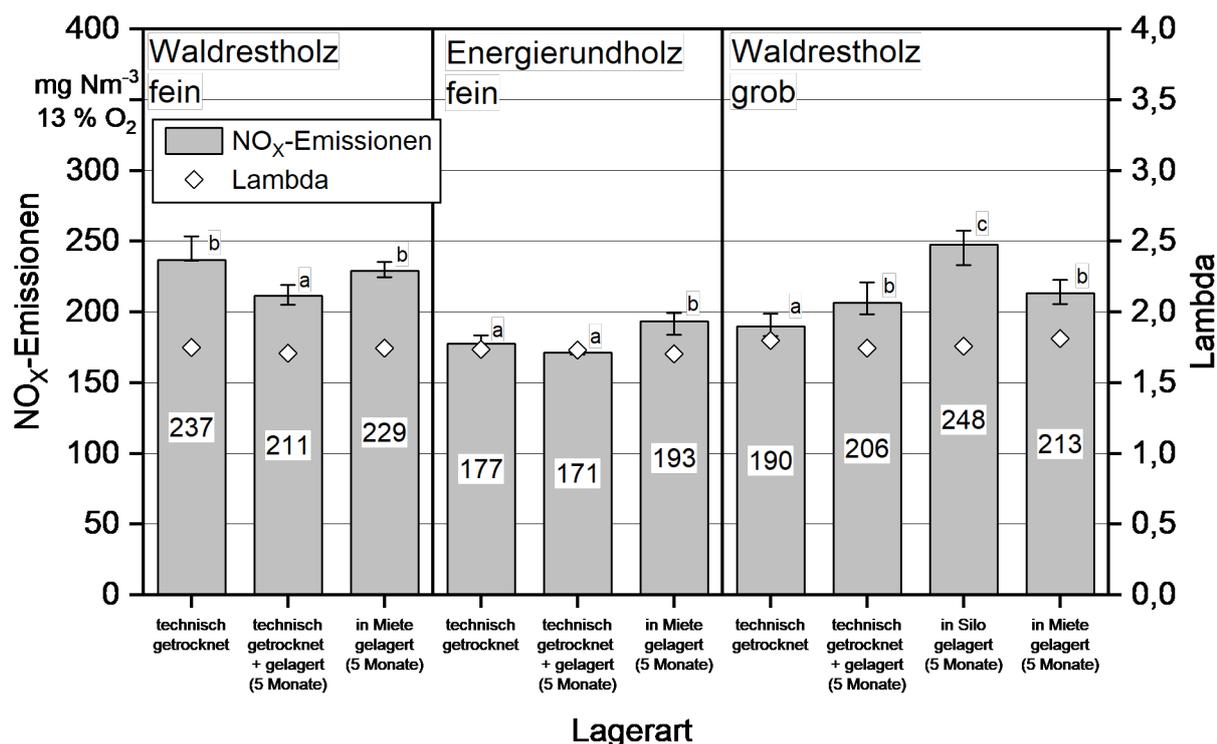


Abbildung 118: Mittlere  $\text{NO}_x$ -Emissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert  $\pm$  Min/Max ( $n = 5$ ). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe ( $p \leq 0,05$ , ANOVA mit Tukey-Test).

Theoretisch könnte sich bei einem hohen Trockenmasseabbau der Gehalt an Stickstoff erhöhen. Da dieser Effekt jedoch selbst für frisch eingelagerte KUP-Hackschnitzel sehr gering ist [77], sollte er auch in diesem Fall vernachlässigbar sein.

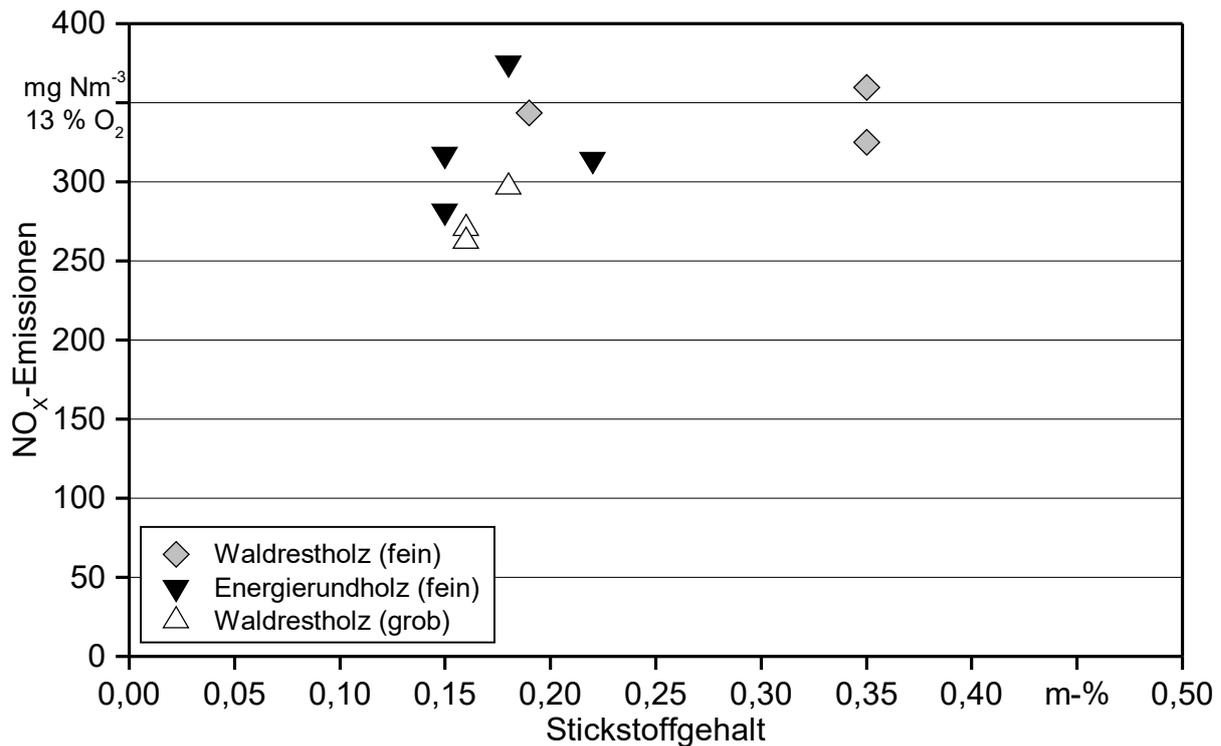


Abbildung 119: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit des Stickstoffgehalts

Im Fall der Emissionen an Gesamtstaub lagen alle gemessenen Werte deutlich über dem Grenzwert der Stufe 2 der 1. BImSchV von 20 mg Nm<sup>-3</sup> (Abbildung 120). Mit keinem der Brennstoffe konnten somit die nationalen Vorgaben zur Luftreinhaltung von Holzfeuerungen < 1 MW eingehalten werden, wenn kein nachgeschalteter Staubabscheider eingesetzt wird.

Vor allem bei den fein gehackten Brennstoffen nahmen die Emissionen der in den Mieten gelagerten Brennstoffe verglichen mit den technisch getrockneten Varianten erneut deutlich und meist signifikant zu. Bei den Brennstoffen aus den Versuchen zu Kapitel 7 war dies nicht so stark ausgeprägt. Hier zeigten die in den abgedichteten Silos gelagerten Waldrestholzhackschnitzel die signifikant höchsten Emissionen.

Hohe Staubemissionen entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung oder bei der Bildung von Aerosolen. Für Letztere sind hohe Gehalte sogenannter aerosolbildender Elemente im Brennstoff notwendig. Für Holzbrennstoffe ist dies vor allem Kalium, gefolgt von Natrium. Auch in den hier dargestellten Versuchen nahmen die Emissionen an Gesamtstaub nahezu linear mit dem Gehalt aerosolbildender Elemente zu (Abbildung 121). Lediglich ein Verbrennungsversuch, die in einer Miete gelagerten Energierundholzhackschnitzel, fällt aus diesem Trend heraus. Vor allem in diesem Fall ist somit naheliegend, dass die erhöhten Emissionen an Gesamtstaub auf Rußbildung aufgrund einer unvollständigen Verbrennung zurückzuführen sind. Die Staubemissionen waren dabei für die in einer Miete gelagerten Energierundholzhackschnitzel nahezu verdoppelt gegenüber den technisch getrockneten Varianten (Abbildung 120).

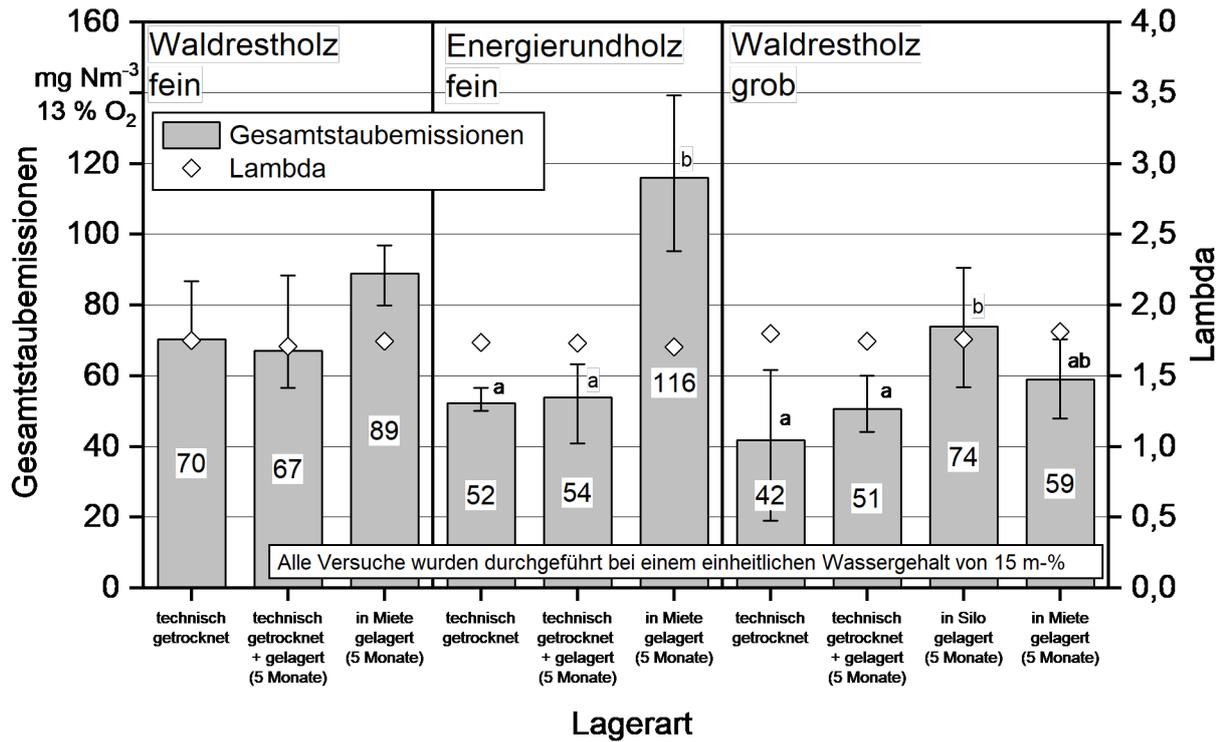


Abbildung 120: Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambda bei den Feuerungsversuchen zur Lagerungsart von Holzhackschnitzeln (Wassergehalte: 12–22 m-%). Mittelwert ± Min/Max (n = 5). Unterschiedliche Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb derselben Versuchsreihe (p ≤ 0,05, ANOVA mit Tukey-Test).

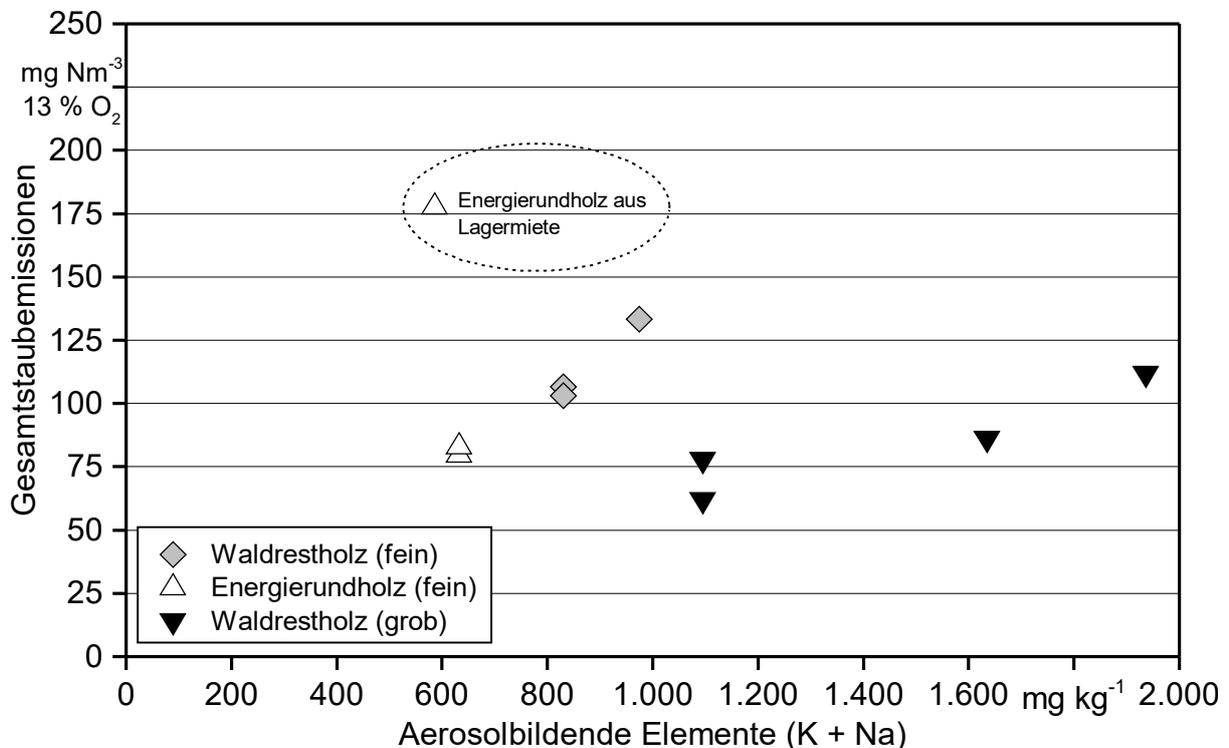


Abbildung 121: Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit vom Gehalt der aerosolbildenden Elemente Kalium und Natrium im Brennstoff

Insgesamt deuten die Ergebnisse somit darauf hin, dass es bei Holzhackschnitzeln, die in einer Miete gelagert wurden, zu einer Erhöhung der bei der Verbrennung freiwerdenden Emissionen an CO, Org.-C und Gesamtstaub kommen kann. Dies ließ sich zum Teil auf physikalische und chemische Brennstoffparameter wie beispielsweise den Wassergehalt (CO, Org.-C) oder den Gehalt aerosolbildender Elemente zurückführen. Weder die Partikelgrößenverteilung noch die Partikelform hatten einen deutlichen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten. Gleichzeitig konnten die erhöhten Emissionen nicht in jedem Fall auf einzelne Parameter zurückgeführt werden. Vielmehr könnte es aufgrund von Trockenmasseverlusten zu einer Änderung der Partikelstruktur und damit zu ungünstigen Füllzuständen des Brennraums kommen. Dies könnte durch eine geeignete Anpassung des Kessels auf gelagerte Brennstoffe verbessert werden.

Im Fall der CO-Emissionen waren die Messwerte als unkritisch zu betrachten. Im Fall der Staubemissionen empfiehlt sich die Verwendung geeigneter sekundärer Maßnahmen, beispielsweise elektrostatischer Abscheider. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass in Freilandmieten gelagerte Holzhackschnitzel tendenziell höhere Emissionen bei der Verbrennung haben könnten als technisch getrocknete Brennstoffe.

#### **12.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die Lagerung hatte einen erheblichen Einfluss auf das Fließ- und Verbrennungsverhalten von Holzhackschnitzeln. Besonders bei in einer Miete gelagerten Holzhackschnitzeln zeigte sich eine Verbesserung hinsichtlich der Brückenbildungsneigung, vermutlich durch eine oberflächliche Zersetzung der Holzteilchen. Gleichzeitig nahm bei diesen Brennstoffen das Emissionsverhalten an CO, Org.-C und Gesamtstaub häufig zu. Lediglich beim Gesamtstaub war dies als kritisch zu bewerten, da selbst bei technisch getrockneten Brennstoffen der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV mit dem verwendeten Kessel nicht eingehalten werden konnte. Hier empfiehlt sich die Verwendung weiterer emissionsmindernder Maßnahmen, beispielsweise die Nutzung elektrostatischer Staubabscheider.

Vor allem für Kleinf Feuerungsanlagen, bei denen ein sehr niedriger Wassergehalt für eine emissionsarme Verbrennung empfohlen wird, bietet sich die technische Trocknung im Vergleich zur Lagerung in Holzhackschnitzelmieten an. So kann sowohl ein geeigneter Wassergehalt sicher erreicht als auch eine Veränderung der Partikelstruktur aufgrund von Trockenmasseabbau vermieden werden. Letzteres steht im Ergebnis der hier dargestellten Versuche im Verdacht, erhöhte Emissionen an CO, Org.-C und Gesamtstaub durch zu hohe Brennraumbelastung und unvollständige Verbrennung zu verursachen.



## 13 Sickerwasser aus Holzhackschnitzelmieten

HOFMANN, N.; RIEBLER, M.; SCHULMEYER, F.; KUPTZ, D.; BORCHERT, H.

### 13.1 Problem- und Zielstellung

Mit dem steigenden Aufkommen von Holzhackschnitzeln und der damit verbundenen Zunahme an Lagermengen und -plätzen traten in den letzten Jahren vermehrt Bedenken der bayerischen Umweltverwaltung hinsichtlich Stoffeinträgen durch Sickerwasser aus Holzhackschnitzelschüttungen in Grund- und Oberflächengewässer auf. Aufgrund rechtlicher Unklarheiten kam es darum in Bayern in den vergangenen Jahren zu einer heterogenen Auslegungs- und Genehmigungspraxis der jeweilig örtlich zuständigen Kreisverwaltungsbehörden bei der Beurteilung oder Genehmigung von Holzhackschnitzellagerplätzen. Mangels ausreichender wissenschaftlicher Studien konnten negative Auswirkungen durch Sickerwasser bisher weder belegt noch ausgeschlossen werden.

Das Ziel dieses Arbeitspakets war deshalb, die Inhaltsstoffe von Sickerwasser aus Holzhackschnitzelschüttungen in Abhängigkeit von Sortiment (Waldrestholz/Energierundholz), Berechnungsmenge und Lagerungsdauer unter weitgehend kontrollierten Bedingungen zu ermitteln. Hierbei sollten auch die Ergebnisse eines ersten Freilandversuchs zu Holzhackschnitzelsickerwasser aus dem Jahr 2015 ergänzt werden, die dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten bereits als separater Bericht vorliegen [103].

### 13.2 Vorversuch – Lagerung im Freiland mit Sickerwasserrinnen

Im Zuge des abgeschlossenen Vorgängerprojekts „Qualitätserhaltende Hackschnitzellaagerung“ (EW/13/53) [60], gefördert vom Bayerischen StMELF und durchgeführt von LWF und TFZ, wurden erste Sickerwasseruntersuchungen an Holzhackschnitzellagermieten realisiert. Die Integration der Fragestellung erfolgte damals kurzfristig auf Bitten des Ministeriums in eine ursprünglich für andere Fragestellungen konzipierte Versuchsreihe. Diese ersten Sickerwasseruntersuchungen der LWF lieferten wichtige Anhaltspunkte zu den erwartbaren Sickerwassermengen und der inhaltsstofflichen Zusammensetzung des Sickerwassers [103]. Bei diesen Versuchen wurde das Sickerwasser in Kunststoffrinnen, die quer zur Mietenlängsachse mit leichtem Gefälle durch den gesamten Mietenkörper verliefen, aufgefangen und an der Mietenbasis gesammelt (Abbildung 122).

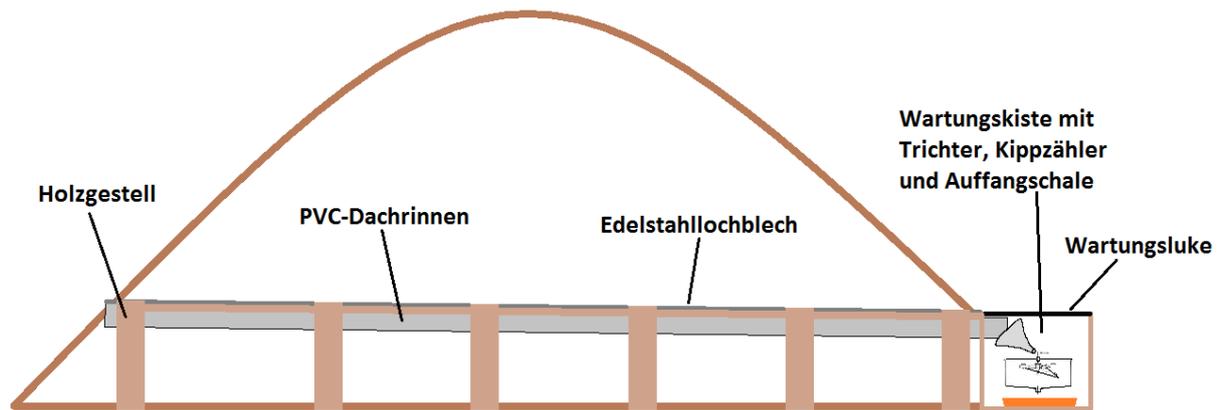


Abbildung 122: Rinnenkonstruktion zur Gewinnung von Sickerwasserproben mit den wichtigsten Komponenten im Mietenquerschnitt [103]

Die Ergebnisse zeigen, dass nur ein geringer Teil des Niederschlags die Holzhack-schnitzelmiete als Sickerwasser verlässt. Das Rückhaltevermögen der Holzhack-schnitzel betrug über die gesamte Lagerungsdauer von fünf Monaten selbst im ungünstigsten Fall (offen gelagerte Waldrestholzhack-schnitzel) noch 93,7 % der Niederschlagsmenge. Zudem stellte sich heraus, dass es nur bei Niederschlägen von mindestens mittlerer Intensität ( $> 7 \text{ mm d}^{-1}$ ) überhaupt zu einer Sickerwasserspense kommt und nur starke Niederschläge ( $> 17 \text{ mm d}^{-1}$ ) zu einer nennenswerten Sickerwasserspense ( $> 1 \text{ l m}^{-2}$  Mietengrundfläche) führen. Schwache, aber wesentlich häufiger auftretende Niederschläge werden hingegen komplett von den Holzhack-schnitzeln zurückgehalten (siehe Abbildung 123).

Die inhaltsstofflichen Analysen zeigen, dass das Sickerwasser hohe Konzentrationen organischer Verbindungen enthält, die zu einem hohen chemischen (CSB) und biologischen ( $\text{BSB}_5$ ) Sauerstoffbedarf führen. Dieser könnte bei der direkten Einleitung größerer Mengen Sickerwasser zu einem Sauerstoffmangel im empfangenden Oberflächengewässer führen. Des Weiteren waren die Konzentrationen an Stickstoff sowie manchen Spurenelementen und Schwermetallen gegenüber dem Regenwasser teilweise deutlich erhöht. Andererseits lagen viele Elemente sogar unterhalb der Grenzwerte für Trinkwasser (TrinkwV) [15]. Die Ergebnisse waren jedoch vor dem Hintergrund einer sehr kleinen Probenanzahl aufgrund geringer Niederschläge während des Untersuchungszeitraums im Sommer des Jahres 2015 sowie mögliche Verfälschungen der Proben durch logistische Probleme kritisch zu betrachten. Wegen der außerplanmäßigen Einbindung dieses Versuchs und der großen Distanz des Versuchsstandorts zur LWF war es nicht möglich, in kurzen Intervallen die Probengefäße zu überprüfen. Dies führte zu einer teils mehrtägigen Verweildauer der Proben in den Sammelbehältern. Die Folge daraus war eine Alterung, Verdunstung und Kontamination (Staub, Insekten) der Proben. Darum wurde die Entscheidung getroffen, eine Kombination aus Freiland- und Laborversuchen unter weitestgehend kontrollierten Bedingungen (künstliche Beregnung) im Rahmen der hier beschriebenen Studie durchzuführen.

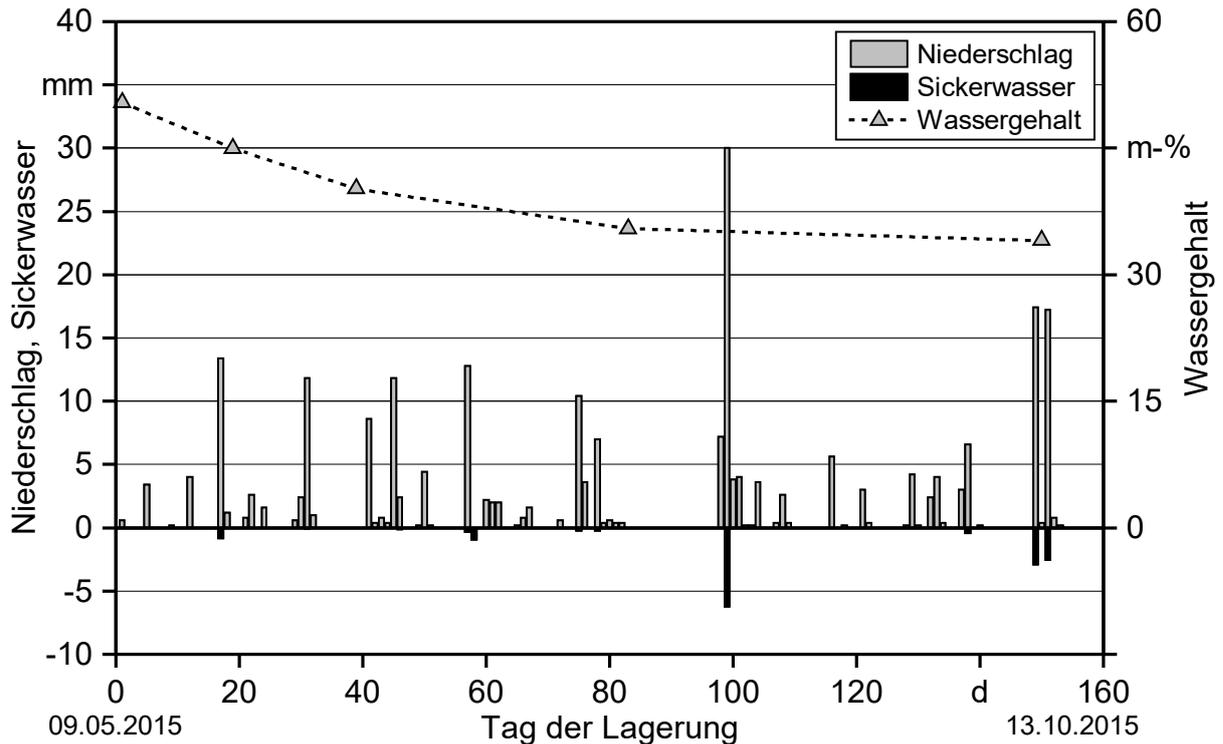


Abbildung 123: Niederschlagsereignisse und Sickerwassermengen bei den nicht abgedeckt gelagerten Waldrestholzhackschnitzeln aus Untersuchungen des Vorgängerprojekts

### 13.3 Material und Methoden

Um das Ziel, eine möglichst praxisnahe aber gleichzeitig auch kontrollierbare Versuchreihe durchzuführen, erfüllen zu können, wurde entschieden, im Freiland unter Praxisbedingungen gelagerte Waldhackschnitzel in regelmäßigen Intervallen in Kunststoffässern künstlich zu beregnen.

Hierzu wurden im Juli 2017 auf einem Holzhackschnitzellagerplatz nahe Freising (Oberbayern) je eine Holzhackschnitzelmiete aus Waldrestholz- und eine aus Energie- und Rundholzhackschnitzeln mit einem Volumen von jeweils rund 120 Sm ohne Regenschutz errichtet (Abbildung 124). Die Hackholzpolter bestanden fast ausschließlich aus Fichte (Käferholz).



Abbildung 124: Holzhackschnitzelmieten aus Fichte (links: Energierundholz-HS, rechts: Waldrestholz-HS) zur Entnahme von Holzhackschnitzeln für die künstliche Beregnung

Aus den Mieten wurden bis Dezember 2017 alle vier Wochen Holzhackschnitzel entnommen (Tabelle 55), durch dreimaliges manuelles Umschaufeln homogenisiert, hinsichtlich des Wassergehalts, Aschegehalts, Heizwerts, der Partikelgrößenverteilung sowie des Elementgehalts nach DIN-EN-ISO-Norm für biogene Festbrennstoffe (vgl. Abschnitt 6.2.3) beprobt und anschließend in fünf lebensmittelechte 220-l-Fässer mit perforierten Böden gefüllt (Abbildung 125).

Tabelle 55: Zeitlicher Ablauf der Hauptversuche zu den Sickerwasseruntersuchungen (Probenahme jeweils zur Monatsmitte)

Probe- nahme	PN 1 Einlagerung	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5	PN 6
PN- Zeitpunkt	Juli 2017	August 2017	September 2017	Oktober 2017	November 2017	Dezember 2017

Die Holzhackschnitzel für die Untersuchungen wurden nur aus der Deckschicht (obere ca. 25 cm) der Mieten entnommen, da das Sickerwasser aus der Erfahrung des Vorgängerprojekts und Literaturangaben zufolge nahezu ausschließlich seitlich entlang der Deckschicht der Miete abfließt (Abbildung 125). Eine Ausnahme bildete die erste Probenahme während des Mietenaufbaus. Dort wurden die Holzhackschnitzel, um den Aufwand zu verringern, auch aus tieferen Schichten am Ende der Mieten entnommen, da es

direkt nach dem Aufschütten noch keine Schichtbildung durch Kondensation oder Weteroneinflüsse gegeben haben konnte.



**Abbildung 125:** Oben links: Waldrestholzhackschnitzelmiete nach der zweiten Beprobung: Entnahme einer ca. 1 m breiten und 25 cm mächtigen Holzhackschnitzelschicht quer über den gesamten Mietenkörper. Oben rechts: Beprobung der händisch homogenisierten Waldrestholzhackschnitzel. Unten links: Befüllung der Beregnungsfässer nach der Holzhackschnitzelbeprobung. Unten rechts: Aufbau des Beregnungsversuchs mit Laborschlauchpumpe, Beregnungsgittern, mit Holzhackschnitzeln befüllte HDPE-Fässer mit Lochboden, Holzgestellen und lebensmittelechten Aufgangwannen in einer Garage auf dem Lagerplatz.

Zur Homogenisierung wurden die Holzhackschnitzel händisch mit Schaufeln auf einer Teichfolie drei Mal komplett umgesetzt und dabei durchmischt. Die Folie sollte einen Lack- oder Metallabrieb der Schaufeln durch Asphaltkontakt und somit einen unerwünschten Stoffeintrag in die Holzhackschnitzel verhindern. Nach der Homogenisierung wurden alle Fässer randvoll mit den Holzhackschnitzeln befüllt und anschließend auf einem Handwagen eine definierte Strecke (100 m) über den Lagerplatz gezogen, um eine Verdichtung, wie sie auch in Lagermieten auftritt, zu simulieren. Die geringen Masseunterschiede zwischen den Fässern wurden ausgeglichen, indem die Holzhackschnit-

zel händisch so verteilt wurden, dass jedes der fünf Fässer vor der Beregnung gleich viel wog. Die Massekontrolle erfolgte mit einer handelsüblichen Personenwaage (Leifheit AG, Soehnle Style Sense Comfort 200, max. Traglast 180 kg, Messauflösung 0,1 kg).

Anschließend wurden die fünf Proben in den Fässern gleichzeitig mit demineralisiertem Laborwasser (sogenanntes VE-Wasser) durch eine 6-Kanal-Laborschlauchpumpe (TC/200 E, medorex e. K.) beregnet. Das VE-Wasser wurde gewählt, da es in seiner chemischen Zusammensetzung am ehesten dem natürlichen Regenwasser entspricht, eine gleichbleibende Qualität besitzt und somit reproduzierbare Versuche zulässt. Ein sechstes Fass wurde unbefüllt beregnet (Nullprobe) und diente somit als Referenz für mögliche Einflüsse des Versuchsaufbaus (Abbildung 125). Jedes Beregnungsgitter wies 55 gleichmäßig über die Öffnungsfläche des Fasses verteilte Tropflöcher auf. Die Beregnungsdauer betrug jeweils eine Stunde. Es wurden zwei unterschiedliche Beregnungsintensitäten untersucht: einmal 2,3 l je Fass, was umgerechnet auf das Holzhackschnitzelvolumen einem leichten bis mäßigen Regenereignis entspricht, und einmal 9,2 l je Fass, was einem mäßigen bis starken Regenereignis entspricht. Die Beregnungsmengen wurden mithilfe eines Vorversuchs, einer Niederschlagszeitreihenauswertung und der Definitionen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) bestimmt (siehe Anhang C).

Das Sickerwasser wurde während und nach der Beregnung unter den Fässern in lebensmittelechten Auffangwannen gesammelt. Die Nachtropfphase betrug eine Stunde, da ein Vorversuch gezeigt hatte, dass danach nur noch sehr geringe Sickerwassermengen austreten (siehe Anhang C). Anschließend wurden die Proben sofort in Probenflaschen abgefüllt und gekühlt ins Labor gebracht. Durch die kurze Verweildauer der Probe wurde der Einfluss einer Alterung und einer Kontamination im Vergleich zur Vorgängerstudie ausgeschlossen. Die Analyse des chemischen und biologischen Sauerstoffbedarfs (CSB und BSB<sub>5</sub>) wurde in einem externen Labor (AGROLAB Labor GmbH) durchgeführt. Die Analyse der Schwermetalle und Spurenelemente erfolgte im LWF-eigenen Labor.

Nach jedem Versuchsdurchgang (bei Änderung der Beregnungsmenge und/oder des Sortiments) wurden die Fässer geleert und wieder mit frischen Holzhackschnitzeln befüllt.

Bei den Materialien, mit denen das Beregnungs- und Sickerwasser in Berührung kam, wurden lebensmittelechte Kunststoffe verwendet, um eine Kontamination der Proben und somit eine Verfälschung der Ergebnisse auszuschließen (Tabelle 56). Eine Überprüfung erfolgte über die Auswertung der Nullprobe (Fass 6).

Durch die künstliche Beregnung wurde sichergestellt, dass die Versuche in regelmäßigen Intervallen und mit konstanter Beregnungsmenge stattfinden konnten. Neben dem Einfluss des Sortiments und der Lagerungsdauer konnte so auch der Einfluss der Beregnungsintensität erforscht werden. Die fünf Wiederholungen je Durchgang ließen zudem statistische Interpretationen (Standardabweichung) zu.

*Tabelle 56: Materialien, mit denen das Beregnungs- bzw. Sickerwasser in Berührung kam, bevor es zur Analyse in die Probenflaschen abgefüllt wurde. Obere Tabellenhälfte: VE-Wasser. Untere Tabellenhälfte: Sickerwasser. Sortiert nach Reihenfolge des Kontakts*

Element	Kunststoffname	Abkürzung	Lebensmittel- echtheit*	Produktname	Firma
Beregnungswasserkanister	Polyethylen	PE	ja	30-Liter-Kanister Natur	Wilai GmbH
Pumpenschläuche	Polypropylen	PP	ja	Santopren	Medorex e. K.
Beregnungsröhre	Polyethylen	PE	k. A.	Verlegerohr 13 mm	Gardena
Reaktorfässer	Polyethylen hoher Dichte	HDPE	ja	Spundfass 220 Liter (L-Ring)	Wilai GmbH
Auffangwannen	Polystyrol	PS	ja	Wildwanne, Jagdwanne	Hommel GBR
Filternetze	k. A.	k. A.	ja	Stockinet BCK, extra stark	DNW Reicke

\* Verkäuferangabe

Als potenzieller methodischer Schwachpunkt wurde bei einem LWF-internen Arbeitstreffen zum Thema Sickerwasser aus Holzhackschnitzeln von den anwesenden Experten angemerkt, dass eine starke Veränderung der Sauerstoffkonzentration in den Holzhackschnitzeln beim Herausnehmen aus der Miete, Homogenisieren und Befüllen der Fässer einen großen Einfluss auf die Mobilität der Elemente in den Holzhackschnitzeln und somit deren Auswaschbarkeit haben könnte. Dies gelte insbesondere dann, wenn der Zustand von gänzlich anaerob hin zu aerob wechseln würde. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Literatur hinsichtlich Sauerstoffmessungen in Holzhackschnitzelschüttungen zu analysieren (Tabelle 57, Tabelle 58) und zusätzlich selbst Sauerstoffmessungen in der zu beprobenden Deckschicht durchzuführen.

Die Literaturanalyse ergab, dass bei direkten Luftsauerstoffmessungen auch im Kern von großen Holzhackschnitzelmieten mit relativ feinen Holzhackschnitzeln nie eine Sauerstoffkonzentration von unter 12 Vol.-% festgestellt wurde (Tabelle 57, Tabelle 58).

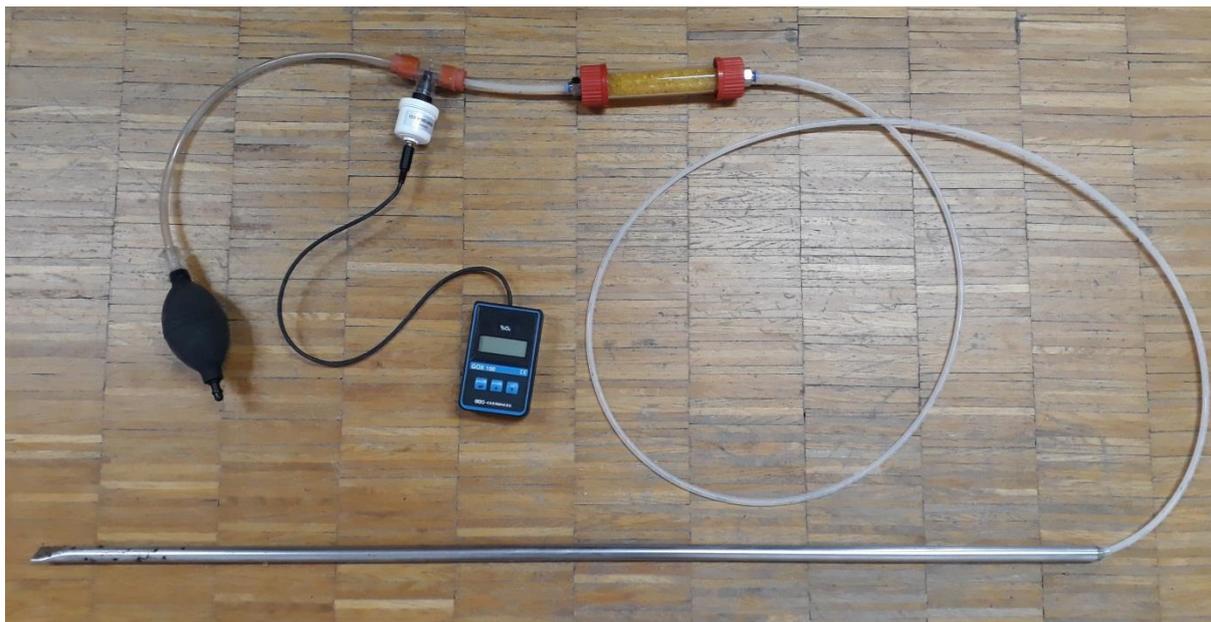
**Tabelle 57:** *Literaturübersicht zur Luftsauerstoffkonzentration in Holzhackschnitzelschüttungen – Messung der Sauerstoffkonzentration (HS = Holzhackschnitzel)*

Quelle	Zusammenfassung
Marutzky & Kesery 1981 [89]	Der Sauerstoff im Haufeninnern nahm nur um 1 bis 3 Prozentpunkte ab (Seite 2). Messmethode nicht erläutert. Gelagert wurden sowohl Kiefern-HS als auch Buchen-HS in 40-m <sup>3</sup> -Haufen mit einer Höhe von 3,5–4 m.
Bergman 1985 [6]	In einem Birkenhackschnitzelhaufen lag der Sauerstoffgehalt über die gesamte Lagerungsdauer (drei Monate) bei 15–22 Vol.-%. Methode nicht klar (entweder Probenentnahme mit PVC-Rohren oder direkte Messung).
Ferrero et al. 2009 [48]	In zwei Kiefernholzhackschnitzelhaufen (je > 1000 Srm, 5 bis 6 m hoch) wurde über Stahlrohre und den Servomex-Gasanalysator 5200 vv der Sauerstoff etc. gemessen. Im Artikel wurden keine konkreten Ergebnisse angegeben, nur „gute Übereinstimmung mit dem Modell“, dessen Werte aber ebenfalls nicht gezeigt werden. Allerdings wurden in einer Präsentation des Hauptautors [48] Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt, wo immer > 18 Vol.-% Sauerstoff gemessen wurden.
Lenz et al. 2015 [83]	Der Sauerstoffgehalt lag immer bei 12–20 Vol.-% (Model 1312, Innova AirTech Instruments, misst direkt durch Ansaugen über Schlauch), die Sortimenten waren KUP-HS P31 und P45, der Mietenquerschnitt hatte die Maße (B × H) 9 × 3,5 m.

**Tabelle 58:** *Literaturübersicht zur Luftsauerstoffkonzentration in Holzhackschnitzelschüttungen – Messung anderer Gase mit Rückschluss auf die Sauerstoffkonzentration (HS = Holzhackschnitzel)*

Quelle	Zusammenfassung
Heinek et al. 2013 [57]	Anaerobe Bedingungen (Methan-, Wasserstoff-, Schwefelwasserstoff und CO <sub>2</sub> -Messungen über dem Haufen mit Dräger X-am 7000) wurden in einem 15 bis 20 m hohen HS-Haufen eines Heizkraftwerks (Sortiment nicht beschrieben) vermutet. Bei den beiden anderen untersuchten Fällen (1 × Wrh- und 1 × Er-HS) wurden sauerstoffreiche Bedingungen festgestellt.
Whittaker et al. 2016 [115]	Nach zwei Monaten anaerobe Bedingungen festgestellt (Anstieg Methankonzentration bei gleichzeitigem Absinken von CO <sub>2</sub> , Gasproben mit Edelstahlrohren entnommen und im Labor analysiert), KUP-HS, Mietenquerschnitt (B × H) 9 × 5 m bzw. 8 × 4 m.

Dahingegen könnte ein Anstieg der Methankonzentration – als Indikator für eine sehr geringe Sauerstoffkonzentration – zum einen durch die extreme Schüttungshöhe verursacht worden sein, wodurch im Kern tatsächlich keine Durchlüftung mehr auftrat, zum anderen auch dadurch, dass möglicherweise in sehr begrenzten Bereichen, beispielsweise innerhalb einzelner Holzhackschnitzel, anaerobe Prozesse in Gang gesetzt wurden. In den geplanten Versuchen wurden die Proben jedoch aus der Deckschicht (max. 25 cm Tiefe) entnommen. Zudem wurde der Austrag von Elementen mit dem Sickerwasser in erster Linie von den Oberflächen der Holzhackschnitzel erwartet. Weiterhin wurde in den Freilandversuchen des Vorgängerprojekts beobachtet, dass bei starkem Wind v. a. bei den Energierundholzmierten die Temperatur auch im Mietenkern stark absank, was für eine ausreichende Durchlüftung spricht.



*Abbildung 126: Vorrichtung zur Messung der Sauerstoffkonzentration in der Deckschicht der Holzhackschnitzelmieten, bestehend aus Einstecklanze (Edelstahlrohr, 100 cm) mit perforiertem Ende, Laborschlauch, Kartusche mit Kieselgel, Sauerstoffmessgerät (GOX 100, GHM Messtechnik GmbH) und Handpumpe*

Trotz der geringen Wahrscheinlichkeit, dass in der Deckschicht der Holzhackschnitzelmieten ein Sauerstoffmangel auftreten würde, wurden unmittelbar vor jeder Probenahme Sauerstoffmessungen direkt an der Entnahmestelle durchgeführt. Hierzu wurde das Sauerstoffmessgerät GOX 100 (GHM Messtechnik GmbH) mit einem Ansaugschlauch ausgerüstet, in dem die Mietenluft über eine Kartusche mit Kieselgel entfeuchtet und auf Umgebungstemperatur abgekühlt wurde. Der Ansaugschlauch mündete in einem Edelstahlrohr, das für eine In-situ-Luftentnahme in die Deckschicht der Mieten gesteckt wurde. Das Ansaugen der Mietenluft zum Sensor erfolgte dann durch eine Handpumpe (Abbildung 126).

## **13.4 Ergebnisse und Diskussion**

### **13.4.1 Witterung**

Insgesamt fielen an der nächstgelegenen Messstation des Deutschen Wetterdiensts (Weihenstephan-Dürnast, 1,7 km entfernt) während des Versuchszeitraums 406,6 mm Niederschlag, die durchschnittliche Lufttemperatur lag bei 11,2 °C (Abbildung 127).

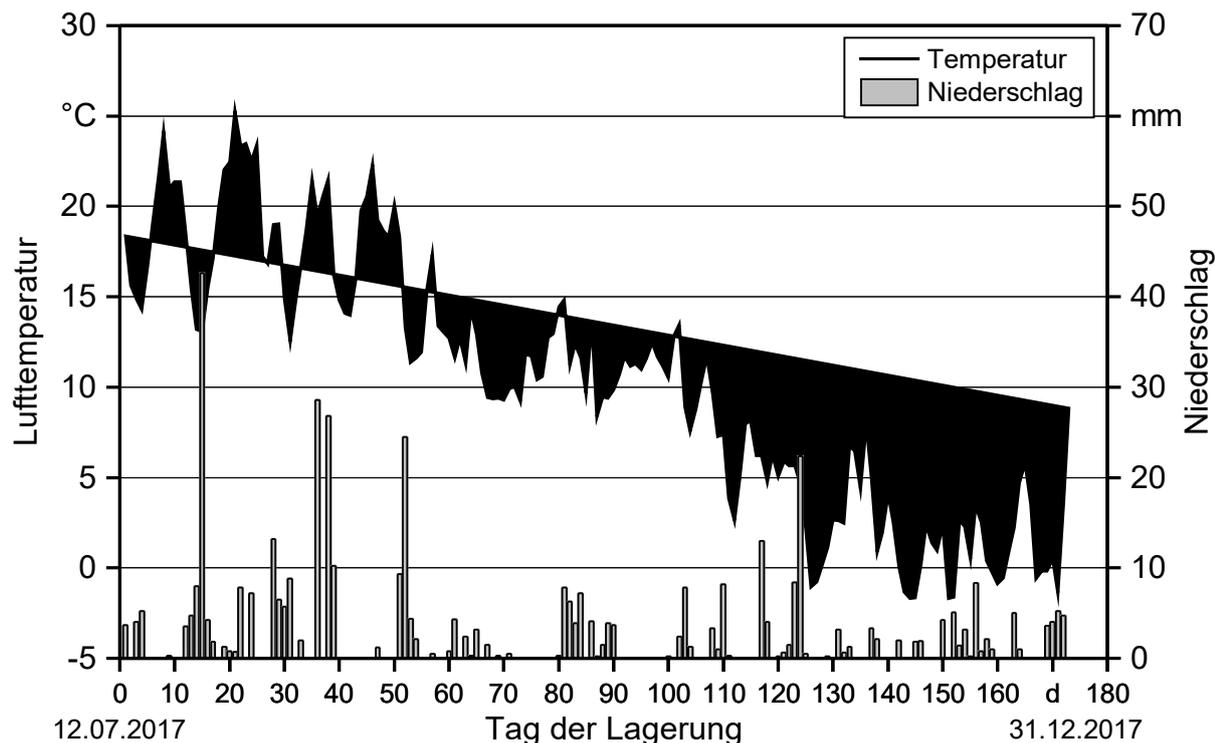


Abbildung 127: Lufttemperatur und Niederschlag an der DWD-Messstation Weiherstephan-Dürnst während des Versuchszeitraums [25]

Der Vergleich zum Mittel der Jahre 2009 bis 2016 (330,4 mm und 11,3 °C) zeigte, dass 2017 bezogen auf den Versuchszeitraum ein relativ niederschlagsreiches, aber durchschnittlich warmes Jahr war [25]. Wichtig für die Interpretation der Sickerwasserproben war in erster Linie, dass es zwischen allen Probenahmeterminen (Monatsmitte) regelmäßig regnete und erfasst wurde, wie viele potenziell sickerwasserrelevante Niederschlagsereignisse auftraten. Legt man die Ergebnisse des Freilandversuchs 2015 zugrunde, kam es während des Versuchs zu 18 Ereignissen, an denen überhaupt mit einer Sickerwasserspense zu rechnen war ( $\geq 7$  mm Niederschlag in 24 h), und fünf Ereignissen, an denen mit mindestens  $1 \text{ l m}^{-2}$  Mietengrundfläche eine größere Sickerwassermenge aufgetreten sein könnte ( $\geq 17$  mm Niederschlag in 24 h). Aber auch Niederschläge, die zu keinem Sickerwasserabfluss führen, könnten innerhalb der Miete Elemente verfrachten und einen Einfluss auf den Austrag bei folgenden stärkeren Niederschlägen haben.

### 13.4.2 Holzhackschnitzelqualität

#### 13.4.2.1 Wassergehalt und Masse

Der Wassergehalt betrug zum Zeitpunkt der Einlagerung bei den Waldrestholzhackschnitzeln  $42,2 \pm 0,7$  m-% und bei den Energierundholzhackschnitzeln  $44,5 \pm 0,6$  m-% (Tabelle 59).

**Tabelle 59:** Wassergehalt (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung aus jeweils zehn Proben) und Gesamtmasse der Holzhackschnitzel für die Sickerwasserver-suche.

	Juli (Einlagerung)	August	September	Oktober	November	Dezember (Versuchsende)
Waldrestholz, Wassergehalt in m-%	42,2 $\pm$ 0,7	61,1 $\pm$ 1,2	61,9 $\pm$ 0,6	61,6 $\pm$ 1,1	66,2 $\pm$ 0,5	67,0 $\pm$ 1,0
Waldrestholz, Holzhackschnitzel- masse im Fass in kg	56,6	83,6	85,6	83,6	90,6	93,6
Energierundholz, Wassergehalt in m-%	44,5 $\pm$ 0,6	64,0 $\pm$ 0,7	66,1 $\pm$ 0,8	66,2 $\pm$ 0,7	68,2 $\pm$ 0,6	70,2 $\pm$ 0,3
Energierundholz, Holzhackschnitzel- masse im Fass in kg	55,6	86,6	88,6	88,6	93,6	93,6

Zum Zeitpunkt der Einlagerung waren die Wassergehaltswerte etwas geringer, als bei typischen frischen Waldhackschnitzeln zu erwarten ist [80]. Die Ursache dürfte in der sehr trocken-warmen Witterung im Zeitraum zwischen Durchforstung und Hacken liegen, wodurch die Holzpolter im Wald etwas vorgetrocknet waren. Im Verlauf der Lagerung nahm der Wassergehalt durch Niederschläge und Kondensation bei beiden Sortimenten deutlich zu. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass nur jeweils die oberen 25 cm der Holzhackschnitzelmiete (Deckschicht) beprobt wurden (siehe Unterkapitel 13.3). Die Wassergehalte der Deckschicht lagen in einem typischen Bereich [60]. Die Holzhackschnitzelmiete in den Fässern (220 l) nahm entsprechend den Wassergehalten im Verlauf des Versuchs zu. Der Wassergehalt der Holzhackschnitzel hatte einen großen Einfluss auf die Sickerwassermenge (Abschnitt 13.4.3.1).

### 13.4.2.2 Aschegehalt und Heizwert

Der Aschegehalt wurde nur zu Versuchsbeginn im Juli und zu Versuchsende im Dezember bestimmt, da Erkenntnisse bisheriger Studien nur geringe Veränderungen erwarten ließen [60]. Beide Sortimente wiesen bei Einlagerung einen typischen Aschegehalt für Waldhackschnitzel auf (Tabelle 60). Der Aschegehalt veränderte sich beim Energierundholz über fünf Monate nicht messbar, beim Waldrestholz erhöhte er sich signifikant um 0,7 Prozentpunkte. Der Wert lag damit aber immer noch in einem normalen Bereich für Waldrestholz-hackschnitzel. Die Erhöhung des Aschegehalts könnte in einer verstärkten mikrobiellen Zersetzung und somit einer relativen Zunahme der anorganischen Bestandteile begründet sein.

**Tabelle 60:** *Aschegehalt und Heizwert der Holzhackschnitzel für die Sickerwasser-  
versuche. Aschegehalt: Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung aus jeweils  
fünf Proben. Verschiedene Buchstaben stehen für signifikant ( $p \leq 0,05$ ; t-  
Test) unterschiedliche Gruppen in den Zeilen. Heizwert: Analysen an  
Mischproben ( $n = 1$ ) (wf = wasserfreie Bezugsbasis)*

	Sortiment	Juli (Einlagerung)	Dezember (Versuchsende)
Aschegehalt in m-% (wf)	Waldrestholz	$2,1 \pm 0,4^a$	$2,8 \pm 0,4^b$
	Energierundholz	$0,7 \pm 0,1^a$	$0,7 \pm 0,1^a$
Heizwert in MJ kg <sup>-1</sup> (wf)	Waldrestholz	20 508	20 212
	Energierundholz	20 340	20 239

### 13.4.2.3 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung lag bei beiden Sortimenten in einem typischen Bereich (Abbildung 128) [60] [78] [79]. Die Unterschiede zwischen den Sortimenten im Feinanteil und bei den Überlängen waren überwiegend rohstoffbedingt. Wegen des hohen Nadel- und Feinreisiganteils bei den Waldrestholzpoltern wiesen die Waldrestholzhackschnitzel einen höheren Feinanteil (Partikel  $\leq 3,15$  mm) und einen höheren Anteil an Überlängen (Partikel  $> 100$  mm) auf als die Holzhackschnitzel aus Energierundholz. Zwischen der Einlagerung und der letzten Probenahme kam es bei den Wrh-HS zu einer statistisch signifikanten ( $p \leq 0,05$ , t-Test) Verringerung des Feinanteils von  $17,3 \pm 1,0$  m-% auf  $10,0 \pm 0,9$  m-%. Durch Zersetzungsprozesse wäre eher von einer Erhöhung des Feinanteils auszugehen, wobei auch diese nur schwierig nachweisbar ist [60]. Ursache war deshalb wahrscheinlich vorrangig eine Entmischung beim Aufschütten der Miete, denn bei der Einlagerung wurden die Proben auch aus tieferen Bereichen vom Mietenende gewonnen, bei den folgenden Probenahmen jedoch nur die Deckschicht (äußere ca. 25 cm) abgetragen. Bei den Er-HS war dieser Entmischungseffekt, eventuell wegen des ohnehin geringen Feinanteils, nicht zu beobachten. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung betrug bei den Wrh-HS bei Einlagerung 11,6 mm und bei Auslagerung 14,0 mm. Bei den Energierundholzhackschnitzeln lag der Medianwert bei 11,1 mm (Einlagerung) bzw. 12,2 mm (Auslagerung). Die Ergebnisse der Siebanalyse zeigten, dass die Hauptfraktion ( $\geq 60$  m-%) der Partikel bei den Wrh-HS sowohl bei Ein- und Auslagerung eine Größe von 3,15 mm bis 31,5 mm aufwies, bei den Er-HS 3,15 mm bis 16 mm. Somit konnten die Wrh-HS nach DIN EN ISO 17225-1 [27] mindestens der Klasse P31 und die Er-HS der Klasse P16 zugeordnet werden. Eine Einteilung in die Klasse P31S gemäß DIN EN ISO 17225-4 [28] war bei den Wrh-HS aufgrund der Überschreitung des Feinanteils und der maximalen Partikellänge bei der Einlagerung bzw. eines zu hohen Anteils grober Partikel und der Überschreitung der maximalen Partikellänge bei der Auslagerung nicht möglich. Die Er-HS konnten nach derselben Norm wegen der Überschreitung der maximalen Partikellänge ebenfalls nicht in die Klasse P16S (Ein- und Auslagerung) eingeteilt werden. Somit waren beide Sortimente hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung eher nicht für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet.

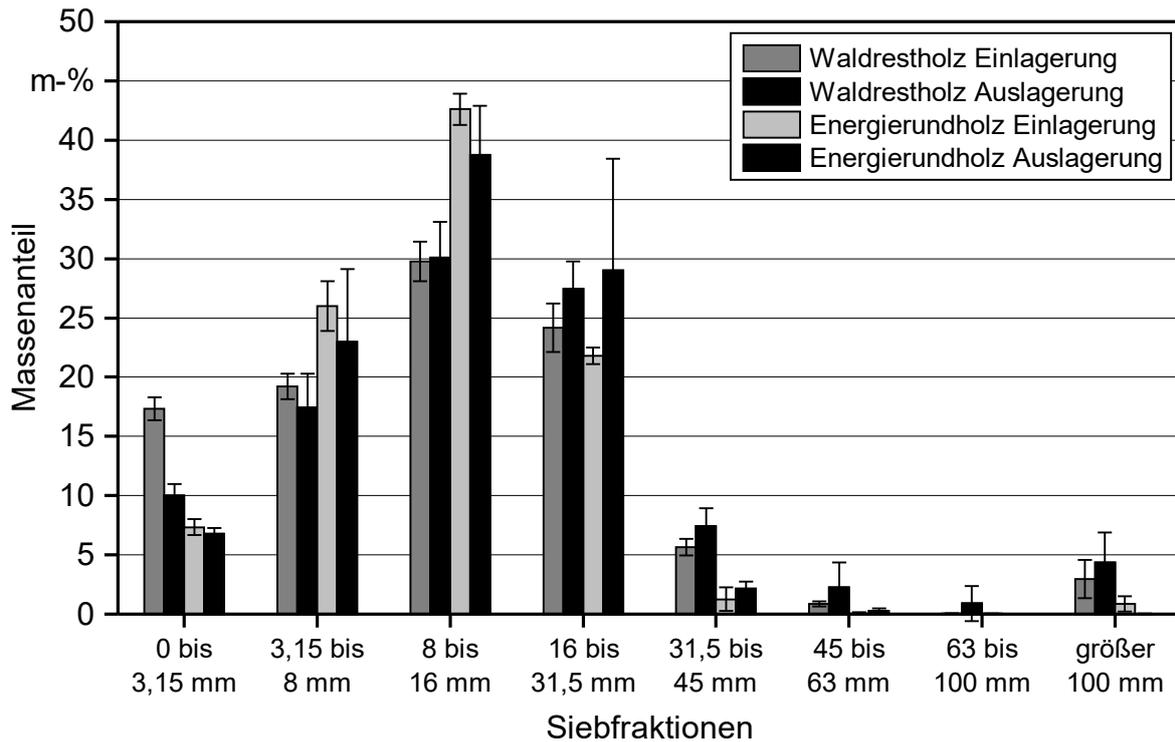


Abbildung 128: Mittlere Partikelgrößenverteilung ( $\pm$  Standardabweichung) der Waldrestholz- und Energierundholzhackschnitzel zum Zeitpunkt der Einlagerung und nach fünf Monaten Lagerungsdauer

#### 13.4.2.4 Element- und Schwermetallgehalt

Die Holzhackschnitzel wurden bei Einlagerung im Juli und zur letzten Sickerwasserbe-  
 probung im Dezember hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung analysiert  
 (Tabelle 61, Tabelle 62, Anhang D). Ziel war in erster Linie zu beurteilen, ob die Holz-  
 hackschnitzel typische Elementkonzentrationen aufweisen oder ob es Auffälligkeiten  
 gibt, die das Sickerwasser beeinflusst haben könnten. Des Weiteren sollte herausgefunden  
 werden, ob die Lagerung im Freien mit der damit verbundenen Exposition (Nieder-  
 schlag etc.) sowie Alterung/Zersetzung nicht nur einen Einfluss auf den Elementgehalt  
 des Sickerwassers, sondern auch einen nachweisbaren Einfluss auf die Inhaltsstoffe der  
 Holzhackschnitzel besaß. Insgesamt waren die Element- und Schwermetallgehalte der  
 Holzhackschnitzelproben sowohl im Vergleich zur Anforderungsnorm DIN EN ISO  
 17225-4 [28] als auch zu einer vorangegangenen Studie zur Holzhackschnitzelqualität in  
 Bayern [40] unauffällig. Einzig bei Chrom wurde der DIN-EN-ISO-Grenzwert in drei Pro-  
 ben bei den Wrh-HS knapp überschritten. Dies könnte auf mehrere Ursachen, die sich  
 womöglich gegenseitig verstärkt haben, zurückzuführen sein. Bei Kiefern und Fichten  
 liegt der Chromgehalt im Derbholz zwischen 0,2 und 0,63 mg kg<sup>-1</sup>, in den Kronen zwi-  
 schen 0,5 und 1,8 mg kg<sup>-1</sup> und in reinen Nadeln zwischen 0,9 und 3,7 mg kg<sup>-1</sup> [40]. Inso-  
 fern kamen die leicht erhöhten Chromkonzentrationen wahrscheinlich nicht vorrangig aus  
 der (Nadel-)Biomasse, sondern auch von anhaftendem Bodenmaterial (Cr-Gehalt ca.  
 60 mg kg<sup>-1</sup>). Eine direkt geogene Ursache war als Hauptgrund jedoch eher unwahr-  
 scheinlich, da die Aschegehalte der Wrh-HS zwar höher waren als die der Er-HS, aber

dennoch nicht auf eine starke Verunreinigung mit Bodenmaterial hinwiesen. Indirekt könnten allerdings auch geringe Bodenanteile in den Wrh-HS zu einem stärkeren Abrieb von den Hackermessern oder Mahlwerkzeugen der Schneidmühle zur Probenaufbereitung geführt haben. Ein Abrieb von den Mahlwerkzeugen zur Probenaufbereitung wurde auch in einer vorherigen Studie als Grund für erhöhte Cr-Gehalte festgestellt [40].

**Tabelle 61:** *Element- und Schwermetallgehalte der Holzhackschnitzelproben (Teil 1) für die Sickerwasserversuche sowie der dazugehörige Grenzwert der Anforderungsnorm DIN EN ISO 17225-4. Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ ) (wasserfreie Bezugsbasis)*

	Arsen in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Blei in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Cadmium in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Chrom in $\mu\text{g kg}^{-1}$
DIN EN ISO 17225-4	$\leq 1000$	$\leq 10\ 000$	$\leq 2000$	$\leq 10\ 000$
Wrh Einlagerung	71,9 $\pm 7,1$	441,2 $\pm 83,7$	8,4 $\pm 1,5$	6921,0 $\pm 1875,7$
Wrh Auslagerung	106,6 $\pm 11,1$	752,3 $\pm 184,3$	12,1 $\pm 1,8$	9241,6 $\pm 3675,5$
Er Einlagerung	28,4 $\pm 9,5$	280,6 $\pm 116,9$	130,0 $\pm 6,7$	1874,2 $\pm 914,2$
Er Auslagerung	39,5 $\pm 2,3$	214,5 $\pm 26,4$	139,5 $\pm 6,3$	1916,4 $\pm 727,4$

**Tabelle 62:** *Element- und Schwermetallgehalte der Holzhackschnitzelproben (Teil 2) für die Sickerwasserversuche sowie der dazugehörige Grenzwert der Anforderungsnorm DIN EN ISO 17225-4. Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung aus jeweils fünf Proben ( $n = 5$ ) (wasserfreie Bezugsbasis)*

	Kupfer in $\text{mg kg}^{-1}$	Nickel in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Quecksilber in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Schwefel in $\text{mg kg}^{-1}$	Zink in $\text{mg kg}^{-1}$
DIN EN ISO 17225-4	$\leq 10$	$\leq 10\ 000$	$\leq 100$	$\leq 1000$	$\leq 100$
Wrh Einlagerung	2,1 $\pm 0,2$	2707,8 $\pm 908,2$	4,3 $\pm 0,7$	285,3 $\pm 44,6$	45,6 $\pm 8,5$
Wrh Auslagerung	2,3 $\pm 0,4$	3572,9 $\pm 1.740,1$	3,7 $\pm 0,4$	360,8 $\pm 54,2$	45,7 $\pm 9,4$
Er Einlagerung	1,1 $\pm 0,1$	721,9 $\pm 359,9$	1,9 $\pm 0,6$	111,3 $\pm 15,4$	23,1 $\pm 3,8$
Er Auslagerung	1,1 $\pm 0,0$	859,6 $\pm 333,0$	1,5 $\pm 0,2$	115,6 $\pm 9,9$	22,1 $\pm 2,9$

Insgesamt zeigten die Veränderungen der Element- und Schwermetallgehalte über die Versuchsdauer von fünf Monaten keinen klaren Trend. Die mittleren Gehalte mancher Elemente veränderten sich kaum (z. B. Cu und Zn), andere nahmen zu (z. B. As und Ni) und andere ab (z. B. Sn und Ru). Somit konnte bei den meisten Elementen kein eindeutiges Auswaschen beobachtet werden. Auch ein Zusammenhang zwischen der Veränderung der Elementkonzentration in den Holzhackschnitzeln und derjenigen im Sickerwasser konnte nur in Einzelfällen, z. B. bei Kalium, beobachtet werden (siehe Anhang D). Ursächlich für die fehlenden Trends und Zusammenhänge dürften die ohnehin sehr geringen Konzentrationen gewesen sein, wodurch Unsicherheiten, z. B. bei der Beprobung und Messung, mögliche kleine Effekte wahrscheinlich überlagerten. Dies spiegelte sich auch in den teils relativ großen Standardabweichungen wider.

### 13.4.3 Sickerwasser

Die Ergebnisse der Analyse des Sickerwassers aus künstlich berechneten Holzhackschnitzeln der Deckschicht werden in diesem Kapitel dargestellt und diskutiert. Die Sauerstoffmessungen in der Luft der Deckschicht der Holzhackschnitzelmieten, die Aufschluss über eine mögliche Verfälschung der Messwerte bei der Probengewinnung geben sollten, ergaben bis in eine Tiefe von 1 m immer Werte zwischen 20,2 Vol.-% und 20,9 Vol.-%. Insofern bestand zu keinem Zeitpunkt die Gefahr einer ungewollten Elementmobilisierung durch Aufhebung eines anaeroben Lagerungszustands bei der Probenahme (siehe Unterkapitel 13.3). Die Auswertung der Nullproben (unbefüllt berechnetes Fass) ergab, dass auch hinsichtlich der beim Versuchsaufbau verwendeten Materialien mit keinem nennenswerten Einfluss auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung des Sickerwassers zu rechnen war. Insgesamt fielen während des Versuchszeitraums von fünf Monaten 107 Sickerwasserproben (exkl. Nullproben) an. Allerdings reichte das Probenvolumen nicht bei allen Proben zur Bestimmung des chemischen und biologischen Sauerstoffbedarfs aus. Alle anderen Parameter konnten jedoch auch bei den Proben mit geringer Sickerwassermenge analysiert werden.

#### 13.4.3.1 Sickerwassermenge

Die Sickerwassermenge war sowohl abhängig von der Berechnungsintensität als auch vom Wassergehalt der Holzhackschnitzel (Tabelle 63). Zum Zeitpunkt der Einlagerung fiel die kleinste Sickerwassermenge an, da der Wassergehalt bei beiden Sortimenten mit unter 45 m-% relativ gering im Vergleich zu frischen Waldhackschnitzeln war (Abschnitt 13.4.2.1). Hier wurde bei der schwachen Berechnung sogar die komplette Wassermenge von den Holzhackschnitzeln zurückgehalten. Die geringste Rückhaltequote von 15,3 % wurde hingegen bei den Wrh-HS während der letzten Beprobung im Dezember gemessen, als bei einem Fass von 9200 ml Berechnungswasser 7795,4 ml wieder als Sickerwasser austraten. Der Wassergehalt der Holzhackschnitzel lag zu diesem Zeitpunkt bei  $67,0 \pm 1,0$  m-%.

**Tabelle 63:** Sickerwassermenge bei der künstlichen Beregnung von Waldhackschnitzeln in 220-l-Fässern. Schwache Beregnung: 2,3 l; starke Beregnung: 9,2 l. Die Beregnungsdauer betrug eine Stunde, die Nachtropfdauer ebenfalls. Probenanzahl:  $0 \leq n \leq 5$ . Mengenangaben in ml

Sortiment, Beregnung	Juli (Einlagerung)	August	September	Oktober	November	Dezember (Versuchsende)
Waldrestholz, schwache Beregnung	0,0	0,0 bis 218,9	0,0 bis 288,5	0,0 bis 213,5	156,2 bis 379,2	490,0 bis 1130,1
Waldrestholz, starke Beregnung	1410,2 bis 2494,1	4813,7 bis 5391,2	3859,0 bis 4431,3	2888,5 bis 4015,8	4081,3 bis 5128,3	6144,4 bis 7795,4
Energierundholz, schwache Beregnung	0,0	576,3 bis 1161,2	43,4 bis 613,7	75,0 bis 815,2	488,9 bis 1014,0	333,3 bis 906,7
Energierundholz, starke Beregnung	923,9 bis 1871,1	5280,0 bis 5857,0	4722,4 bis 5768,7	4590,5 bis 6077,6	5924,0 bis 7042,4	4555,9 bis 6310,2

Bei der Untersuchung der Sickerwassermenge konnten keine klaren Unterschiede zwischen den Sortimenten nachgewiesen werden. Die Energierundholzhackschnitzel hatten zwar von Probenahme zwei bis fünf sowohl bei der schwachen als auch bei der starken Beregnung ein geringeres Rückhaltevermögen als die Waldrestholzhackschnitzel, allerdings bei diesen Probenahmen auch einen etwas höheren Wassergehalt. Offensichtlich hat der größere Feinanteil bei den Waldrestholzhackschnitzeln keinen deutlichen Puffereffekt, obwohl der Feinanteil einerseits die Zwischenräume zwischen den Holzhackschnitzeln verstopfen und andererseits eine große relative Oberfläche und somit Aufnahmekapazität für Wasser besitzen könnte. Die Spannweite der Sickerwassermengen war teilweise auch innerhalb der Varianten relativ groß, obwohl die Beregnungsmenge identisch war und alle Fässer gleich befüllt wurden. Trotz gleicher Behandlung waren die Holzhackschnitzel in den Fässern offenbar nicht immer einheitlich orientiert bzw. angeordnet und dementsprechend die Durchflusswege des Sickerwassers zwischen den Holzhackschnitzeln relativ variabel. Die Beregnungs- und indirekt auch die Sickerwassermenge hatten jedoch im Vergleich zur Lagerungsdauer ohnehin keinen großen Einfluss auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung des Sickerwassers (siehe Abschnitt 13.4.3.2). Die Rückhaltequoten aus diesem Versuch sind wie zu erwarten nur bedingt auf die Lagerungspraxis übertragbar. Die Höhe des durchsickerten Holzhackschnitzelkörpers betrug bei den Fässern ca. 85 cm, bei einer Freilandmiete liegt diese jedoch zwischen annähernd 0 cm (Mietenbasis) und über 400 cm (Länge der Deckschicht, abhängig von Mietenhöhe). Des Weiteren wurde in diesem Versuch orthogonal zur Holzhackschnitzeloberfläche und bedingt durch die Fassform auch punktueller beregnet, als dies in der Natur der Fall ist. Dennoch können die Ergebnisse wichtige Hinweise auf ei-

nen Zusammenhang zwischen Beregnungsintensität, Holzhackschnitzelwassergehalt, Sortiment und Sickerwasseranfall liefern.

#### 13.4.3.2 Chemischer und biologischer Sauerstoffbedarf, gelöster organischer Kohlenstoff

Der chemische und biologische Sauerstoffbedarf sagt aus, wie viel Sauerstoff zur chemischen Oxidation bzw. zum biotischen Abbau der organischen Fracht im Sickerwasser notwendig wäre. Ein sehr hoher Sauerstoffbedarf könnte zu einem Sauerstoffmangel im empfangenden Gewässer führen. Deshalb ist er ein wichtiger Parameter, u. a. bei der Bewertung von Abwässern.

Der mittlere chemische Sauerstoffbedarf (CSB) des Sickerwassers lag zwischen  $944 \text{ mg l}^{-1}$  und  $5960 \text{ mg l}^{-1}$  (Abbildung 129, Abbildung 130), der absolute Tiefstwert betrug  $880 \text{ mg l}^{-1}$ , der Höchstwert  $6700 \text{ mg l}^{-1}$ . Beim biologischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) lagen die Mittelwerte zwischen  $50 \text{ mg l}^{-1}$  und  $1960 \text{ mg l}^{-1}$  (Abbildung 131, Abbildung 132), der absolute Tiefstwert bei  $39 \text{ mg l}^{-1}$  und der Höchstwert bei  $2300 \text{ mg l}^{-1}$ . Maßgeblich für die Entstehung eines Sauerstoffbedarfs im Sickerwasser sind verschiedene oxidierbare, organische Kohlenstoffverbindungen (Harze, Terpene, Fette, Zucker etc.), die aus den Holzhackschnitzeln ausgewaschen werden. Die mittleren Konzentrationen des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) lagen zwischen  $165 \text{ mg l}^{-1}$  und  $1780 \text{ mg l}^{-1}$  (Abbildung 133, Abbildung 134), die absoluten Tief- und Höchstwerte betragen  $28 \text{ mg l}^{-1}$  bzw.  $2013 \text{ mg l}^{-1}$ .

Aufgrund der engen Beziehung zwischen den drei Parametern waren auch deren Verläufe sehr ähnlich. Zum Zeitpunkt der Einlagerung wurden jeweils die höchsten Werte gemessen. Bereits nach einem Monat Lagerung kam es zu einer deutlichen Absenkung der Konzentrationen und spätestens nach zwei Monaten zu einem Einpendeln auf einem im Vergleich zur Einlagerung ca. vier- (CSB, Er-HS) bis zwanzigfach (BSB<sub>5</sub>, Wrh-HS) niedrigerem Niveau. Die schnelle Konzentrationsminderung kann damit begründet werden, dass durch den Hackvorgang unmittelbar vor der Einlagerung frische Holzoberflächen aus angeschnittenen Holzzellen mit vielen leicht löslichen Inhaltsstoffen entstanden. Diese wurden dann bereits innerhalb der ersten Wochen stark ausgewaschen. Die Nachlieferung organischer Kohlenstoffverbindungen durch z. B. Zersetzung der Hackschnitzel hatte eine wesentlich geringere Auswirkung auf CSB, BSB<sub>5</sub> und DOC.

Meistens waren die Konzentrationen bei der schwachen Beregnung etwas höher als bei der starken Beregnung. Ursächlich hierfür waren vermutlich eine längere Verweildauer des Sickerwassers in den Holzhackschnitzeln und somit eine intensivere Anreicherung. Bei den Versuchen mit schwacher Beregnung begann die Sickerwasserspende deutlich später (ca. 45 min nach Beregnungsbeginn) als bei den Versuchen mit starker Beregnung (nach ca. 15 min).

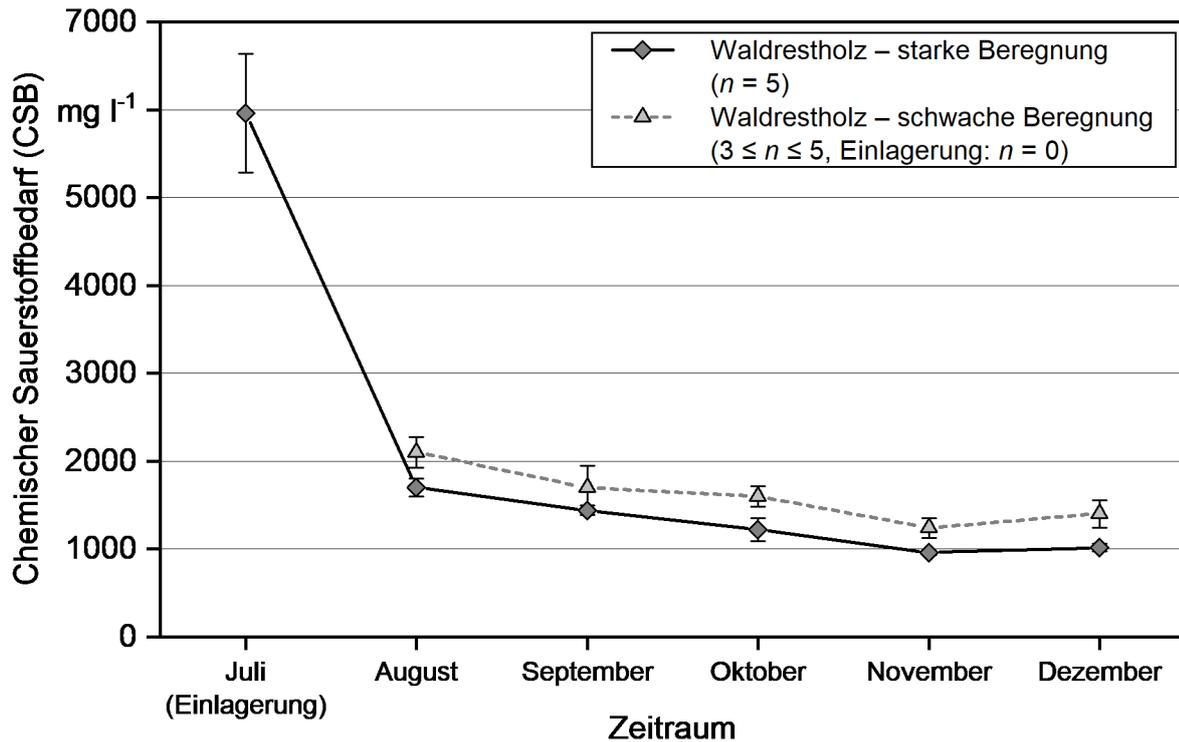


Abbildung 129: Mittlerer chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) des Sickerwassers aus den Waldrestholz hackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

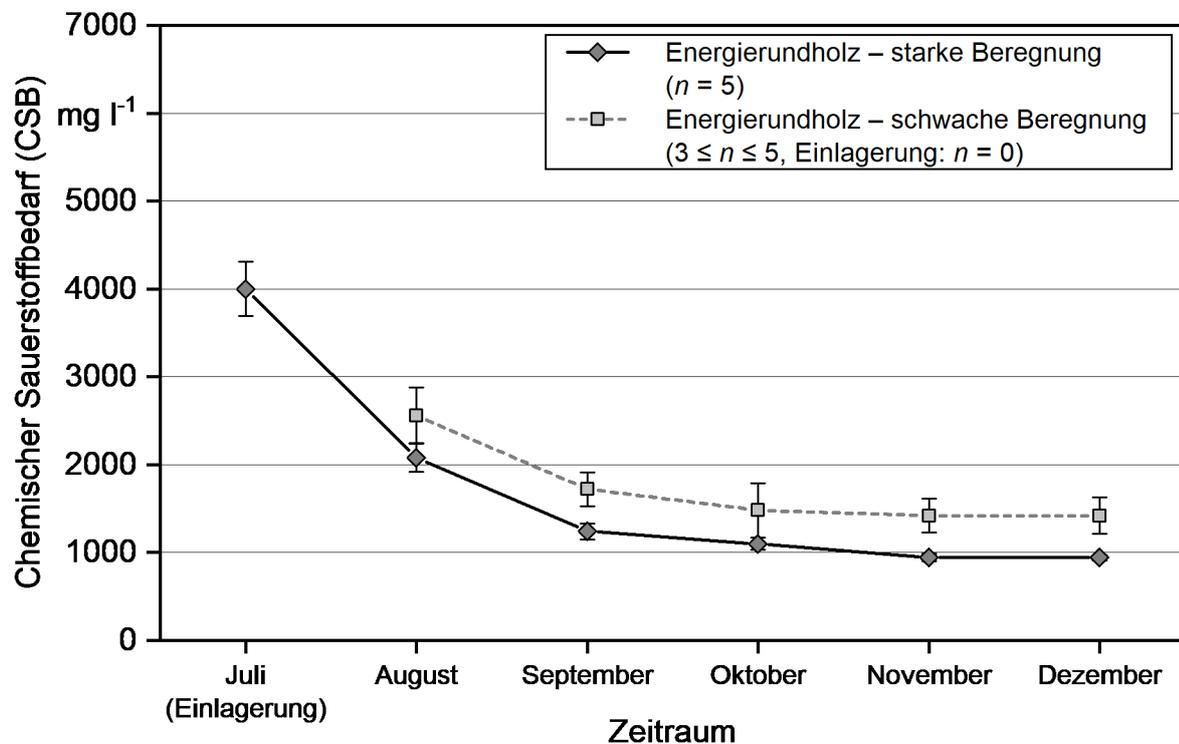


Abbildung 130: Mittlerer chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) des Sickerwassers aus den Energierundholz hackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

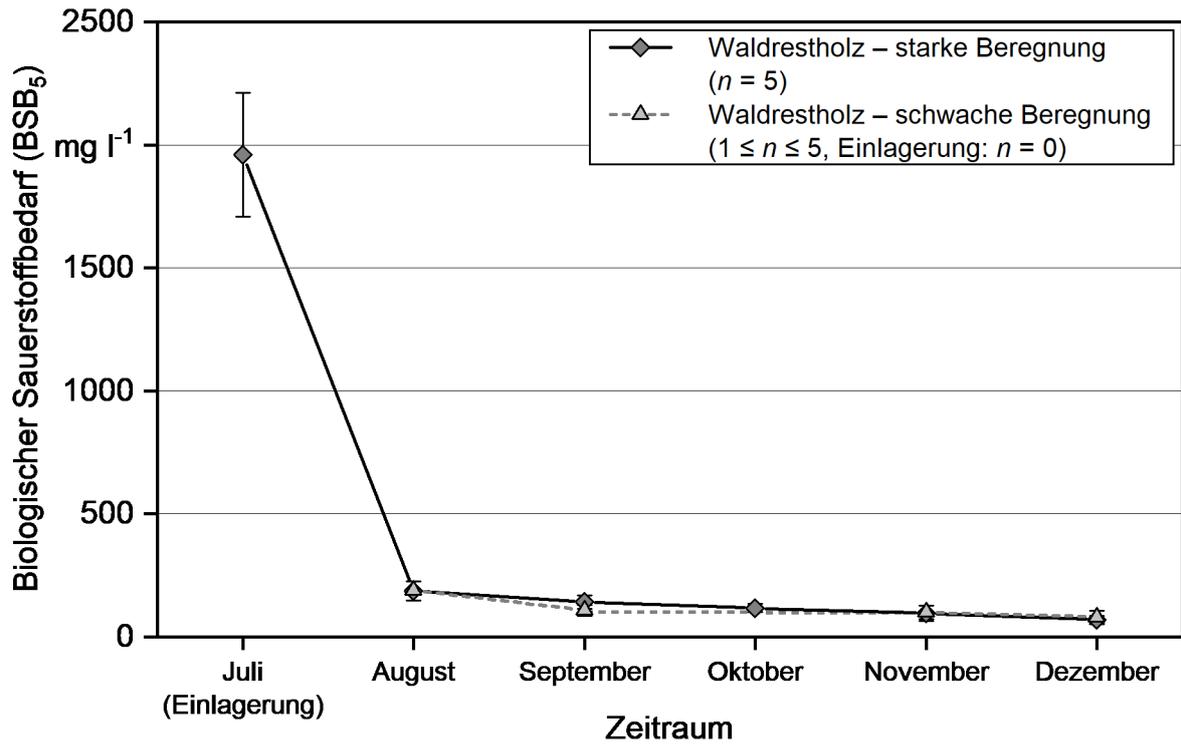


Abbildung 131: Mittlerer biologischer Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) des Sickerwassers aus den Waldrestholzhackschnitzeln (± Standardabweichung)

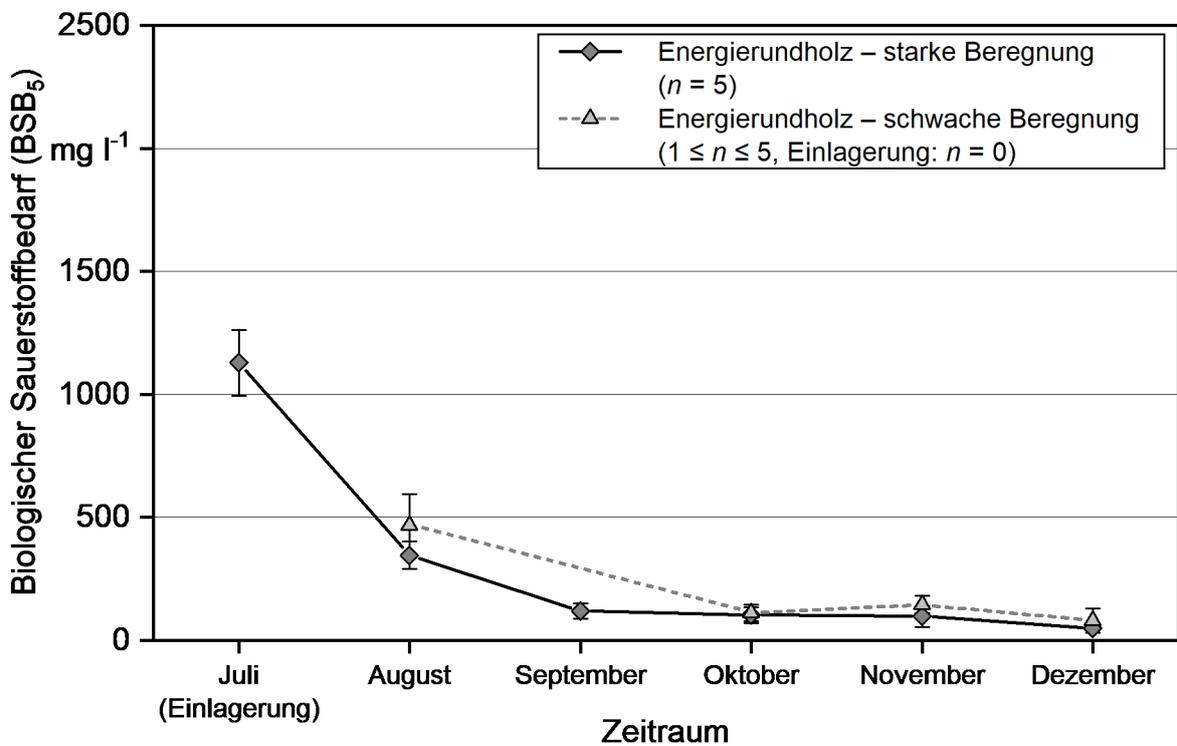


Abbildung 132: Mittlerer biologischer Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) des Sickerwassers aus den Energierundholzhackschnitzeln (± Standardabweichung)

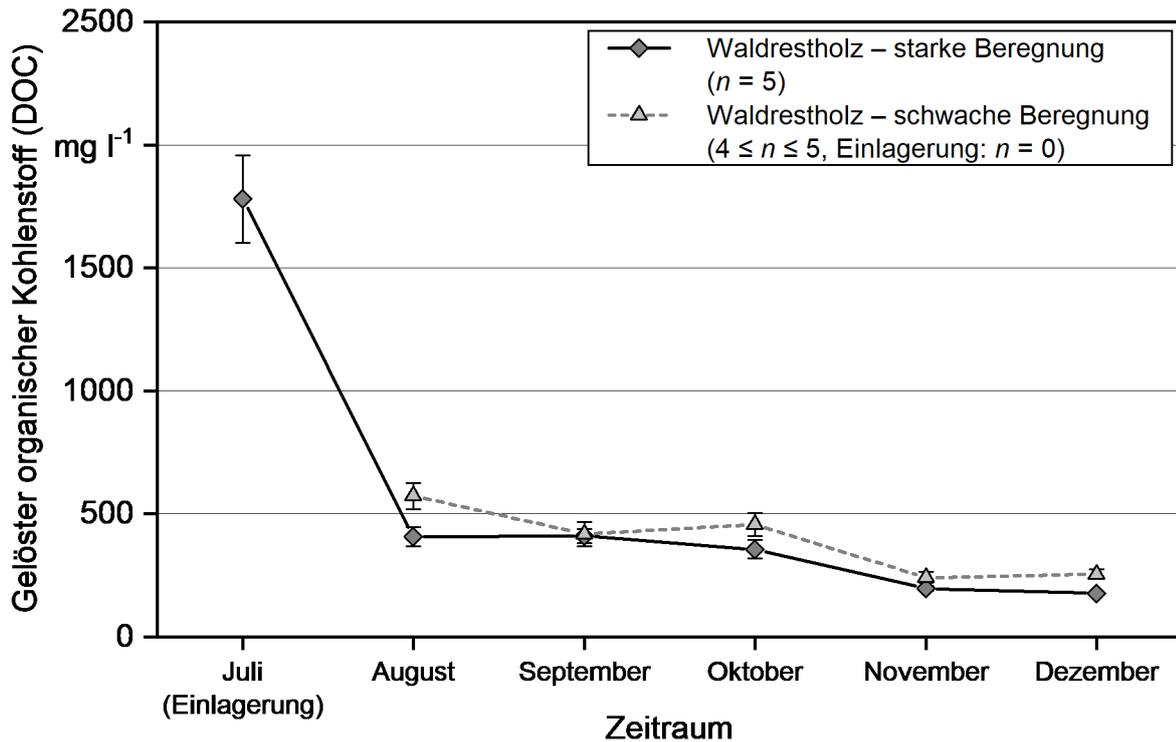


Abbildung 133: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

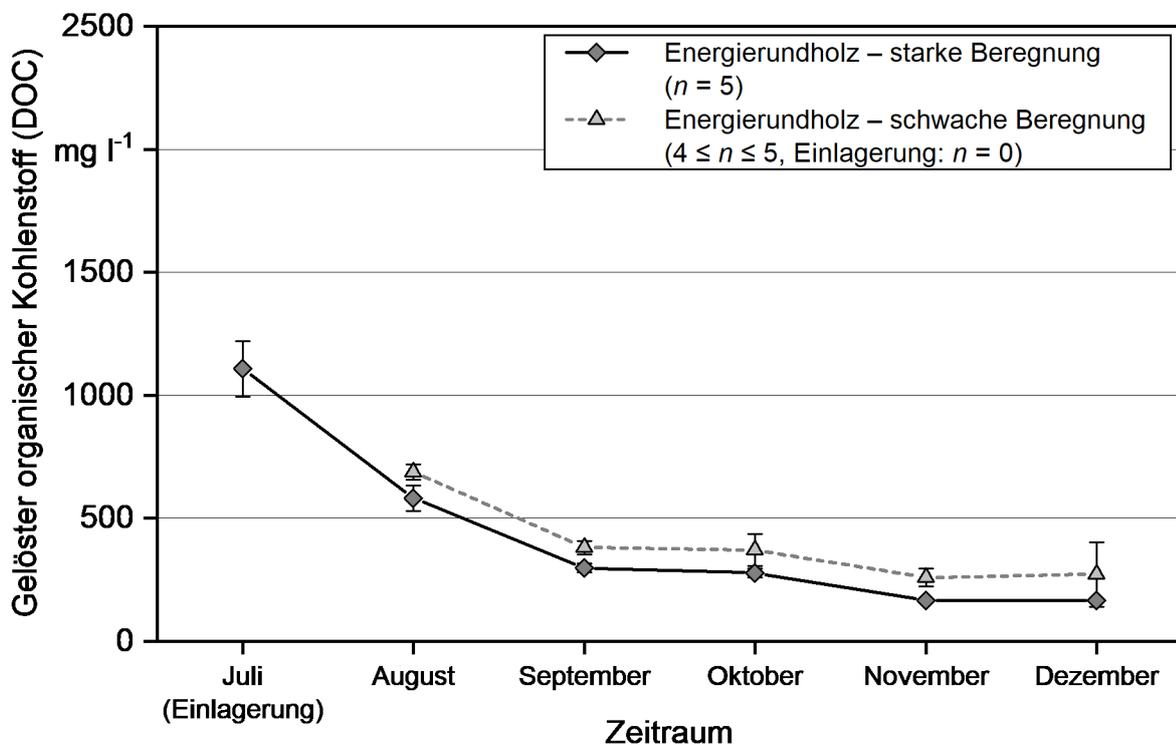


Abbildung 134: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

Der Unterschied zwischen den Sortimenten war gering. Nur bei der Einlagerung traten im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln höhere Werte auf als in dem aus den Energierundholzhackschnitzeln. Wahrscheinlich sind die zunächst höheren Konzentrationen auf den hohen Nadelanteil im Waldrestholz zurückzuführen, denn Nadeln besitzen mit Monoterpenen große Mengen organischer Kohlenstoffverbindungen. Diese verflüchtigten sich allerdings offensichtlich innerhalb der ersten Wochen bzw. wurden rasch ausgewaschen.

Eine rechtsverbindliche Einordnung der CSB- und BSB<sub>5</sub>-Werte ist problematisch, da für Sickerwasser aus Holzhackschnitzeln bisher keine wissenschaftlichen Studien und einschlägige Grenzwerte existieren. Allerdings gilt beim Umweltschutz das Vorsorgeprinzip, bei dem ggf. die Besorgnis einer umweltschädigenden Wirkung ausreicht, um Vorgaben zu erlassen. In einer Mitteilung aus dem Jahr 2000 erstellte die EU-Kommission Vorgaben, wie mit dem Vorsorgeprinzip im Umwelt- und Gesundheitsrecht umzugehen sei. Dabei wird insbesondere auf die hohe politische Verantwortung der Entscheidungsträger verwiesen, die mit der Entscheidung einhergeht, ein für die Gesellschaft „zumutbares“ Risiko zu definieren und einen transparenten Entscheidungsprozess zu finden. Die EU-Kommission verweist ferner darauf, dass im Rahmen der Auslegung eine weite Palette an Maßgaben – von rechtsverbindlichen Vorgaben über Empfehlungen bis hin zu Forschungsprojekten – denkbar ist. Zudem wird bei den Entscheidungen auf die Einhaltung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen, eine Prüfung des Kosten-Nutzen-Effekts sowie auf die Einbeziehung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse verwiesen. Bezüglich der Verhältnismäßigkeit sieht die Kommission vor, dass Maßnahmen auf das angestrebte Schutzniveau und damit auf die Dringlichkeit des Risikos abgestimmt werden müssen.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) schätzte auf Nachfrage Wasserproben als belastet ein, die einen CSB-Wert von ca. 100 bis 300 mg l<sup>-1</sup> bzw. einen BSB<sub>5</sub>-Wert von ca. 20 bis 50 mg l<sup>-1</sup> aufweisen. Diese Werte wurden im Sickerwasser wie in der vorangegangenen Studie auch [103] regelmäßig überschritten. Die vom LfU genannten Werte sind hinsichtlich der Größenordnung vergleichbar mit den Anforderungen an die Wiedereinleitung häuslicher und kommunaler Abwässer. Die Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) gibt für den CSB einen Grenzwert von 150 mg l<sup>-1</sup> und für BSB<sub>5</sub> von 40 mg l<sup>-1</sup> an [16]. Dieser Grenzwert ist zur Beurteilung des Holzhackschnitzelsickerwassers allerdings ungeeignet, denn die Versickerung unterhalb der Hackschnitzelhufwerke ist erstens nicht mit der direkten Einleitung in Oberflächengewässer vergleichbar und zweitens sind die zu erwartenden Sickerwassermengen bei Holzhackschnitzelmieten wesentlich geringer als die Abwassermengen von Kläranlagen. Beispielsweise leitet die Kläranlage Freising jedes Jahr 4,5 Mio. m<sup>3</sup> Abwasser in die Isar, das entspricht konstant 142 l s<sup>-1</sup> [106]. Zudem ist in der Praxis mit einer erheblichen Verdünnung des Sickerwassers durch Niederschlag zu rechnen, bevor es in tiefere bzw. grundwassernahe Bodenschichten sickert, da Sickerwasserereignisse grundsätzlich nur bei mittleren bis starken Regenfällen auftreten (siehe Unterkapitel 13.2). Das Sickerwasser läuft fast ausschließlich innerhalb der Deckschicht ab, somit tritt ein erheblicher Anteil davon an der Mietenbasis aus und wird durch den neben die Miete fallenden Niederschlag umgehend stark verdünnt.

Wie bereits im Teilbericht zum Sickerwasser aus Holzhackschnitzeln vorgeschlagen wurde, sollte zur Bewertung der Umweltrelevanz deshalb vielmehr ein umfassenderer Ansatz unter Einbeziehung von Fracht, Filterwirkung des Bodens, Verdünnungseffekt und Auswirkungen einer potenziell alternativen Nutzungsform der Lagerfläche (Wald, Landwirtschaft) herangezogen werden. Hierauf wird am Ende dieses Kapitels ausführlich eingegangen.

### 13.4.3.3 Stickstoff und Phosphor

Ammoniumstickstoff kann zu einer Bodenversauerung führen und in Gewässern toxisch auf die Wasserlebewesen wirken. Die Konzentration von Ammoniumstickstoff im Sickerwasser folgte keinem klaren Trend (Abbildung 135, Abbildung 136). Bei den Waldrestholzhackschnitzeln waren die Werte zunächst sehr niedrig, stiegen in den ersten zwei Monaten bis auf einen Mittelwert von  $13,1 \text{ mg l}^{-1}$  stark an, um dann wieder auf das Anfangsniveau abzusinken. Beim Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln konnte nahezu kein Ammoniumstickstoff nachgewiesen werden. Ursächlich für die höhere Stickstoffkonzentration könnte wiederum die Nadelmasse des Waldrestholzes mit erhöhten spezifischen Stickstoffgehalten gewesen sein, die aber erst beim Abbau der Nadelmasse freigesetzt wurden. Zieht man den Grenzwert der Abwasserverordnung (Anhang 1) von  $10 \text{ mg l}^{-1}$  Ammoniumstickstoff heran, kam es zu vier Überschreitungen bei insgesamt 107 Proben. Allerdings ist auch hier ein Vergleich problematisch. Eine alternative Nutzung der Lagerfläche als Wald oder gar für landwirtschaftliche Zwecke hätte höhere Stickstoffeinträge zur Folge (siehe Abschnitt 13.4.5).

Phosphor ist wie Stickstoff ein essenzieller Pflanzennährstoff, kann in hohen Konzentrationen jedoch eutrophierend und somit toxisch auf Wasserlebewesen wirken. Die mittleren Phosphorkonzentrationen lagen im Sickerwasser zwischen  $1,1$  und  $8,3 \text{ mg l}^{-1}$  (Abbildung 137, Abbildung 138). Es gab keine klaren Unterschiede zwischen den Sortimenten außer zum Zeitpunkt der Einlagerung, als die Phosphorkonzentration beim Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln deutlich höher war als bei dem Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln. Die Konzentrationen nahmen im Verlauf der Lagerung tendenziell ab. Der Phosphorgrenzwert der AbwV (Anhang 1) von  $2 \text{ mg l}^{-1}$  wurde regelmäßig überschritten. Aber auch hier gelten die schwierige Vergleichbarkeit, die in Unterkapitel 13.5 näher ausgeführt wird, und der Verdünnungseffekt durch Niederschlag.

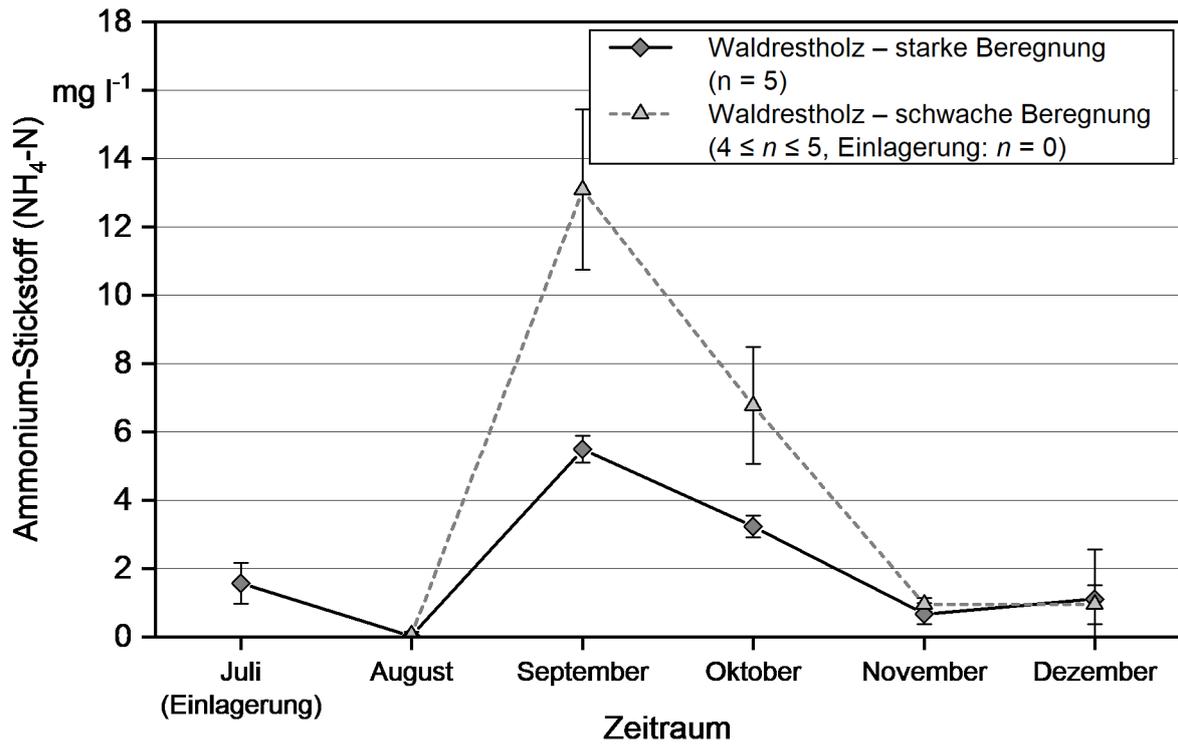


Abbildung 135: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) im Sickerwasser aus den Waldrestholzhackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

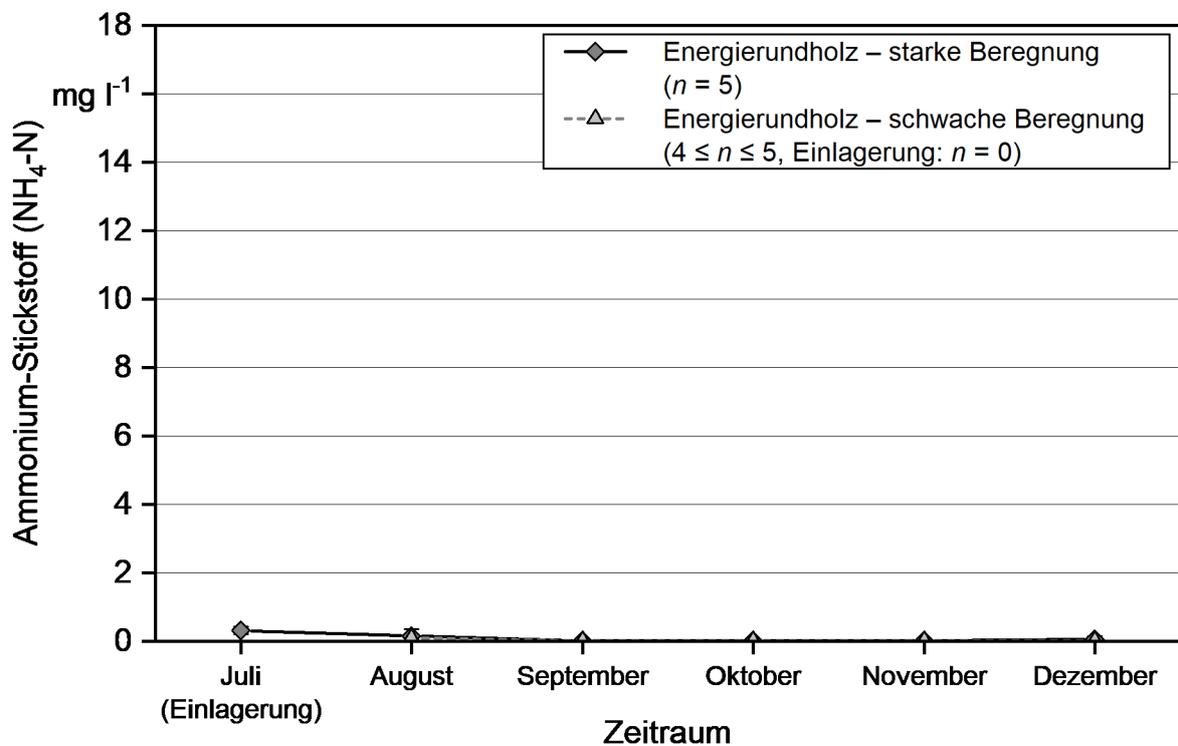


Abbildung 136: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) im Sickerwasser aus den Energierundholzhackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

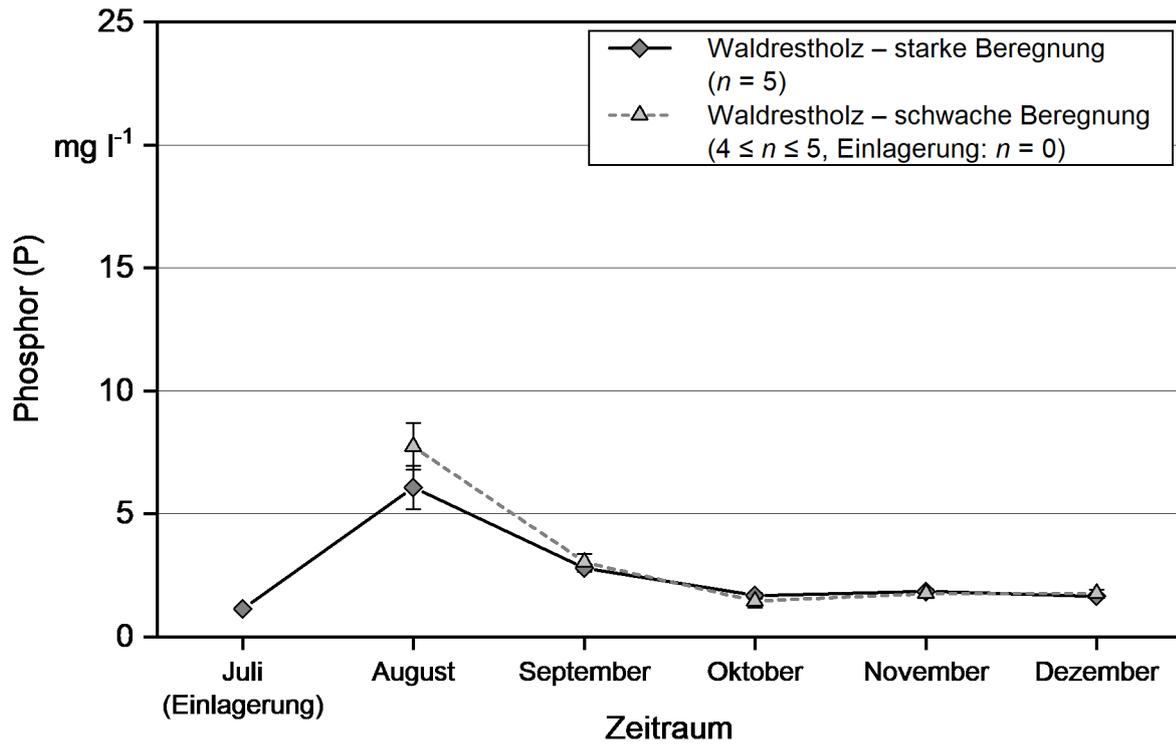


Abbildung 137: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) im Sickerwasser aus den Waldrestholz hackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

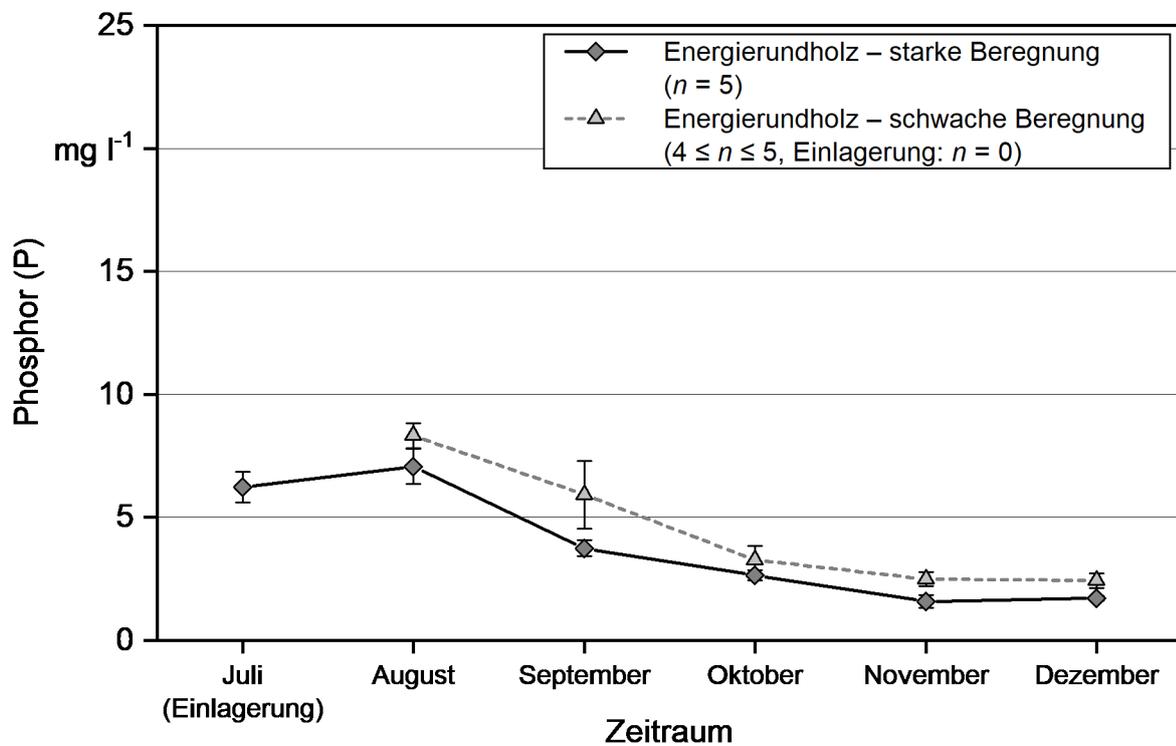


Abbildung 138: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) im Sickerwasser aus den Energierundholz hackschnitzeln ( $\pm$  Standardabweichung)

**13.4.3.4 pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Trockensubstanz**

Der pH-Wert des Sickerwassers lag mit 5,1 bis 7,3 im leicht sauren bis neutralen Bereich (Tabelle 64). Die Nullproben wiesen ebenfalls leicht saure pH-Werte von ca. 6 auf, was auf das verwendete VE-Wasser zurückzuführen ist, das bei Luftkontakt Kohlendioxid aufnimmt. Beim Waldrestholz (starke Beregnung) stieg der pH-Wert zwischen Einlagerung und erster Probenahme etwas an, ansonsten war bei beiden Sortimenten kein Trend über die Lagerdauer zu erkennen. Das Sickerwasser aus Waldrestholzhackschnitzeln hatte einen um etwa eine Einheit höheren pH-Wert als das aus Energierundholzhackschnitzeln. Bei der leichten Beregnung wurden geringfügig höhere Werte als bei der starken gemessen. Der pH-Wert von Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch sollte laut Trinkwasserverordnung (TrinkwV) zwischen 6,5 und 9,5 liegen, wobei die Untergrenze von 6,5 eine korrosive Wirkung des Trinkwassers auf Rohrleitungen ausschließen soll [15]. Bei Trinkwasser zur Abfüllung kann der Mindestwert nach TrinkwV auf 4,5 pH-Einheiten herabgesetzt werden. Alle Sickerwasserproben hielten diese Grenze ein.

*Tabelle 64: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (in  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) der Sickerwasserproben. Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung aus jeweils vier bis fünf Proben ( $4 \leq n \leq 5$ )*

Parameter	Sortiment, Beregnung	Lagerdauer					
		Juli (EI-lagerung)	August	September	Oktober	November	Dezember
pH-Wert	Waldrestholz, schwach	–	7,0 $\pm 0,1$	7,3 $\pm 0,0$	7,2 $\pm 0,2$	6,9 $\pm 0,1$	6,7 $\pm 0,1$
	Waldrestholz, stark	5,1 $\pm 0,0$	6,8 $\pm 0,0$	6,7 $\pm 0,0$	6,8 $\pm 0,0$	6,7 $\pm 0,0$	6,6 $\pm 0,0$
	Energierundholz, schwach	–	5,8 $\pm 0,1$	6,3 $\pm 0,3$	6,0 $\pm 0,3$	5,9 $\pm 0,1$	6,0 $\pm 0,2$
	Energierundholz, stark	6,3 $\pm 0,1$	5,8 $\pm 0,0$	5,7 $\pm 0,0$	5,7 $\pm 0,0$	5,8 $\pm 0,0$	5,7 $\pm 0,0$
Elektrische Leitfähigkeit	Waldrestholz, schwach	–	742,8 $\pm 164,4$	564,8 $\pm 53,4$	493,8 $\pm 42,9$	284,8 $\pm 12,6$	326,2 $\pm 35,3$
	Waldrestholz, stark	919,0 $\pm 86,5$	444,0 $\pm 25,3$	435,8 $\pm 24,6$	379,4 $\pm 17,3$	241,2 $\pm 7,2$	245,4 $\pm 5,1$
	Energierundholz, schwach	–	235,0 $\pm 17,6$	182,6 $\pm 24,9$	161,2 $\pm 53,8$	110,8 $\pm 11,8$	104,6 $\pm 14,7$
	Energierundholz, stark	436,0 $\pm 44,7$	202,4 $\pm 16,1$	131,4 $\pm 6,3$	112,2 $\pm 5,3$	77,8 $\pm 3,5$	74,8 $\pm 3,2$

Die elektrische Leitfähigkeit des Sickerwassers ist ein Indikator für die Menge der darin gelösten Teilchen. Die Werte lagen zwischen 74,8 und 919,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  und somit durchgängig unter dem Grenzwert der TrinkwV von 2790  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Die Konzentration ionoge-

ner Stoffe sank, ähnlich wie bei den organischen Kohlenstoffverbindungen, nach der Einlagerung deutlich ab. Der Wert lag bei Waldrestholzhackschnitzeln höher als bei Energierundholzhackschnitzeln und bei schwacher Beregnung etwas höher als bei starker. Die Ursache dafür dürfte, ebenfalls wie bei den organischen Kohlenstoffverbindungen, in der am Anfang verstärkten Auswaschung und der etwas längeren Verweildauer des Wassers bei schwacher Beregnung begründet sein.

Ein weiterer Anhaltspunkt für die Verunreinigung des Sickerwassers kann dessen Trockenmasseanteil sein. Um auf die Trockenmasseanteile des Sickerwassers schließen zu können, wurden ca. 500 ml Sickerwasser aus beiden Sortimenten bei 105 °C im Trockenschrank verdunstet. Zuvor wurde das Sickerwasser mit einer Beschleunigung von 5236 g 15 Minuten lang zentrifugiert, um die schwereren Partikel von den Schwebstoffen abzuscheiden. Der Gesamtanteil der Trockenmasse betrug beim Waldrestholzsickerwasser 0,08 %, beim Energierundholzsickerwasser 0,07 %. Der Anteil der Schwebstoff-Trockenmasse an der Gesamttrockenmasse betrug beim Waldrestholz 84,9 %, beim Energierundholz 74,5 %. Zusätzlich wurde der Glührückstand der Schwebstoff-Trockenmasse ermittelt, um den organischen Anteil bestimmen zu können. Hierzu wurde die Schwebstoff-Trockenmasse bei 500 °C für 24 h in einem Muffelofen erhitzt. Der Glührückstand (anorganischer Teil) betrug beim Waldrestholz 40,4 %, beim Energierundholz 21,9 %. Somit ist ein Großteil der Trockenmasse im Sickerwasser organischen Ursprungs, wahrscheinlich handelt es sich dabei um organische Kohlenstoffverbindungen. Insgesamt ist bei diesen geringen Trockenmasseanteilen in Verbindung mit der geringen Fracht mit keiner Verringerung der Durchlässigkeit (Kolmation) des Bodengerüsts im Falle einer Versickerung zu rechnen, zumal die Bodenlebewesen organische Kohlenstoffverbindungen sehr gut abbauen (siehe Abschnitt 13.4.4).

#### 13.4.3.5 Schwermetalle und Spurenelemente

Die gemessenen Konzentrationen an Schwermetallen und Spurenelementen waren im Vergleich zu den Nullproben (unbefüllt beregnetes Fass) erhöht. Allerdings existieren hierfür ebenfalls keine anwendbaren Grenzwerte, weshalb eine Bewertung nur eingeschränkt möglich ist.

Sofern die Möglichkeit der Einwaschung von Sickerwasser in Oberflächengewässer oder der Beeinflussung von Trinkwasserfassungsbereichen besteht, könnten für die Elemente Quecksilber, Cadmium, Chrom, Nickel, Blei und Kupfer die Schwellenwerte aus dem Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz – AbwAG) herangezogen werden [17]. Diese wurden nie überschritten. Auch bei Chrom lagen die Werte trotz des vergleichsweise relativ hohen Chromgehalts der Holzhackschnitzelproben weit unter dem zulässigen Grenzwert von 50 µg l<sup>-1</sup>, was die Annahme einer nachträglichen Chromkontamination der Holzhackschnitzelproben durch die Werkzeuge der Schneidmühle bei der Probenaufbereitung bekräftigte.

**Tabelle 65:** Analysewerte der Elemente, für die Vergleichswerte (Grenzwerte) im Abwasserabgabengesetz (AbwAG) existieren (Teil 1): Quecksilber, Cadmium, Chrom und Nickel (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis)

Parameter	Sortiment, Beregnung	Juli (Einlagerung)					
		August	September	Oktober	November	Dezember	
Quecksilber in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	0,07 $\pm 0,02$	0,08 $\pm 0,02$	0,07 $\pm 0,01$	0,04 $\pm 0,01$	0,05 $\pm 0,01$
	Waldrestholz, stark	0,05 $\pm 0,00$	0,04 $\pm 0,01$	0,05 $\pm 0,01$	0,05 $\pm 0,01$	0,03 $\pm 0,01$	0,04 $\pm 0,00$
	Energierundholz, schwach	–	0,02 $\pm 0,01$	0,02 $\pm 0,00$	0,02 $\pm 0,01$	0,02 $\pm 0,01$	0,03 $\pm 0,01$
	Energierundholz, stark	0,02 $\pm 0,00$	0,01 $\pm 0,00$	0,02 $\pm 0,01$	0,01 $\pm 0,00$	0,02 $\pm 0,00$	0,02 $\pm 0,00$
Cadmium in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	0,07 $\pm 0,09$	0,06 $\pm 0,02$	0,10 $\pm 0,01$	0,07 $\pm 0,01$	0,13 $\pm 0,03$
	Waldrestholz, stark	0,10 $\pm 0,01$	0,04 $\pm 0,01$	0,12 $\pm 0,01$	0,14 $\pm 0,01$	0,08 $\pm 0,01$	0,11 $\pm 0,02$
	Energierundholz, schwach	–	0,33 $\pm 0,32$	0,79 $\pm 0,08$	0,85 $\pm 0,17$	0,61 $\pm 0,10$	0,69 $\pm 0,19$
	Energierundholz, stark	1,43 $\pm 0,19$	0,47 $\pm 0,33$	0,72 $\pm 0,04$	0,85 $\pm 0,07$	0,52 $\pm 0,13$	0,60 $\pm 0,04$
Chrom in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	3,03 $\pm 1,47$	0,37 $\pm 0,27$	0,17 $\pm 0,16$	0,00 $\pm 0,00$	1,28 $\pm 0,53$
	Waldrestholz, stark	3,09 $\pm 0,30$	0,22 $\pm 0,08$	0,45 $\pm 0,16$	0,28 $\pm 0,17$	0,01 $\pm 0,01$	0,66 $\pm 0,11$
	Energierundholz, schwach	–	0,82 $\pm 0,15$	0,42 $\pm 0,41$	0,15 $\pm 0,14$	0,20 $\pm 0,43$	0,64 $\pm 0,23$
	Energierundholz, stark	1,62 $\pm 0,34$	0,65 $\pm 0,27$	0,26 $\pm 0,11$	0,03 $\pm 0,05$	0,00 $\pm 0,00$	0,59 $\pm 0,32$
Nickel in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	2,78 $\pm 4,23$	1,83 $\pm 1,31$	1,69 $\pm 0,85$	1,15 $\pm 0,42$	2,21 $\pm 1,40$
	Waldrestholz, stark	4,11 $\pm 0,57$	1,32 $\pm 0,13$	1,34 $\pm 0,19$	1,45 $\pm 0,71$	1,03 $\pm 0,34$	1,38 $\pm 0,29$
	Energierundholz, schwach	–	2,85 $\pm 0,32$	3,05 $\pm 0,91$	2,63 $\pm 0,86$	1,66 $\pm 0,29$	6,28 $\pm 5,99$
	Energierundholz, stark	10,09 $\pm 1,26$	2,26 $\pm 0,37$	6,04 $\pm 9,39$	1,76 $\pm 0,25$	1,63 $\pm 0,52$	7,13 $\pm 9,54$

**Tabelle 66:** Analysewerte der Elemente, für die Vergleichswerte (Grenzwerte) im Abwasserabgabengesetz (AbwAG) existieren (Teil 2): Blei und Kupfer (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis)

Parameter	Sortiment, Beregnung	Juli (Einlagerung)					
		August	September	Oktober	November	Dezember	
Blei in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	2,98 $\pm 1,91$	1,45 $\pm 0,24$	2,08 $\pm 0,32$	1,50 $\pm 0,13$	1,35 $\pm 0,11$
	Waldrestholz, stark	2,43 $\pm 0,20$	1,29 $\pm 0,07$	1,73 $\pm 0,15$	1,80 $\pm 0,21$	1,14 $\pm 0,14$	0,96 $\pm 0,07$
	Energierundholz, schwach	–	0,90 $\pm 0,14$	1,87 $\pm 0,35$	2,01 $\pm 0,31$	1,45 $\pm 0,24$	1,68 $\pm 0,26$
	Energierundholz, stark	3,56 $\pm 0,39$	0,83 $\pm 0,22$	1,41 $\pm 0,15$	1,79 $\pm 0,22$	1,25 $\pm 0,37$	1,30 $\pm 0,13$
Kupfer in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	21,87 $\pm 12,51$	13,52 $\pm 1,84$	13,66 $\pm 1,22$	7,99 $\pm 0,92$	7,87 $\pm 1,30$
	Waldrestholz, stark	20,46 $\pm 1,69$	7,26 $\pm 0,47$	10,87 $\pm 0,87$	10,20 $\pm 1,24$	6,37 $\pm 0,52$	5,82 $\pm 0,39$
	Energierundholz, schwach	–	4,46 $\pm 1,80$	11,13 $\pm 1,36$	9,57 $\pm 0,99$	8,09 $\pm 1,33$	7,07 $\pm 1,70$
	Energierundholz, stark	9,02 $\pm 1,06$	2,86 $\pm 0,41$	6,16 $\pm 1,25$	6,72 $\pm 0,76$	6,01 $\pm 0,61$	6,54 $\pm 0,63$

Für die weiteren Elemente Antimon, Arsen, Kobalt, Molybdän, Selen, Zink und Zinn sind in Anhang 2 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfads Boden–Grundwasser aufgeführt [21]. Diese betreffen die Auswaschung der genannten Elemente aus dem Boden in das Grundwasser. Die Prüfwerte sind nur sehr eingeschränkt für die Beurteilung von Sickerwasser aus Holzhackschnitzeln geeignet. Für die Grenzwerte nach BBodSchV ist der Übergang von der ungesättigten in die gesättigte Grundwasserzone relevant. Die Messwerte der Sickerwasserversuche in dieser Studie betrachten jedoch die Messwerte zum Zeitpunkt des Austritts aus dem Hackschnitzelhaufwerk und damit vor Eintritt in die oberste Bodenschicht. Das Sickerwasser passiert demnach bis zum Übergang ins Grundwasser noch den Boden und unterliegt damit Umbau- und Verdünnungsprozessen und wird gefiltert (siehe Abschnitt 13.4.4). In Bezug auf die Grenzwerte der BBodSchV gab es einzig für das Element Zink (Prüfwert  $500 \mu\text{g l}^{-1}$ ) Überschreitungen (in 76 von 107 Fällen; Maximum:  $1888 \mu\text{g l}^{-1}$ ). Die Nullproben zeigten keine auffälligen Werte, sodass eine Kontamination durch den Versuchsaufbau ausgeschlossen werden konnte. Auch die Hackschnitzelproben waren zumindest gemäß der Anforderungsnorm DIN EN ISO 17225-4 (Maximalwert  $56,3 \text{ mg kg}^{-1}$  bei Grenzwert  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) unauffällig. Dennoch dürften die gemessenen Zinkkonzentrationen eine Folge der Auswaschung aus den Holzhackschnitzeln gewesen sein. Dies wurde ebenfalls bereits im Vorgängerprojekt beobachtet. Allerdings muss auch hier die puffernde und filternde Wirkung des Bodens berücksichtigt

werden. Zudem gelangt das Sickerwasser normalerweise durch Niederschlag stark verdünnt in den Boden oder wird in der obersten Bodenschicht entsprechend verdünnt.

**Tabelle 67:** Analysewerte weiterer Elemente, für die Vergleichswerte (Prüfwerte) in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) existieren (Teil 1): Antimon, Arsen, Kobalt und Molybdän (Mittelwert ± Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis)

Parameter	Sortiment, Beregnung	Juli (Einlagerung)					
		August	September	Oktober	November	Dezember	
Antimon in µg l <sup>-1</sup>	Waldrestholz, schwach	–	0,60 ± 0,50	0,83 ± 0,07	0,69 ± 0,15	0,17 ± 0,04	0,15 ± 0,03
	Waldrestholz, stark	0,64 ± 0,60	0,17 ± 0,03	0,23 ± 0,04	0,29 ± 0,09	0,14 ± 0,04	0,20 ± 0,01
	Energierundholz, schwach	–	0,47 ± 0,30	0,80 ± 0,49	0,45 ± 0,19	0,26 ± 0,24	0,07 ± 0,01
	Energierundholz, stark	0,30 ± 0,29	0,45 ± 0,52	0,09 ± 0,02	0,17 ± 0,12	0,19 ± 0,23	0,07 ± 0,03
Arsen in µg l <sup>-1</sup>	Waldrestholz, schwach	–	1,04 ± 0,19	0,72 ± 0,23	0,67 ± 0,05	0,37 ± 0,03	0,45 ± 0,15
	Waldrestholz, stark	1,22 ± 0,18	0,71 ± 0,10	0,80 ± 0,07	0,59 ± 0,12	0,32 ± 0,06	0,40 ± 0,19
	Energierundholz, schwach	–	0,92 ± 0,06	0,50 ± 0,06	0,24 ± 0,10	0,18 ± 0,04	0,26 ± 0,15
	Energierundholz, stark	0,62 ± 0,07	0,93 ± 0,15	0,39 ± 0,10	0,30 ± 0,08	0,11 ± 0,04	0,19 ± 0,11
Kobalt in µg l <sup>-1</sup>	Waldrestholz, schwach	–	0,07 ± 0,03	0,04 ± 0,04	0,09 ± 0,09	0,19 ± 0,02	0,24 ± 0,05
	Waldrestholz, stark	0,98 ± 0,10	0,11 ± 0,01	0,19 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,15 ± 0,00	0,15 ± 0,01
	Energierundholz, schwach	–	0,86 ± 0,07	0,43 ± 0,09	0,54 ± 0,10	0,59 ± 0,10	0,45 ± 0,11
	Energierundholz, stark	3,22 ± 0,50	0,68 ± 0,13	0,35 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,40 ± 0,05	0,33 ± 0,02
Molybdän in µg l <sup>-1</sup>	Waldrestholz, schwach	–	0,44 ± 0,34	0,28 ± 0,06	0,17 ± 0,12	0,24 ± 0,10	0,31 ± 0,06
	Waldrestholz, stark	0,34 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,16 ± 0,06	0,25 ± 0,18	0,19 ± 0,03	0,38 ± 0,01
	Energierundholz, schwach	–	0,11 ± 0,07	0,06 ± 0,03	0,00 ± 0,00	0,10 ± 0,02	0,09 ± 0,03
	Energierundholz, stark	0,09 ± 0,01	0,05 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,00 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,09 ± 0,02

**Tabelle 68:** Analysewerte weiterer Elemente, für die Vergleichswerte (Prüfwerte) in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) existieren (Teil 2): Selen, Zink und Zinn (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Bezugsbasis)

Parameter	Sortiment, Beregnung	Juli (Einlagerung)					
		August	September	Oktober	November	Dezember	
Selen in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	0,51 $\pm 0,03$	0,63 $\pm 0,16$	0,62 $\pm 0,11$	0,18 $\pm 0,05$	0,37 $\pm 0,15$
	Waldrestholz, stark	1,17 $\pm 0,32$	0,32 $\pm 0,06$	0,53 $\pm 0,08$	0,46 $\pm 0,09$	0,20 $\pm 0,07$	0,19 $\pm 0,08$
	Energierundholz, schwach	–	0,24 $\pm 0,05$	0,33 $\pm 0,11$	0,33 $\pm 0,12$	0,10 $\pm 0,00$	0,29 $\pm 0,14$
	Energierundholz, stark	0,18 $\pm 0,04$	0,12 $\pm 0,03$	0,22 $\pm 0,05$	0,26 $\pm 0,08$	0,16 $\pm 0,10$	0,20 $\pm 0,06$
Zink in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	631,0 $\pm 289,6$	463,5 $\pm 93,7$	560,7 $\pm 64,8$	589,8 $\pm 92,7$	612,8 $\pm 78,8$
	Waldrestholz, stark	695,2 $\pm 39,8$	222,3 $\pm 19,3$	394,0 $\pm 19,8$	644,6 $\pm 116,2$	577,6 $\pm 127,6$	493,4 $\pm 104,9$
	Energierundholz, schwach	–	261,2 $\pm 119,2$	1622,8 $\pm 229,2$	1054,3 $\pm 147,8$	970,1 $\pm 123,1$	1346,2 $\pm 539,4$
	Energierundholz, stark	484,9 $\pm 96,0$	178,9 $\pm 55,8$	1136,1 $\pm 367,0$	1180,2 $\pm 248,0$	1067,2 $\pm 123,0$	1089,2 $\pm 86,5$
Zinn in $\mu\text{g l}^{-1}$	Waldrestholz, schwach	–	0,35 $\pm 0,22$	0,08 $\pm 0,04$	0,09 $\pm 0,06$	0,16 $\pm 0,02$	0,16 $\pm 0,04$
	Waldrestholz, stark	0,18 $\pm 0,02$	0,17 $\pm 0,01$	0,15 $\pm 0,02$	0,13 $\pm 0,02$	0,15 $\pm 0,11$	0,16 $\pm 0,04$
	Energierundholz, schwach	–	0,20 $\pm 0,05$	0,07 $\pm 0,11$	0,13 $\pm 0,07$	0,11 $\pm 0,02$	0,06 $\pm 0,02$
	Energierundholz, stark	0,10 $\pm 0,04$	0,16 $\pm 0,05$	0,07 $\pm 0,01$	0,02 $\pm 0,02$	0,08 $\pm 0,03$	0,12 $\pm 0,04$

Auch bei den anderen untersuchten Elementen wurden im Vergleich zu den Nullproben teils deutliche Erhöhungen der Konzentrationen gemessen. Hier ist eine weitere Beurteilung jedoch mangels Grenz-, Prüf- oder Richtwerten noch weniger möglich als bei den diskutierten Elementen. Erwähnenswert ist aber auch, dass von 16 Elementen immerhin 13 die Grenzwerte für Trinkwasser (TrinkwV) einhalten konnten. Der Vollständigkeit halber sind alle weiteren gewonnenen Ergebnisse in den Tabellen im Anhang D enthalten.

#### 13.4.4 Filterwirkung des Bodens

Um eine potenzielle Gefährdung des Grundwassers durch das Sickerwasser aus Holzhackschnitzelmieten beurteilen zu können, muss die Filterwirkung des (Wald-)Bodens berücksichtigt werden. Diese konnte über die Ergebnisse des Waldklimastationsmess-

netzes der LWF abgeschätzt werden. Dort werden seit über 25 Jahren an 23 Messstationen in ganz Bayern Sickerwasserproben in verschiedenen Bodentiefen gesammelt und inhaltsstofflich analysiert. Im Folgenden werden die Auswertungen zur Filterwirkung auf ausgewählte Stoffe gezeigt.

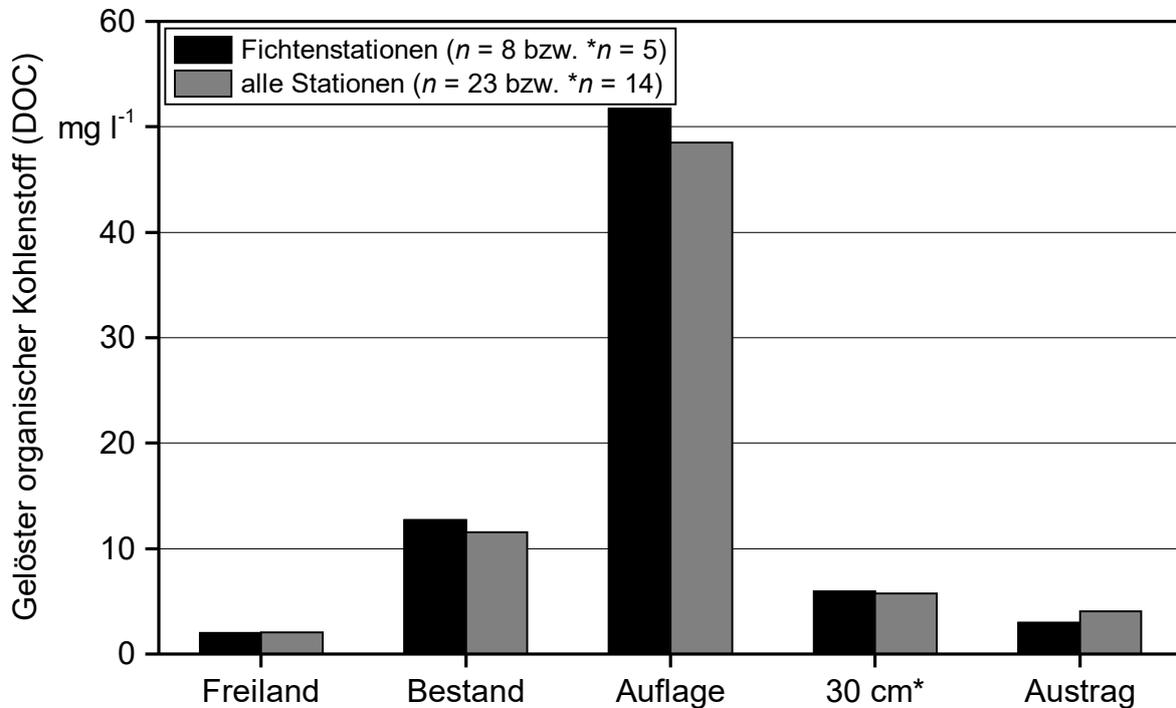


Abbildung 139: Mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag)

Die mittlere Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) liegt bei den Fichtenstationen im Freilandniederschlag bei 2,0 mg l<sup>-1</sup> und im Bestandsniederschlag, der den durch das Kronendach fallenden und von den Bäumen abtropfenden Niederschlag erfasst, bei 12,7 mg l<sup>-1</sup> (Abbildung 139). Im Sickerwasser direkt unter der Humusauflage erreicht die Konzentration mit 51,7 mg l<sup>-1</sup> ihr Maximum. Sie fällt dann aber bereits in einer Bodentiefe von 30 cm mit ca. 5,9 mg l<sup>-1</sup> wieder auf einen Wert ab, der unter dem des Bestandsniederschlags liegt. Der Unterschied zwischen den reinen Fichtenstationen und allen Stationen ist gering. Die Konzentrationsverläufe sind ein wichtiges Indiz dafür, dass die Bodenlebewesen den organischen Kohlenstoff sehr effektiv abbauen. Da in den 23 Jahren der DOC-Messung keine Zunahme der Konzentration beobachtet werden konnte, ist nicht von einer kontinuierlichen Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Boden auszugehen. Die Bodenlebewesen bauen diesen also in etwa so schnell ab, wie er nachgeliefert wird. Die DOC-Konzentrationen lagen im reinen Hack-schnitzelsickerwasser im Mittel zwar ca. achtmal höher als im Humussickerwasser. Es ist jedoch von einer starken Verdünnung des Holzhackschnitzelsickerwassers durch Nie-

derschläge auszugehen (siehe Abschnitt 13.4.3.2). Deshalb sollte auch hier der Frachtgedanke, also die absolute Menge organischen Kohlenstoffs, die in den Boden gelangt, gelten. Diese ist bei einem Holzhackschnitzellagerplatz mit rechnerisch jährlich  $85 \text{ kg ha}^{-1}$  durch die wesentlich geringere Sickerwassermenge ca. drei Mal niedriger als bei einem Waldstandort gleicher Größe (siehe Abschnitt 13.4.5).

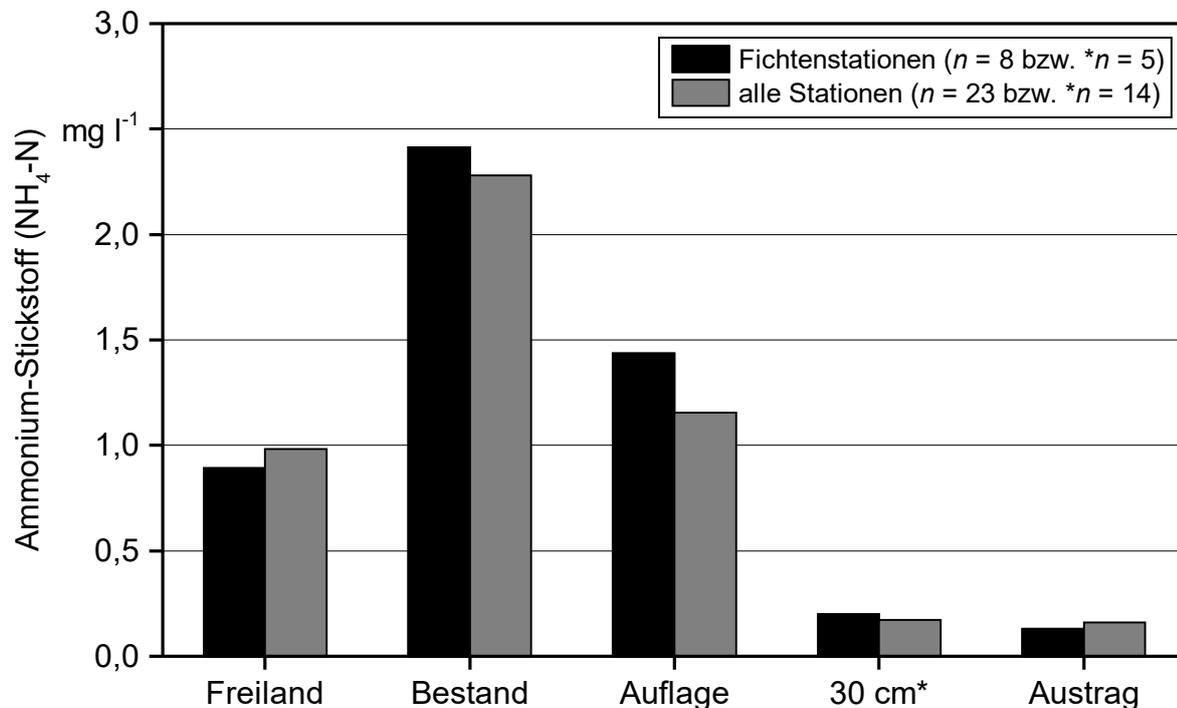


Abbildung 140: Mittlere Konzentration des Ammoniumstickstoffs ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag)

Die mittlere Konzentration von Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) zeigt einen anderen Verlauf als die des gelösten organischen Kohlenstoffs (Abbildung 140). Da Stickstoff primär durch feuchte und trockene Deposition aus Landwirtschaft und Verkehr in die Wälder eingetragen wird, erreicht die Ammoniumstickstoffkonzentration im Bestandsniederschlag durch Abwaschungseffekte von den Baumkronen ihren Maximalwert. In einer Bodentiefe von 30 cm liegt die Konzentration bereits wieder deutlich unter dem Wert des Freilandniederschlags. Also wird auch Ammoniumstickstoff sehr gut vom Boden gefiltert bzw. von den Wurzeln als essenzieller Pflanzennährstoff aufgenommen. Ein Vergleich mit anderen Nutzungsformen veranschaulicht, dass ein Waldbestand oder gar eine landwirtschaftliche Nutzung wesentlich höhere Stickstoffeinträge verursachen kann als ein Holzhackschnitzellagerplatz (siehe Abschnitt 13.4.5).

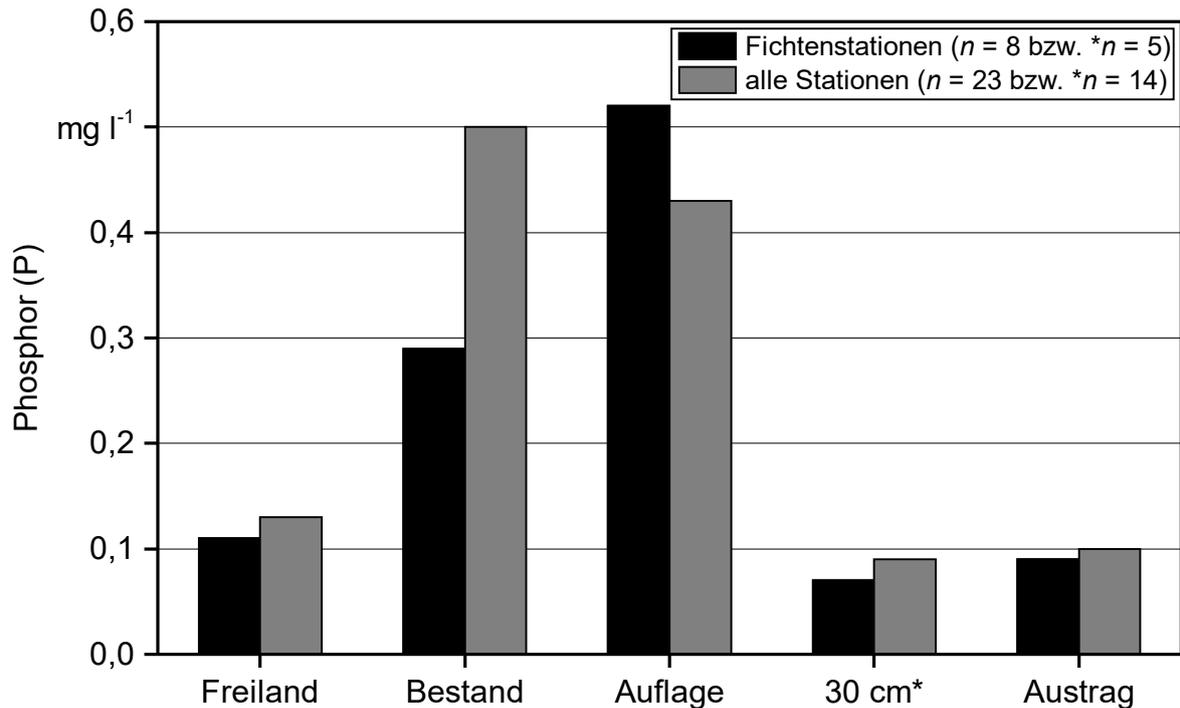


Abbildung 141: Mittlere Konzentration von Phosphor (P) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag)

Phosphor wird wie Stickstoff überwiegend über Deposition aus der Landwirtschaft in die Wälder eingetragen. Die Maximalkonzentrationen werden im Bestandsniederschlag (alle Stationen) oder unter der Humusauflage (Fichtenstationen) erreicht (Abbildung 141). In beiden Fällen liegen die Werte bereits in 30 cm Bodentiefe wieder unter denen des Freilandniederschlags. Phosphor wird demnach ebenfalls sehr gut vom Boden gefiltert bzw. als wichtiger Pflanzennährstoff über die Baumwurzeln zurück in den Nährstoffkreislauf geführt. Ähnlich wie beim DOC liegen die mittleren Phosphorkonzentrationen im Hackschnitzelsickerwasser zwar ca. siebenmal höher als unter der Humusauflage, jedoch dürfte in der Praxis bereits beim Versickern eine starke Verdünnung durch Niederschlag eintreten.

Im Unterschied zu den bisher gezeigten Elementen und Verbindungen steigt bei Aluminium die Konzentration erst nach den ersten Dezimetern im Boden auf den Maximalwert an (Abbildung 142). Dies liegt daran, dass Aluminium einen TM-Anteil am Boden von bis zu 3 % besitzt und somit aus diesem selbst gelöst wird. Daher sind die geringen Al-Konzentrationen im Holzhackschnitzelsickerwasser als absolut vernachlässigbar einzustufen. Da der pH-Wert des Sickerwassers aus Holzhackschnitzelschüttungen dem des natürlichen Niederschlags ähnlich ist, ist auch keine stärkere Al-Mobilisierung durch Holzhackschnitzelsickerwasser zu erwarten.

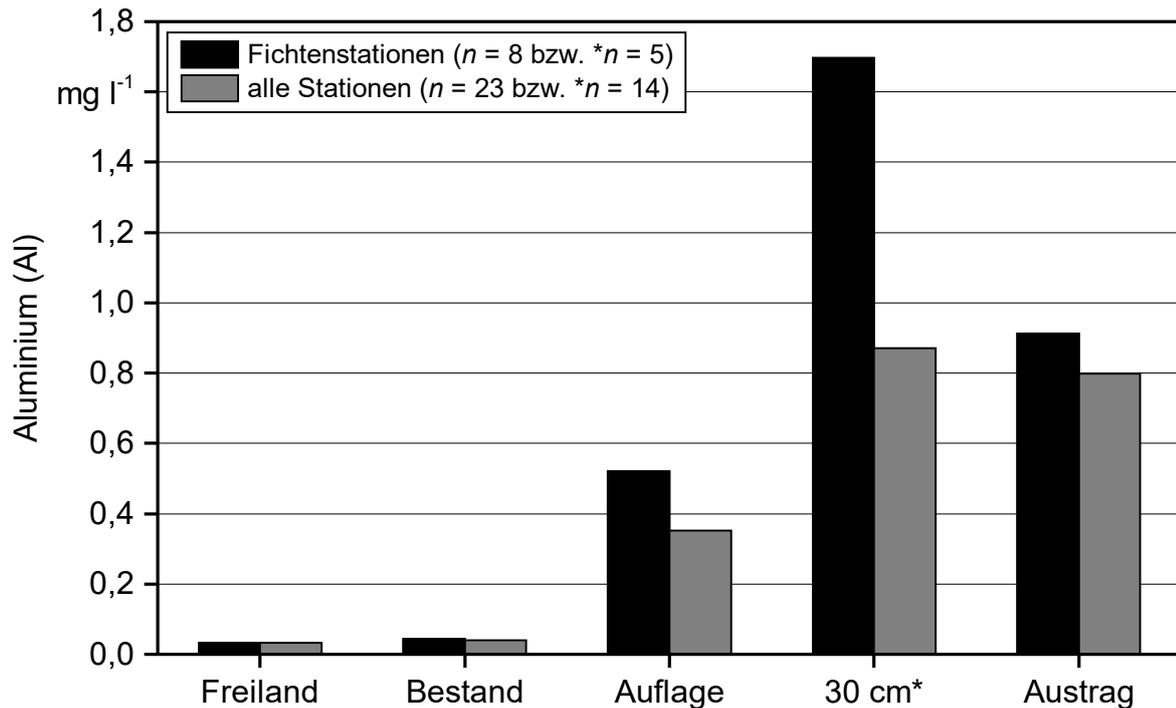


Abbildung 142: Mittlere Konzentration von Aluminium (Al) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag)

Beim Element Eisen zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie z. B. bei gelöstem organischen Kohlenstoff. Die Maximalwerte werden unter der Humusauflage erreicht, entsprechen aber in 30 cm Bodentiefe wieder dem des Freilandniederschlags. Die Eisenkonzentration im Sickerwasser aus Hackschnitzeln lag ca. halb so hoch wie im Sickerwasser aus der Humusschicht (Abbildung 143).

Zink, das im Holzhackschnitzelsickerwasser relativ hohe Konzentrationen aufwies, wird an den Waldklimastationen nicht analysiert, sodass keine gesicherten Aussagen über die Filterung von Zink im Waldboden getroffen werden können. Angesichts der Ergebnisse zu den anderen (metallischen) Elementen ist jedoch zu erwarten, dass auch Zink gut gefiltert bzw. als Nährelement von den Wurzeln resorbiert wird.

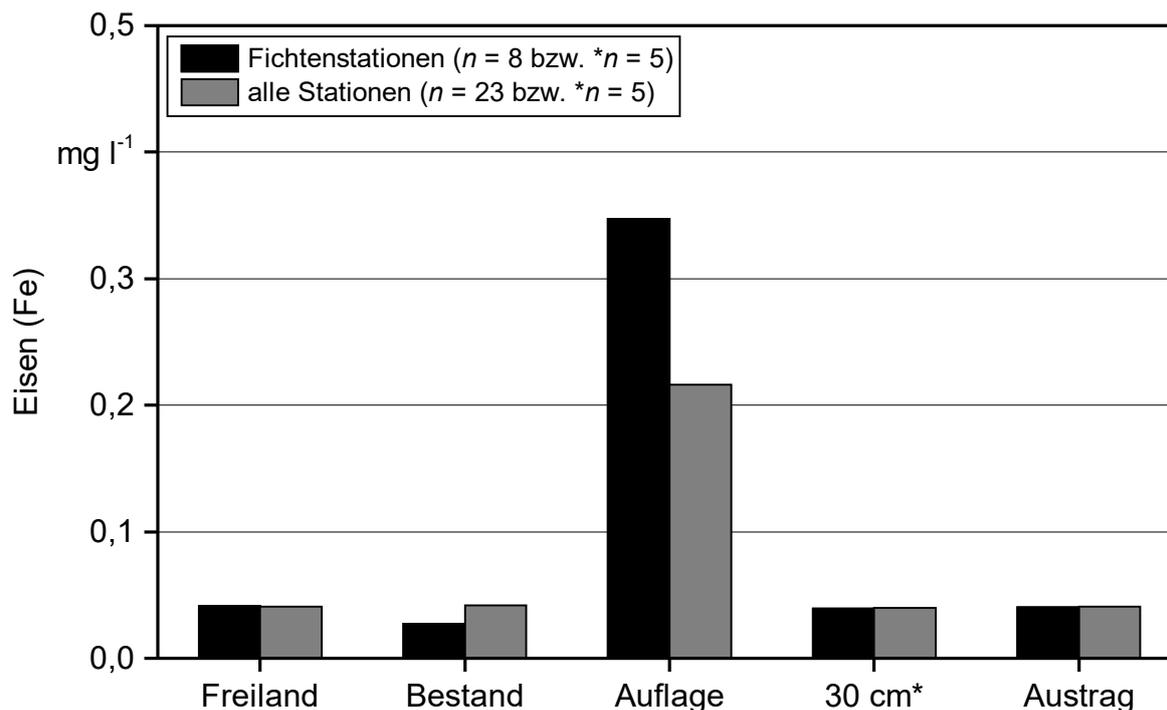


Abbildung 143: Mittlere Konzentration von Eisen (Fe) an den Waldklimastationen in Bayern im Freiland- und Bestandsniederschlag sowie im Sickerwasser unter der Humusauflage, in 30 cm Bodentiefe und unter der Durchwurzelungstiefe (Austrag)

#### 13.4.5 Alternative Nutzung der Lagerfläche

Im Bericht zur Sickerwasseruntersuchung aus dem Vorgängerprojekt wurden ausführliche Berechnungen zu Stofffrachten eines Holzhackschnitzellagerplatzes und zu den Frachten durch eine alternative Nutzung der Lagerfläche als Wald vorgestellt [103]. Zur Berechnung der Einträge von Waldbeständen wurden Daten der bayerischen Waldklimastationen verwendet, für die Einträge durch den Lagerplatz die in der ersten Studie gemessenen Mengen und inhaltsstofflichen Konzentrationen des Holzhackschnitzelsickerwassers. Hierbei wurden exemplarisch der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und der gesamte gebundene Stickstoff (TNb) beleuchtet. Die Berechnungen ergaben, dass die Nutzung der Fläche als Holzhackschnitzellagerplatz trotz der deutlich höheren DOC-Konzentrationen einen um den Faktor drei geringeren Eintrag verursacht als die Nutzung der gleichen Fläche als (Fichten-)Wald. Dies liegt daran, dass die Holzhackschnitzel im Vergleich zu den Bäumen und der Humusschicht einen Großteil des Niederschlags speichern und nicht als Sickerwasser an den Boden weitergeben (siehe Unterkapitel 13.2). Auch bezüglich der Stickstoffeinträge führt die Nutzung als Wald durch die Filterwirkung der Baumkronen und den höheren Sickerwasseranfall zu höheren Frachten als die Nutzung als Holzhackschnitzellagerplatz. In den Berechnungen wurden DOC-Konzentrationen im Holzhackschnitzelsickerwasser, die mit den Ergebnissen aus den aktuellen Versuchen gut vergleichbar sind, verwendet. Bei den TNb-Eingangswerten wurde sogar von etwa fünfmal höheren Konzentrationen ausgegangen, als sie im aktuel-

len Versuch im Holzhackschnitzelsickerwasser auftraten. Ähnliche Effekte bezüglich der Fracht sind auch bei den anderen Elementen zu erwarten.

Vergleicht man die Nutzungsformen Holzhackschnitzellagerplatz und landwirtschaftliche Fläche, erreicht man bezüglich vieler Elemente auch bei der landwirtschaftlichen Nutzung eine deutlich höher liegende Fracht. Der chemische Sauerstoffbedarf von Rindergülle liegt bei bis zu  $90\,000\text{ mg l}^{-1}$  [64], der biologische Sauerstoffbedarf bei bis zu  $30\,000\text{ mg l}^{-1}$  [114]. Die Konzentrationen im Dünger sind somit rund 13 Mal höher als die im aktuellen Versuch gemessenen Maximalkonzentrationen im Holzhackschnitzelsickerwasser. Bei der Grünlandbewirtschaftung wird zur Düngung eine Höchstmenge von 50 bis  $60\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$  pro Jahr Rindergülle empfohlen [82]. Dies entspricht, unter Verwendung der jeweiligen CSB-Maximalwerte, einem CSB von  $4500\text{ bis }5400\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr bei der landwirtschaftlichen Nutzung im Vergleich zu  $1145\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln. Die empfohlenen maximalen Ausbringungsmengen an Ammoniumstickstoff betragen auf Grünland  $135\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr [114]. Berücksichtigt man die Sickerwassermengen aus dem ersten Versuch und die durchschnittlichen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen aus dem aktuellen Versuch, sind auf Holzhackschnitzellagerplätzen jedoch nur etwa  $0,27\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr zu erwarten. Bei Phosphor liegt der rechnerische Eintrag durch einen Holzhackschnitzellagerplatz bei  $0,60\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr. In der Landwirtschaft wird bei der Grünlanddüngung und mittleren Erträgen eine Phosphatmenge von  $10\text{ bis }120\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr empfohlen [81]. Für Zink liegen die Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte im Wirtschaftsdünger bei  $0,1\%$  Trockenmasse [12]. Somit könnten, unter Annahme einer Dichte der Rindergülle von  $1000\text{ kg m}^{-3}$  und eines Trockenmasseanteils von  $10\%$ , kennzeichnungsfrei jährlich bis zu  $6\text{ kg}$  Zink je Hektar ausgebracht werden. Demgegenüber steht ein rechnerischer Zinkeintrag von  $0,13\text{ kg ha}^{-1}$  pro Jahr durch einen Hackschnitzellagerplatz.

Hinsichtlich oberflächiger Einträge beträgt der Mindestabstand zu Oberflächengewässern (Böschungsoberkante) bei der Düngung landwirtschaftlicher Flächen vier Meter, in Abhängigkeit von der Ausbringungstechnik sogar nur einen Meter [14].

### 13.5 Zusammenfassende Bewertung

Im Sickerwasser aus Waldhackschnitzeln sind die Konzentrationen vieler Inhaltsstoffe (v. a. organischer Kohlenstoffverbindungen) im Vergleich zu Regenwasser teilweise erheblich erhöht (Abschnitt 13.4.3). Allerdings tritt in der Praxis nur bei mittleren bis starken Niederschlägen überhaupt eine Sickerwasserspende auf (Unterkapitel 13.2), weshalb bereits zum Zeitpunkt des Versickerns in den Boden mit einem starken Verdünnungseffekt gerechnet werden kann. Zur Beurteilung der Umweltwirkung von Sickerwasser aus Waldhackschnitzeln sollte jedoch ohnehin nicht ausschließlich die Konzentration der Inhaltsstoffe herangezogen werden, sondern vielmehr eine Gesamtbetrachtung von:

- Fracht,
- Filterwirkung des Bodens und
- alternativer Nutzung der Lagerfläche (Wald, Landwirtschaft)

erfolgen. Durch das hohe Niederschlagsrückhaltevermögen von Holzhackschnitzelmieten und die deshalb geringen Sickerwassermengen (Unterkapitel 13.2) ist die Fracht der untersuchten Stoffe trotz teils hoher Konzentrationen gering.

Des Weiteren zeigen Ergebnisse von Bodensickerwasseruntersuchungen an Standorten des bayernweiten Netzes an LWF-Waldklimastationen, dass Waldböden organische Stoffe sehr gut filtern und die Bodenlebewesen diese abbauen (Abschnitt 13.4.4). Die Konzentration organischer Kohlenstoffverbindungen entspricht im Waldboden bereits nach wenigen Dezimetern Mächtigkeit nahezu wieder der des Freilandniederschlags. Auch andere Elemente wie Stickstoff, Phosphor oder Metalle werden im Waldboden sehr gut gefiltert bzw. von den Bäumen über die Wurzeln aufgenommen und somit wieder in den Nährstoffkreislauf eingebunden.

Berechnungen zeigen zudem, dass eine alternative Nutzung der Lagerfläche als Waldbestand oftmals höhere Einträge in den Boden verursacht als eine Nutzung als Holzhackschnitzellagerplatz. Dies liegt an den insgesamt höheren Sickerwassermengen, da Bäume und Humus weniger Regenwasser zurückhalten als Holzhackschnitzelmieten, und z. B. bei Stickstoff auch am Auskämmungseffekt der Baumkronen (Abschnitt 13.4.5). Eine landwirtschaftliche Nutzung bewirkt durch den Einsatz von Düngemitteln i. d. R. erheblich höhere Einträge als eine Nutzung in Form eines Holzhackschnitzellagerplatzes. Hinzu kommt, dass die Düngung in Abhängigkeit von der Ausbringungstechnik bis zu einer Entfernung von nur einem Meter zu Oberflächengewässern gestattet ist (Abschnitt 13.4.5).

Die Gesamtbetrachtung lässt die Sickerwasserthematik hinsichtlich des Umweltschutzes somit weitgehend unbedeutend erscheinen. Rationale und praxistaugliche Vorsichtsmaßnahmen sollten dennoch getroffen werden.

### 13.6 Praxisempfehlungen

Um die ohnehin geringen Risiken einer negativen Beeinflussung der Umwelt auf ein absolutes Mindestmaß zu reduzieren, könnten Abstandsregelungen zu Oberflächengewässern (z. B. fünf Meter in Anlehnung an die Düngeverordnung) eingehalten und die Lagerung in Überschwemmungsgebieten vermieden werden. Bei der Lagerung in Wasserschutzgebieten ist die lokale Schutzgebietsverordnung zu beachten. Die starke Filterwirkung des Bodens könnte genutzt werden, indem Versickerungsmöglichkeiten geschaffen werden.

Auflagen zum Betrieb eines Holzhackschnitzellagerplatzes, die z. B. die Verwendung eines Regenschutzes (Dach, Vlies etc.) vorsehen, wären den Ergebnissen der vorlie-

genden Studie nach unverhältnismäßig. Auch Maßgaben zur Befestigung von Lagerplätzen im Wald bzw. Außenbereich oder zur kontrollierten Sammlung von Sickerwasser wären aufgrund der geringen Umweltwirkung nicht angemessen. Eine Befestigung ist in Bezug auf das Sickerwasser sogar eher kontraproduktiv, da Fläche versiegelt und die Filterwirkung des Bodens nicht mehr in vollem Umfang ausgenutzt werden kann.

## Zusammenfassung

Starke räumliche und zeitliche Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage von Holzbrennstoffen stellen die Land- und Forstwirtschaft vor große Herausforderungen. Die verlustfreie und qualitätserhaltende Lagerung stellt dabei einen wesentlichen Bestandteil in der Bereitstellungskette von Holzhackschnitzeln dar.

Während der Bearbeitung des Vorgängerprojekts „Qualitätserhaltende Hackschnitzellaagerung“ (TFZ-Bericht Nr. 55) ergaben sich offene Fragen und innovative Ansätze zur Lagerung und Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln. Diese umfassten beispielsweise neuartige, für die Praxis interessante Konservierungsmethoden (silageähnliche anaerobe Lagerung, Kalkbeimischung) oder die Lagerung qualitativ hochwertiger, technisch gesiebter Holzhackschnitzel in Mieten, in denen aufgrund des höheren Porenvolumens eine bessere Haufenbelüftung angestrebt wird. Ebenso sollte der Wassergehalt, bei dem Holzhackschnitzel als lagerstabil angesehen werden, für typische Sortimente ermittelt werden. Andere Fragestellungen umfassten die Lagerung von ungehacktem Holz im Polter mithilfe einer Abdeckung auf Papierbasis, die qualitätserhaltende Lagerung technisch getrockneter Holzhackschnitzel mit einer Vliesabdeckung, die Vergleichbarkeit der Lagerung von Holzhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb (KUP) mit der Lagerung von Waldhackschnitzeln oder die zu erwartenden Sickerwasserausträge aus Holzhackschnitzelmieten im Freiland. Neben der Lagerung wurden energetische Optimierungsmöglichkeiten bei der einfachen technischen Trocknung in selbstgebauten Satz-trockneranlagen aufgezeigt. Außerdem stellte sich auch die Frage nach den Fließ- und Verbrennungseigenschaften gelagerter und technisch getrockneter Holzhackschnitzel. Diese Fragestellungen sind Gegenstand dieses Vorhabens.

### Hackholzlagerung mit und ohne Abdeckung

Die Vorlagerung von Holz in ungehacktem Zustand ist ein in Bayern weit verbreitetes Verfahren. Bei der Lagerung in offenen Poltern kann es jedoch zu einer Wiederbefeuchtung durch Niederschlag und somit zu einem Verlust des Trocknungserfolgs kommen. Abhilfe kann eine kommerziell verfügbare Abdeckfolie auf Papierbasis als Regenschutz schaffen. Neben einer Verbesserung der Trocknung und einer Verringerung von Trockenmasseverlusten verspricht diese Art der Lagerung eine Verbesserung weiterer Brennstoffparameter, wie beispielsweise des Aschegehalts oder des Feinanteils.

In einem mehrmonatigen Feldversuch (Mai bis Dezember 2017) wurden sechs Hackholzpolter aus Waldrestholz (Nadelholz) mit und ohne Abdeckung gelagert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Abdecken von Waldrestholzpoltern im Frühsommer zu einer starken, statistisch signifikanten Abnahme des Wassergehalts führte und der niedrige Wassergehalt anschließend bis in den Winter hinein erhalten blieb. Bei den offen gelagerten Poltern war der anfängliche Trocknungseffekt hingegen etwas geringer und im Herbst/Winter stieg der Wassergehalt aufgrund von Niederschlag allmählich wieder bis auf den Einlagerungswert an. Hinsichtlich des Trockenmasseverlusts konnten keine klaren Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Der Feinanteil der Holz-

hackschnitzel verringerte sich durch das Abfallen von Nadeln und Rindenpartikeln. Der Aschegehalt verringerte sich nur bei abgedeckt gelagerten Poltern. Die rechnerischen Mehrkosten durch das Abdecken der Polter beliefen sich auf 0,83 € Srm<sup>-1</sup> (Praxisbeispiel) bzw. 2,17 € Srm<sup>-1</sup> (Versuch).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Waldrestholzpolter nur über den Sommer offen gelagert werden sollten, es sei denn, der Wassergehalt spielt bei der Verbrennung keine entscheidende Rolle. Sollen auch im Herbst oder Winter noch trockene Holzhackschnitzel produziert werden, ist das Abdecken der Polter empfehlenswert.

### **Veränderte Lagerung durch Siebung von Holzhackschnitzeln**

In einem fünfmonatigen Versuch (Mai bis Oktober 2017) wurden Holzhackschnitzel aus Waldrestholz und Energierundholz in Freilandmieten gelagert, wobei in der Hälfte der Fälle Brennstoffe zum Einsatz kamen, bei denen vorab der Feinanteil (Partikel < 10 mm Durchmesser) maschinell abgeseibt wurde. Hierdurch wurden eine bessere Belüftbarkeit der Haufwerke und gleichzeitig eine Verringerung des Nährstoffangebots für mikrobielles Wachstum angestrebt.

Die Ergebnisse waren stark abhängig vom gewählten Ausgangsmaterial. Vor allem die Waldrestholzhackschnitzel hatten insgesamt eine sehr hohe Qualität (z. B. niedriger Feinanteil). Somit hatte die Siebung einen geringeren Effekt, als sie bei durchschnittlichen Waldrestholzhackschnitzeln zu erwarten gewesen wäre. Außerdem waren die Klimabedingungen der ersten Lagermonate sehr günstig für die Trocknung aller vier Mieten. Da es zudem durch die Vliesabdeckung zu keiner Wiederbefeuchtung der Holzhackschnitzel kam, trockneten alle Mieten stark ab.

Die Lagerung gesiebter Brennstoffe führte bei Energierundholz zu sehr geringen Trockenmasseverlusten und dadurch zu einem Energiegewinn aufgrund der gleichzeitig eingetretenen starken Trocknung. Die Siebung von Waldrestholz hatte bei der Mietenlagerung dagegen keine Vorteile im Vergleich zur ungesiebten Variante. Sie sollte nur durchgeführt werden, wenn die Partikelgrößenverteilung und der Aschegehalt für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen optimiert werden sollen, nicht jedoch zur Verbesserung der natürlichen Trocknung. Falls eine Mietenlagerung auf eine Siebung folgt, sollte die Miete abgedeckt oder unter Dach gelagert werden.

Die Siebung verringerte in allen Fällen die Mietentemperatur. Sie könnte somit als eine Maßnahme zur Vermeidung von Selbstentzündung dienen. Zu beachten ist jedoch, dass die Siebung voraussichtlich nur dann wirtschaftlich darstellbar ist, wenn für das ausgesiebte Feinmaterial eine weitere, ökonomisch interessante Verwendung gefunden oder für die hochwertigeren Holzhackschnitzel ein besserer Erlös erzielt wird.

### **Neue Konservierungsmethoden für die Holzhackschnitzellagerung**

In zwei fünfmonatigen Versuchsreihen wurden die Beimischung von Kalk (CaCO<sub>3</sub>) und die anaerobe Lagerung von Holzhackschnitzeln analysiert. Zum Einsatz kamen Lager-

behälter im Labormaßstab (0,6 m<sup>3</sup>), kleine Lagersilos (2 m<sup>3</sup>) und eine kleine Holzhackschnitzelmiete (12 m<sup>3</sup>).

Bei der Lagerung der Holzhackschnitzel mit CaCO<sub>3</sub> als Additiv kam es zu positiven Effekten auf den Trockenmasseabbau. Gleichzeitig erhöhte sich aber der Aschegehalt aufgrund der Additivzugabe. Verbrennungsversuche zeigten, dass die Kalkbeimischung zu erhöhten Staubemissionen während der Verbrennung in einem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel führen kann. Darüber hinaus könnte die großtechnische Umsetzung einer CaCO<sub>3</sub>-Additivierung in der Praxis technologische und finanzielle Herausforderungen mit sich bringen. Somit ist die mögliche Implementierung einer Kalkbeimischung kritisch zu hinterfragen.

Die anaerobe Lagerung könnte nach den Ergebnissen der Behälterlagerung in den Versuchsreihen A und B eine geeignete Methode sein, um Trockenmasseverluste, aber auch Änderungen der Brennstoffqualität zu minimieren. Voraussetzung hierfür ist aber, dass ein vollständiger Luftabschluss auch im Praxismaßstab großer Lagermieten realisiert werden kann. Auch bei der Lagerung in abgedichteten Betonsilos (Versuchsreihe B) kam es in Einzelfällen zu einem leicht positiven Effekt auf die Trockenmasseverluste (verglichen mit der zeitgleichen Lagerung in einer offenen Praxismiete). Bezüglich des Energieinhalts der Schüttung war die Lagermiete aufgrund einer starken Trocknung der Brennstoffe im Vorteil. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Umsetzung eines vollständigen Luftabschlusses bei der Silolagerung von Holzhackschnitzeln schwierig ist. Wenn die anaerobe Lagerung nicht in vollständig dichten Silobehältern, sondern in der Art eines Fahrsilos realisiert werden soll, besteht das in den Versuchen gezeigte, zum Teil erhebliche Risiko, dass unsachgemäße oder gestörte Lagerungsbedingungen die Trockenmasseverluste in der Praxis möglicherweise sogar noch erhöhen. Zu beachten ist zudem, dass alle Brennstoffe nach der anaeroben Lagerung aufgrund des Wassergehalts nicht für die Verwendung in Kleinf Feuerungsanlagen geeignet waren. Diese Lagerart käme somit allenfalls für große Biomasseheiz-(Kraft-)Werke infrage, die auch höhere Brennstoffwassergehalte tolerieren können.

### **Homogenität im Wassergehalt vom Lagerplatz bis zur Feuerung**

Bei der Lagerung in Freilandmieten und bei der technischen Trocknung kann es zu einer erhöhten Inhomogenität der Brennstoffe, v. a. hinsichtlich des Wassergehalts kommen. In zwei Praxisfallstudien wurde daher untersucht, in welchem Umfang eine an die Lagerung anschließende, manuelle Homogenisierung der Brennstoffe mittels Radlader notwendig ist und inwieweit diese durch typische Verlade- und Transportprozesse ohnehin bereits stattfindet. Hierzu wurde die Homogenität des Wassergehalts entlang einer praxisüblichen Lieferkette, d. h. von einer Miete an einem Lagerplatz über den Lkw-Transport bis hin zur Steigförderung in den Kessel eines Heizwerks beprobt.

Der Wassergehalt der Mieten variierte bei Auslagerung zwischen 19,2 und 68,4 m-% (Fallstudie 1) bzw. 30,7 und 68,3 m-% (Fallstudie 2). Insgesamt nahm die Inhomogenität des Wassergehalts bei beiden Fallstudien vom Lagerplatz bis hin zur Feuerung deutlich ab und es kam zu einer ausgeprägten und ausreichenden Homogenisierung allein durch

die Umschlagsprozesse während der Lieferung. Zu beachten ist, dass der Wassergehalt zusätzlich von der Verweildauer der Holzhackschnitzel im Bunker, der Fördertechnik sowie von der Vermischung mit womöglich anderen Sortimenten und Lieferungen beeinflusst wird. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse, dass selbst extreme Schwankungen im Wassergehalt des Mieten-Lagerguts bis zur tatsächlichen Verwendung in der jeweiligen Feuerung durch den Brennstoffumschlag zu einem großen Teil ausgeglichen werden können.

### **Technische Trocknung für einen homogenen Wassergehalt**

In zwei Versuchsreihen wurde die technische Trocknung von Holzhackschnitzeln in selbstkonstruierten Satzrocknerboxen am TFZ mit einem Schüttgutvolumen von 2 bis 3,5 Srm untersucht. Neben dem Energiebedarf (Gebläse, Wärmequelle) und der im Verlauf eintretenden Inhomogenität beim Wassergehalt wurde die technische Trocknung hinsichtlich ihres energetischen Wirkungsgrads bewertet.

In der ersten Versuchsreihe wurde eine deutliche Steigerung der Inhomogenität aufgrund der Belüftung der Schüttung mit warmer Luft gemessen. In den Versuchen traten sowohl Werte von  $< 10$  m-% als auch von  $> 40$  m-% auf. Dies könnte vor allem in Kleinfeuerungsanlagen zu Störungen und zu einem Emissionsanstieg führen, weshalb auf eine ausreichende Durchmischung der Brennstoffe nach der Trocknung zu achten ist. Geeignete Betriebskonzepte können diese Vermischung bereits in der Prozesskette gewährleisten (siehe vorangegangene Teilstudie zur Homogenisierung des Wassergehalts entlang der Lieferkette). Vor allem bei selbstkonstruierten, kleinen Trocknungsanlagen, bei denen direkt vom Trocknungscontainer in den Brennstoffbunker gekippt wird, ist jedoch ein zusätzlicher Homogenisierungsschritt, beispielsweise mit einem Radlader, empfehlenswert.

Die zweite Versuchsreihe zur energetischen Optimierung der Trocknungsanlage zeigte, dass der energetische Wirkungsgrad stark von der Wärmequelle abhängt. Muss die Wärme für die Trocknung eigens erzeugt werden, kann der Wärmeverbrauch durch Anpassung der maximalen Trocknungstemperatur optimiert werden. Weiterhin empfiehlt sich eine Trocknung bis zum lagerstabilen Wassergehalt (siehe nachfolgende Teilstudie), um die für die Trocknung benötigte Energie zu reduzieren.

### **Identifikation des maximalen Wassergehalts für volle Lagerstabilität**

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zum lagerstabilen Wassergehalt, unterhalb dessen die mikrobielle Aktivität in Holzhackschnitzeln zum Erliegen kommt. In einer Teilstudie sollte daher der tatsächlich als lagerstabil zu bewertende Wassergehalt für typische Holzhackschnitzelsortimente ermittelt werden. Dafür wurden Energierundholz- und Waldrestholzproben im wöchentlichen Wechsel aus Versuchsmieten entnommen, homogenisiert und im Trockenschrank auf ausgewählte Zielwassergehalte konditioniert. Danach wurden diese Hackschnitzel je Wassergehaltsstufe separat in luftdicht verschlossenen 10-l-Eimern für 48 Stunden bei zwei Temperaturstufen (21 °C und

34 °C) gelagert. Anschließend wurde über ein in die Eimerdeckel eingebautes Ventil der in den Eimern verbliebene Restsauerstoffgehalt gemessen. Der Sauerstoffverbrauch diente dabei als Weiser für Abbauprozesse. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei Holzhackschnitzeln keinen absolut lagerstabilen Wassergehalt gibt. Das Naturprodukt Holz zersetzt sich selbst in einem sehr trockenen Zustand geringfügig. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in chemischen Autooxidationsprozessen. Abbauprozesse beginnen nicht schlagartig bei einem bestimmten Wassergehalt, sondern treten immer auf und werden mit zunehmendem Wassergehalt stärker. Dementsprechend ist es Aufgabe des Praktikers, einen für ihn noch akzeptablen Trockenmasseverlust selbst zu definieren, um die Holzhackschnitzel dann bis zu dem entsprechenden Wassergehalt zu trocknen.

Ein rechnerischer Trockenmasseverlust von zwei Prozent pro Jahr würde bei Waldrestholzhackschnitzeln mit einem Wassergehalt von 19,7 m-% und bei Energierundholzhackschnitzeln mit einem Wassergehalt von 23,2 m-% auftreten (jeweils bei einer Lagerungstemperatur von  $21 \pm 2$  °C). Nach dem Wassergehalt hat die Lagerungstemperatur den größten Einfluss auf den Trockenmasseabbau. Bei höherer Lagerungstemperatur müssen die Holzhackschnitzel etwas stärker getrocknet werden, um einen vergleichbar niedrigen Trockenmasseverlust zu erzielen. Liegt die Lagerungstemperatur beispielsweise bei 34 °C, müssten die Wassergehalte ca. fünf Prozentpunkte niedriger sein, um den Abbau auf eine Rate von 2 % im Jahr zu begrenzen. Die Unterschiede zwischen den Sortimenten waren eher gering und nur in den ersten Wochen der Lagerung kam es vor allem bei Waldrestholzhackschnitzeln schon bei niedrigeren Wassergehalten zu einer stärkeren Zersetzung, was auf leichter verfügbare Nährstoffe für mikrobielles Wachstum im Feinreisig und den Nadeln zurückzuführen ist. Die Ergebnisse verdeutlichen insgesamt allerdings auch, dass im Hinblick auf einen Trockenmasseerhalt bei der Lagerung eine technische Trocknung der Brennstoffe auf einen Wassergehalt von deutlich unter 20 m-% als Energieverschwendung angesehen werden kann.

### **Lagerung vorgetrockneter Holzhackschnitzel mittels Vliesabdeckung**

Ausgehend von den Ergebnissen zur technischen Trocknung und zum lagerstabilen Wassergehalt wurde die Lagerung vorgetrockneter Holzhackschnitzel im Freien mittels Vliesabdeckung als günstigere und einfachere Alternative zur Hallenlagerung untersucht. Das verwendete Abdeckvlies zeigte in Nebenversuchen ein hohes Niederschlagsrückhaltevermögen von im Mittel über 80 %. Ein einjähriger Gebrauch im Freiland wirkte sich nicht negativ auf die Eigenschaften des Vlieses aus. Bei einer fünfmonatigen Lagerung technisch getrockneter Energierundholzhackschnitzel unter dem diffusionsoffenen Abdeckvlies in einer Freilandmiete konnte die Brennstoffqualität hinsichtlich des Wassergehalts und der Trockenmasse der Holzhackschnitzel genauso gut erhalten werden wie bei der Lagerung in einer Halle. In beiden Varianten veränderte sich der mittlere Wassergehalt (ca. 14 m-%) über die Lagerungsdauer nur um weniger als einen Prozentpunkt. Die Niederschlagshöhe (462 mm) entsprach während des Versuchszeitraums dem langjährigen Mittel am Lagerungsort bei München. Trockenmasseverluste wurden weder im Freiland noch in der Halle festgestellt. Somit blieb auch der bei der Verbrennung nutzbare Energieinhalt der Holzhackschnitzel während der Lagerung konstant. Inwiefern die

Lagerung im Freiland unter Vlies jedoch auch bei höheren Wassergehalten und Niederschlägen der Hallenlagerung ebenbürtig ist, konnte mit diesem Versuch nicht abschließend beurteilt werden.

### **Lagerungsbedingte Änderung der Fließeigenschaften und des Verbrennungsverhaltens**

Durch die mehrmonatige Lagerung von Holzhackschnitzeln können sich die Fließeigenschaften und das Verbrennungsverhalten der Brennstoffe ändern. Daher wurden Holzhackschnitzel aus der Freilandlagerung hinsichtlich ihrer Brückenbildungsneigung untersucht. Außerdem wurden die unterschiedlich gelagerten Brennstoffe im Rahmen von Feuerungsversuchen in einem 30-kW-Holzhackschnitzelkessel eingesetzt. Verwendet wurden Holzhackschnitzel aus den Freilandversuchen anderer Arbeitspakete. Die Brennstoffe wurden teilweise technisch vorgetrocknet, in den meisten Fällen jedoch frisch in Mieten oder abgedichteten Betonsilos eingelagert.

Die Lagerung hatte einen beträchtlichen Einfluss auf das Fließ- und Verbrennungsverhalten. Besonders bei Holzhackschnitzeln, die in einer Miete gelagert wurden, zeigte sich eine Verbesserung hinsichtlich der Brückenbildungsneigung, vermutlich durch eine oberflächliche Zersetzung der Partikel und eine dadurch bedingte Abnahme der Rauigkeit.

Gleichzeitig nahmen bei diesen Brennstoffen die Emissionen an CO, Org.-C und Gesamtstaub häufig zu. Lediglich beim Gesamtstaub war dies als kritisch zu bewerten, da selbst bei technisch getrockneten Brennstoffen der Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV mit dem verwendeten Kessel ohne Staubabscheider nicht mehr eingehalten werden konnte.

Vor allem für Kleinfeuerungsanlagen, bei denen ein sehr niedriger Wassergehalt für eine emissionsarme Verbrennung empfohlen wird, bietet sich die technische Trocknung im Vergleich zur Lagerung in Holzhackschnitzelmieten an. So kann ein geeigneter Wassergehalt mit hoher Sicherheit erreicht werden und es lassen sich weitere, bisher nicht näher definierbare brennstofftechnische Veränderungen vermeiden. Letztere stehen aufgrund der hier dargestellten Ergebnisse im Verdacht, erhöhte Emissionen an CO, Org.-C und Gesamtstaub zu verursachen. Dies sollte aber in weiteren Verbrennungsversuchen validiert werden.

### **Sickerwasser aus Holzhackschnitzelmieten**

In einem mehrmonatigen Versuch wurden die Inhaltsstoffe der Sickerwasserausträge künstlich beregneter Holzhackschnitzel aus der Deckschicht zwei im Freiland gelagerter Haufwerke untersucht. Hierzu wurden Holzhackschnitzel aus realen Lagermieten in regelmäßigen Abständen beprobt, unter kontrollierten Bedingungen beregnet sowie das dabei entstehende Sickerwasser aufgefangen und analysiert.

Im Sickerwasser aus Waldhackschnitzeln sind die Konzentrationen vieler Inhaltsstoffe (v. a. organischer Kohlenstoffverbindungen) im Vergleich zu Regenwasser teilweise er-

heblich erhöht. Allerdings tritt in der Praxis nur bei mittleren bis starken Niederschlägen überhaupt eine Sickerwasserspense auf, weshalb bereits zum Zeitpunkt des Versickerns in den Boden mit einem starken Verdünnungseffekt gerechnet werden kann. Zur Beurteilung der Umweltwirkung von Sickerwasser aus Waldhackschnitzeln sollte zudem nicht vorrangig die Konzentration der Inhaltsstoffe herangezogen werden, sondern vielmehr eine Gesamtbetrachtung von Fracht, Filterwirkung des Bodens und alternativer Nutzung der Lagerfläche (Wald, Landwirtschaft) erfolgen.

Durch das hohe Niederschlagsrückhaltevermögen von Holzhackschnitzelmieten und die deshalb geringen Sickerwassermengen ist die Fracht der untersuchten Stoffe trotz teils hoher Konzentrationen gering. Ergebnisse von Sickerwasseruntersuchungen aus den LWF-Waldklimastationen zeigen, dass der Waldboden organische Stoffe sehr gut filtert und die Bodenlebewesen diese abbauen. Die Konzentration organischer Kohlenstoffverbindungen entspricht im Waldboden bereits nach wenigen Dezimetern Mächtigkeit nahezu wieder der Konzentration des Freilandniederschlags. Auch andere Elemente, wie Stickstoff, Phosphor oder Metalle, werden im Waldboden sehr gut gefiltert bzw. über die Wurzeln von den Bäumen aufgenommen und damit wieder in den Nährstoffkreislauf eingebunden.

Vergleiche mit den Einträgen aus alternativen Nutzungsformen der Land- und Forstwirtschaft verdeutlichen, dass diese teils erheblich höhere Einträge in den Boden verursachen können als ein Hackschnitzellagerplatz. Die Gesamtbetrachtung lässt somit die Sickerwasserthematik hinsichtlich des Umweltschutzes als weitgehend unkritisch erscheinen.

### **Gesamtbetrachtung**

Insgesamt konnten im Rahmen der in diesem Bericht dargestellten Studien zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten und neuartige Ansätze für die Lagerung von Holzhackschnitzeln aufgezeigt werden. Die Ergebnisse unterstützen somit die land- und forstwirtschaftliche Praxis im Freistaat Bayern. Sie finden weiterhin direkt Eingang in die Normungsarbeit, beispielsweise im Rahmen der aktuell erarbeiteten Richtlinie VDI 3464 Blatt 2 zur „Lagerung, Aufbereitung und Umschlag von Holzhackschnitzeln für die energetische Nutzung im privaten und gewerblichen Bereich – Anforderungen unter Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekten“.



## Quellenverzeichnis

- [1] ALAKANGAS, E. (2012): Analysis of particle size for wood chips and hog fuel – ISO/TC 238. Project CEN-Suomi, Project number 25217. Jyväskylä: Finnish Forest Industry Federation, Research Report, VTT-R-02834-12, 28 Seiten
- [2] ALTER, N. (2017): Schwerpunkt Zentralheizungen: Neue Anforderungen an Holzfeuerungen. Ökodesign-Richtlinie, TA-Luft-Nachfolgeregelung. In: TECHNOLOGIE-UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (HRSG.): 21. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung. Straubing, 17. Mai 2017. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), S. 1-22
- [3] AMLINGER, F.; CUHLS, C.; PEYR, S. (2008): Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. Waste Management & Research, Jg. 26, Nr. 1, S. 47-60
- [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, S. 17-25
- [5] BAUMBACH, G.; HARTMANN, H.; HÖFER, I.; HOFBAUER, H.; HÜLSMANN, T.; KALTSCHMITT, M.; LENZ, V.; NEULING, U.; NUSSBAUMER, T.; OBERNBERGER, I.; SCHULZE, A.-L.; WILK, V.; WINTER, F. (2016): Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 579-814, ISBN 978-3-662-47437-2
- [6] BERGMAN, Ö. (1985): Deterioration and protection of pulpwood chips in outdoor storage. Thesis. Rapport - Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen foer Virkeslaera, Nr. 170. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 95 Seiten, ISBN 91-576-2532-8
- [7] BERGMAN, Ö.; NILSSON, T. (1979): An experiment on outdoor storage of whole-tree chips. Rapport - Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen foer Virkeslaera, Nr. 109. Uppsala: The Swedish University of Agricultural Sciences, 21 Seiten, ISBN 91-576-0196-8
- [8] BÖHM, T.; HARTMANN, H. (2005): Bestimmung der Schüttdichte von Biomassebrennstoffen. Landtechnik, Jg. 60, Nr. 3, S. 158-159
- [9] BRÜGGEMANN, C.; BRÜGGER, E.; DÖRR, I.; HANSEN, H.; KRAPE, G.; KRÄMER, G.; KUPTZ, D.; LANGER, S.; STANEV, A.; SCHMOECKEL, G.; ZELINSKI, V. (2018): Hackschnitzel-Heizungen. Was muss beachtet werden? 3. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 46 Seiten
- [10] Biomass Technology Group BV (BTG) (2002): Methane and nitrous oxide emissions from biomass waste stockpiles. Prepared for WorldBank – PCFplus Research. Final Report Project No. 1050 August 2002. PCFplus Report, Nr. 12. Enschede: Biomass Technology Group BV (BTG), 81 Seiten

- [11] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (2012): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz– EEG). Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung. Köln: Bundesanzeiger-Verlag, 82 Seiten
- [12] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. Mai 2015 (BGBl. I S. 886) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 58, S. 2482-544
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2014): Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 56 Seiten
- [14] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 32, S. 1305-1348
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459). Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 12, S. 459-492
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2014): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 28, S. 1108-1184
- [17] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2014): Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz – AbwAG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Januar 2005 (BGBl. I S. 114), das zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 5, S. 114-119
- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2020): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), die zuletzt durch Artikel 105 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 4, S. 38-56
- [19] C.A.R.M.E.N. E. V. (2018): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln – der Energieholz-Index, Preisdaten für das 4. Quartal 2018. Straubing: C.A.R.M.E.N. e. V. URL: <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel> (Stand: 01.08.2020)

- [20] TORO, A. D.; JIRJIS, R.; NILSSON, D. (1994): Cold air ventilated and sealed storage of wood chips from willow. Laboratory Experiments. Rapport - Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbruksteknik, Nr. 129. Uppsala: Swedish University of Agricultural Science, 14 Seiten
- [21] DEUTSCHER BUNDESTAG (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 16. Juli 1999, die zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 36, S. 1554-1582
- [22] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2015): Wetterstation Gelbensee, Jahre 2008–2018. Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD). Daten von WETterdaten und -STATistiken Express (WESTE), URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo\\_systeme/weste/weste\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo_systeme/weste/weste_node.html)
- [23] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2017): Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon – Niederschlagsintensität. Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD), URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html> (Stand: 11.03.2019)
- [24] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2018): Niederschlags- und Lufttemperaturdaten an der DWD-Messstation Oberhaching-Laufzorn, Jahre 2008–2018. Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD) Daten von WETterdaten und -STATistiken Express (WESTE), URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo\\_systeme/weste/weste\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo_systeme/weste/weste_node.html)
- [25] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2017): Niederschlags- und Lufttemperaturdaten an der DWD-Messstation Weihenstephan-Dürnast, Jahre 2009–2017. Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD) Daten von WETterdaten und -STATistiken Express (WESTE) URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo\\_systeme/weste/weste\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/klinfo_systeme/weste/weste_node.html)
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2012): DIN EN 303-5 Heizkessel. Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 500 kW. Teil 5: Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Oktober 2010. Berlin: Beuth, 10 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen. September 2014. Berlin: Beuth Verlag, 62 Seiten
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. September 2014. Berlin: Beuth Verlag, 12 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 17827-1. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe. Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber. Oktober 2016. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 17828. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Schüttdichte. Mai 2016. Berlin: Beuth Verlag, 18 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 18122. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Aschegehalts. März 2016. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten

- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN EN ISO 18134-2. Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren. September 2016. Berlin: Beuth Verlag, 12 Seiten
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2017): DIN EN ISO 14780. Biogene Festbrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung. August 2016. Berlin: Beuth Verlag, 31 Seiten
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2017): DIN EN ISO 14780. Biogene Festbrennstoffe. Probenherstellung. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 31 Seiten
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2017): DIN EN ISO 18125. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Heizwerts. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 61 Seiten
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2017): DIN EN ISO 18135. Biogene Festbrennstoffe. Probenahme. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 69 Seiten
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN EN ISO 15933 Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden – Bestimmung des pH-Wertes. November 2012. Berlin: Beuth Verlag, 10 Seiten
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2020): ISO DTR 23437: Solid biofuels – Bridging behaviour of bulk biofuels. Vernier, Geneva: International Organization for Standardization, 25 Seiten
- [39] DIECKMANN, C.; HARTMANN H.; KALTSCHNITT M.; RESSEL, J. B. (2016): Transport, Trocknung, Konservierung und Lagerung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 493-578, ISBN 978-3-662-47437-2
- [40] 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
- [41] DRAGUTINOVIC, N.; HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2019): Effect of additives on thermochemical conversion of solid biofuel blends from wheat straw, corn stover, and corn cob. Biomass Conversion and Biorefinery, Jg. 9, Nr. 1, S. 35-54
- [42] 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. (HRSG.): 24<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition 2016, Setting the course for a biobased economy. Amsterdam, 6.–9. Juni 2016. Florenz: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies, S. 60-64
- [43] DUMFORT, S.; KIRCHMAIR, C.; FLOERL, K.; LARCH, K.; RUPPRICH, M. (2018): Storage as the Weak Link of the Biomass Supply Chain. In: MPHULO M., STEUERWALD D., KUKKEERA T. (HRSG.): Africa-EU Renewable Energy Research and Innovation Symposium 2018. Roma, Lesotho, 23.–26. January 2018. Springer Proceedings in Energy. Cham: Springer, S.117-125, ISBN 978-3-319-93438-9

- [44] EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009): Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung. Projektbericht. Freising: Technische Universität München, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, 165 Seiten
- [45] ENGLISCH, M.; HARTMANN, H.; KALTSCHMITT, M. (2016): Mechanische Aufbereitung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 417-491, ISBN 978-3-662-47437-2
- [46] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (2014): Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich. 4., vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 208 Seiten, ISBN 9783000153891
- [47] FACHVERBAND HOLZENERGIE (2018): Gemeinsame Stellungnahme zum vorliegenden Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit zur Einführung der Verordnung über mittelgroße Feuerungsanlagen sowie zur Änderung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (XX. BImSchV) vom 30. April 2018 für feste Biobrennstoffe. Berlin: Fachverband Holzenergie (FVH) im Bundesverband BioEnergie e. V., 15 Seiten
- [48] 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
- [49] FERRERO, F.; MALOW, M.; BERGER, A.; NOLL, M. (2008): Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen am Beispiel von Kiefernholz. In: LEIBNIZ-INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK POTSDAM-BORNIM E. V. (HRSG.): Lagerung von Holzhackschnitzeln. Experten-Workshop, 18. Juni 2008, Potsdam-Bornim. Bornimer Agrartechnische Berichte, Nr. 63. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., S. 32-44, ISSN 0947-7314
- [50] GEISEN, B.; GIVERS, F.; KUPTZ, D.; PEETZ, D.; SCHMIDT-BRAUN, T.; SCHÖN, C.; SCHREIBER, K.; SCHULMEYER, F.; THUDIUM, T.; ZELINSKI, V.; ZENG, T. (2017): Handbuch zum Qualitätsmanagement von Holzhackschnitzeln. Hintergründe, Bereitstellung, Qualitätssicherung. 1. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 88 Seiten
- [51] HAHN, J.; SCHARDT, M.; SCHULMEYER, F.; MERGLER, F. (2014): Der Energieinhalt von Holz. LWF-Merkblatt, Nr. 12. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten
- [52] HARTMANN, H. (2016): Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 580-645, ISBN 978-3-662-47437-2
- [53] HARTMANN, H. (2018): Marktanreizprogramm Erneuerbare Energien: Erfahrungen aus der laufenden Evaluierung. In: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (HRSG.): 21. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung. Straubing, 17. Mai 2017. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), S. 1-22

- [54] HARTMANN, H.; MADEKER, U. (1997): Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualität, Service, Preise. Landtechnik-Bericht, Nr. 28, Freising: Landtechnik Weihenstephan, 65 Seiten
- [55] HE, X.; LAU, A. K.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J.; BI, X. T.; MELIN, S. (2014): Investigating gas emissions and dry matter loss from stored biomass residues. Fuel, Jg. 13, Nr. 134, S. 159-165
- [56] HEDING, N. (1990): Exploitation of marginal forest resources for fuel. Research report, Nr. 7. Frederiksberg: Danish Institute of Forest Technology, 24 Seiten, ISSN 0904-7263
- [57] 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. (HRSG.): EU BC&E 2013, Setting the course for a biobased economy, 21st European Biomass Conference & Exhibition 2013, Copenhagen, June 3-7, 2013. Florence: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies, S. 11-20
- [58] HINTERREITER, S.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P. (2012): Method for determining bridging properties of biomass fuels-experimental and model approach. Biomass Conversion and Biorefinery, Jg. 2, Nr. 2, S. 109-121
- [59] HÖFER, I.; KALTSCHMITT, M. (2017): Effect of additives on particulate matter formation of solid biofuel blends from wood and straw. Biomass Conversion and Biorefinery, Jg. 7, Nr. 1, S. 101-116
- [60] HOFMANN, N.; MENDEL, T.; KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2017): Lagerung von Holzhackschnitzeln. Trockenmasseverluste, Änderungen der Brennstoffqualität und Kosten. Berichte aus dem TFZ, Nr. 55. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 164 Seiten, ISSN 1614-1008
- [61] HOFMANN, N.; MENDEL, T.; SCHULMEYER, F.; KUPTZ, D.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2018): Drying Effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. Research paper. Biomass and Bioenergy, Jg. 111, S. 196-205
- [62] HÖLDRICH, A.; HARTMANN, H.; DECKER, T.; REISINGER, K.; SOMMER, W.; SCHARDT, S.; WITTKOPF, M.; OHRNER, G. (2006): Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren. Berichte aus dem TFZ, Nr. 11. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 274 Seiten, ISSN 1614-1008
- [63] HUELSMANN, T.; MACK, R.; KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2019): Influence of kaolinite on the PM emissions from small-scale combustion. Biomass Conversion and Biorefinery, Jg. 9, Nr. 1, S. 55-70
- [64] JÄKEL, K.; MAU, S. (1999): Umweltwirkung von Biogasgülle. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt. 1. Aufl. Dresden: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 62 Seiten

- [65] JÄMSEN, M.; AGAR, D.; ALAKOSKI, E.; TAMPIO, E., WIHERSAARI, M. (2015): Measurement methodology for greenhousegas emissions from storage of forest chips – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 14, Nr. 51, S. 1617-1623
- [66] JIRJIS, R.; LEHTIKANGAS, P. (1993): Fuel Quality and Dry Matter Loss during Storage of Logging Residues in a Windrow. Rapport - Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen foer Virkeslaera, Nr. 236. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 26 Seiten
- [67] JYLHÄ, P.; HYTÖNEN, J.; ALM, J. (2017): CO<sub>2</sub> release and dry matter loss of Scots pine forest chips stockpiled from late summer to winter. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 104, S. 36-44
- [68] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1755 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [69] KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut – Verfahren Energieholz Bündel im Gebirge. Studie. Wien: Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forsttechnik, 32 Seiten
- [70] KNIGGE, W.; SCHULZ, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. 1. Aufl. Hamburg, Berlin: Paul Parey, 584 Seiten
- [71] KOFMAN, P. D.; THOMSEN, I. M.; OHLSSON, C.; LEER, E.; RAVEN SCHMIDT, E.; SORENSEN, M.; KNUDSEN, P. (1999): Preservation of forest wood chips. January 1999. Fredericia: Elsamproject, 42 Seiten, ISBN: 87-986376-4-9
- [72] KOLLMANN, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe – Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1050 Seiten, ISBN-13 978-3540117780
- [73] KOPPEJAN, J.; LÖNNERMARK, A.; PERSSON, H.; LARSSON, I.; BLOMQUIST, P.; ARSHADI, M.; VALENCIA-REYES, E.; MELIN, S.; HOWES, P.; WHEELER, P.; BAXTER, D.; NIKOLAISEN, L. (2013): Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding. IEA Bioenergy Report. Paris: International Energy Agency, 100 Seiten
- [74] KUANG, X.; SHANKAR, T. J.; BI, X. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S. (2009): Rate and Peak Concentrations of Off-Gas Emissions in Stored Wood Pellets – Sensitivities to Temperature, Relative Humidity, and Headspace Volume. *The Annals of Occupational Hygiene*, Jg. 53, Nr. 8, S. 789-796
- [75] KUPTZ, D. (2015): Brennstoffqualifizierung und Qualitätsmanagement in der Hackschnitzelproduktion als Beitrag zur Emissionsminderung und Nachhaltigkeit. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): „Biomasseheizungen 2015: Holzbrennstoffe und Feuerungstechnik“. 11. November 2015, Hannover. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., S. 1-18
- [76] KUPTZ, D. (2018): Emissionsverhalten verschiedener Hackschnitzelqualitäten – Zusammenfassung aus den Projekten HackZert/QualiS/OptiChip. In: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (HRSG.): 22. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung. Straubing, 6.–7. Juni 2018. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), S. 1-21

- [77] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; MACK, R.; WIESBECK, M. BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2018): Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb. Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten. Berichte aus dem TFZ, Nr. 56. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 163 Seiten, ISSN 1614-1008
- [78] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2016): The effect of raw material and machine setting on chipping performance and fuel quality – a German case study. International Journal of Forest Engineering, Jg. 26, Nr. 1, S. 60-70
- [79] KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHULMEYER, F.; LESCHE, S.; ZENG, T.; AHRENS, F.; ZELINSKI, V.; SCHÖN, C.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LENZ, V.; LOEWEN, A.; NELLES, M.; HARTMANN, H. (2019): Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips – results from six case studies. Biomass Conversion and Biorefinery, Jg. 9, Nr. 1, S. 83-98
- [80] 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
- [81] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2018): Empfehlungen zur Grunddüngung. Stand: Februar 2018. Hannover: Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 8 Seiten
- [82] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2015): Gülledüngung auf Grünland. Basisinformationen. Münster: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2 Seiten
- [83] 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, S. 269-277
- [84] LENZ, H.; PECENKA, R.; IDLER, C.; DUMFORT, S.; WHITTAKER, C.; AMMON, C.; HARTUNG, E. (2017): Continuous weighing of a pile of poplar wood chips – A comparison of methods to determine the dry matter losses during storage. Biomass and Bioenergy, Jg. 96, S. 119-129
- [85] LOHMANN, U. (2012): Holz-Handbuch. 7. Aufl. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag. 456 Seiten, ISBN 978-3871813481
- [86] MACK, R.; KUPTZ, D.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2019): Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler. Research paper. Biomass and Bioenergy, Jg. 125, S. 50-62
- [87] MANZONE, M. (2015): Efficiency of a compactor in wood chip volume reduction. Biomass and Bioenergy, Jg. 80, S. 303-306
- [88] MANZONE, M. (2017): Storage of woodchips in pressed bales. Fuel processing technology, Jg. 157, S. 59-64

- [89] MARUTZKY, R.; KESERY, G. (1981): Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. 1. Mitteilung: Übersicht und allgemeine Einflüsse der Lagerung. Holz-Zentralblatt, Nr. 107, S. 1623-1624
- [90] MATTSSON, J. E. (1990): Basic Handling Characteristics of Wood Fuel: Angle of Repose, Friction Against Surfaces and Tendency to Bridge Building for Different Assortments. Scandinavian Journal of Forest Research, Jg. 5, Nr. 1–4, S. 583-597
- [91] MEIER, T. (2005): Konservierung von Rundholz unter Sauerstoffabschluss Folienkonservierung. Dissertation. Freiburg im Breisgau: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 230 Seiten
- [92] MENDEL, T.; KUPTZ, D.; ÜBERREITER, A.; HARTMANN, H. (2017): Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln. Berichte aus dem TFZ, Nr. 52. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 79 Seiten, ISSN 1614-1008
- [93] NEUHOF, I.; MERGLER, F.; ZORMAIER, F.; WEINERT, B.; HÜTTL, K. (2014): Hackschnitzel richtig lagern. LWF-Merkblatt, Nr. 11. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 4 Seiten
- [94] NURMI, J.; HILLEBRAND, K. (2001): Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway Spruce logging residues. New Zealand Journal of Forest Science, Jg. 31, S. 289-297
- [95] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. (2006): Chemical properties of solid biofuels. Significance and impact. Biomass and Bioenergy, Jg. 30, S. 973-982
- [96] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (1998): ÖNORM M 7133. Hackgut für energetische Zwecke – Anforderungen und Prüfbestimmungen. Februar 1998. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ÖN), 7 Seiten
- [97] PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C. (2018): Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. Biomass and Bioenergy, Jg. 116, S. 140-150
- [98] PETTERSSON, M.; NORDFJELL, T. (2006): Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. Biomass and Bioenergy, Jg. 31, S. 782-792
- [99] REICHLE, E.; MÜLLER, R.; SCHMOECKEL, G.; MÜLLER, C.; WENDLAND, M.; GEIGER, H.; STETTER, U.; ZORMAIER, F. (2009): Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Merkblatt. Augsburg, Freising: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 19 Seiten
- [100] SCHOLZ, V.; IDLER, C.; DARIES, W.; EGERT, J. (2005): Lagerung von Feldholzhackgut. Verluste und Schimmelpilze. Agrartechnische Forschung, Jg. 11, Nr. 4, S. 100-113
- [101] SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2014): Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 36. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 173 Seiten, ISSN 1614-1008

- [102] SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; MACK, R.; ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. (2019): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jg. 9, Nr. 1, S. 71-82
- [103] SCHULMEYER, F.; HOFMANN, N. (2016): Sickerwasserausträge aus Hackschnitzelmieten. Projekt EW/13/53 „Qualitätserhaltende Hackschnitzzellagerung“, unveröffentlichter Teilbericht. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 18 Seiten
- [104] SCHULMEYER, F.; MERGLER, F.; HÜTTL, K.; ZORMAIER, F. (2016): Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. LWF-Merkblatt, Nr. 10. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 6 Seiten
- [105] SELL, J. (1997): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. 4. überarb. u. erw. Aufl. Dietikon: Baufachverlag, 87 Seiten, ISBN 978-3-85565-223-5
- [106] STADT FREISING (2010): Stadtentwässerung Freising – Wasser ist Leben. Klärwerksbroschüre. Freising: Stadt Freising, 40 Seiten
- [107] THÖRNQVIST, T. (1985): Drying and storage of forest residues for energy production. *Biomass*, Jg. 7, Nr. 2, S. 125-134
- [108] TSCHANNEN, W. (2010): Gut abgedeckt ist halb getrocknet – Schnitzelholz-Haufen mit Spezialpapier vor dem Wetter schützen. *Wald und Holz*, Jg. 7, Nr. 14, S. 28-30
- [109] UMWELTBUNDESAMT (2018) Atmosphärische Gaskonzentrationen. Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen> (Stand: 17.09.2018)
- [110] UMWELTBUNDESAMT (2018): Erneuerbare Energien in Deutschland 2017 – Daten zur Entwicklung im Jahr 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 24 Seiten, ISSN 2363-829X
- [111] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2006): VDI 2066-1. Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. November 2006. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e. V., 111 Seiten
- [112] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2016): VDI 4207-2. Messen von Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen – Messen an Anlagen für feste Brennstoffe. Juli 2016. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e. V., 88 Seiten
- [113] WEIDNER, U.; HIENDLMEIER, S.; ZENKER, M.; BORCHERT, H.; FRIEDRICH, S.; SCHULMEYER, F.; LEUCHTWEIS, C. (2016): Energieholzmarkt Bayern 2014. Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 127 Seiten
- [114] WENDLAND, M.; ATTENBERGER, M. (2009): Wirtschaftsdünger und Gewässerschutz – Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft. LfL-Information. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 23 Seiten
- [115] WHITTAKER, C.; YATES, N. E.; POWERS, S. J.; MISSELBROOK, T. (2016): Dry Matter Losses and Greenhouse Gas Emissions from Outside Storage of Short Rotation Coppice Willow Chip. *Bioenergy Research*, Jg. 9, S. 288-302

- [116] WHITTAKER, C.; YATES, N.; POWERS, S.; DONOVAN, N.; MISSELBROOK, T.; SHIELD I. (2016): Testing the Use of Static Chamber Boxes to Monitor Greenhouse Gas Emissions from Wood Chip Storage Heaps. *Bioenergy Research*, Jg. 10, S. 353-362
- [117] ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; SCHUMACHER, T.; LENDT, B.; KRALEMANN, M.; KUPTZ, D.; MACK, R.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2017): Optimierung der Emissionen von Holzhackschnitzel-Kleinfeuerungsanlagen durch geeignete Brennstoffauswahl und Verbrennungsführung (OptiChip). Schlussbericht. Göttingen: Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst Hildesheim, Holzminden, Göttingen, 82 Seiten
- [118] ZENG, T.; KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; SCHULMEYER, F.; ZELINSKI, V.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H.; LENZ, V.; NELLES, M. (2019): Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jg. 9, Nr. 1, S. 99-116
- [119] ZENG, W. S.; TANG, S. Z. (2011): Bias correction in logarithmic regression and comparison with weighted regression for nonlinear models. *Nature Precedings*, URL: <https://doi.org/10.1038/npre.2011.6708.1> S. 1-11



## Anhang

### Anhang A: Fragebogen zur technischen Satz Trocknung von Holzhackschnitzeln

#### Allgemeine Information zur Trocknungsanlage

- Könnten Sie kurz Ihre Trocknungsanlage beschreiben? (Wie ist sie aufgebaut, wie trocknen Sie und wann? Und zu welchem Zweck?)
- Welchen Trocknertypen betreiben Sie? (Name, Hersteller, Eigenbau, Containeranzahl, Beschaffenheit des Containerbodens)
- Trocknen Sie mit Abwärme und wenn ja, was ist die Wärmequelle Ihrer Anlage?
- Welche Temperatur führt die Wärmequelle und kennen Sie die Temperatur der tatsächlichen Trocknungsluft?
- Welches Gebläse verwenden Sie bei Ihrer Trocknung? (radial, axial, Name, Hersteller)
- Mit welchem Volumenstrom bzw. welcher Geschwindigkeit erreicht die Trocknungsluft ihre Holzhackschnitzel? ( $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $\text{m}/\text{s}$ , Gebläseeinstellung, falls nicht bekannt)
- Von wo wird die Trocknungsluft in die Holzhackschnitzel geblasen (seitlich, von unten)?
- Wo befindet sich der Aufstellungsort Ihrer Trocknung (Halle, im Freien)?
- Welche Maße haben Ihre Trocknungscontainer? Und wie voll befüllen Sie diese bei der Trocknung?

#### Fragen zur Trocknungshandhabung und -regelung

- Gibt es bestimmte Holzhackschnitzelsortimente, die Sie hauptsächlich trocknen, und gibt es Sortimente, die Sie nie trocknen?
- Wann (zu welcher Jahreszeit/ganzjährig) trocknen Sie Ihre Holzhackschnitzel hauptsächlich?
- Wie lange trocknen Sie ihre Holzhackschnitzel (in Stunden/Tagen)?
- Trocknen Sie Ihre Holzhackschnitzel auf einen Zielwassergehalt?
- Wenn ja, auf welchen Wassergehalt trocknen Sie?
- Wenn ja, wie erreichen Sie den gewünschten Zielwassergehalt? (Überprüfen der Masse, der Temperatur, des Wassergehalts, anderes Vorgehen)
- Wenn mehrere Sortimente getrocknet werden: Verwenden Sie für unterschiedliche Hackschnitzelsortimente unterschiedliche Trocknungseinstellungen?

- Wenn ja, welche Einstellungen ändern Sie? (Ändern der Schütthöhe, Gebläseleistung, Temperatur?)

Bilden sich bei der Trocknung in den Holzhackschnitzeln Feuchtenester aus? Und wo befinden sich diese?

- Was passiert mit Ihren Holzhackschnitzeln nach der Trocknung? (Werden diese direkt ausgeliefert, genutzt? Gezielt gemischt mit anderen Sortimenten, Wassergehalten? Oder direkt eingelagert?)
- Wird ihre Trocknungsanlage automatisch geregelt? (in Abhängigkeit der Containeranzahl, des Trocknungsendes usw.)
- Kennen Sie Ihren spezifischen Energiebedarf pro m<sup>3</sup> Holzhackschnitzel?

Offene Fragen und Anregungen

- Sind Sie mit Ihrer Trocknungsanlage zufrieden, wo liegen offene Fragen? (Energieeffizienz, Zielwassergehalt usw.)

**Anhang B: Bilanzbeutel im Mietenquerschnitt aus Kapitel 6 „Veränderte Lagerung durch Siebung von Holzhackschnitzeln“**

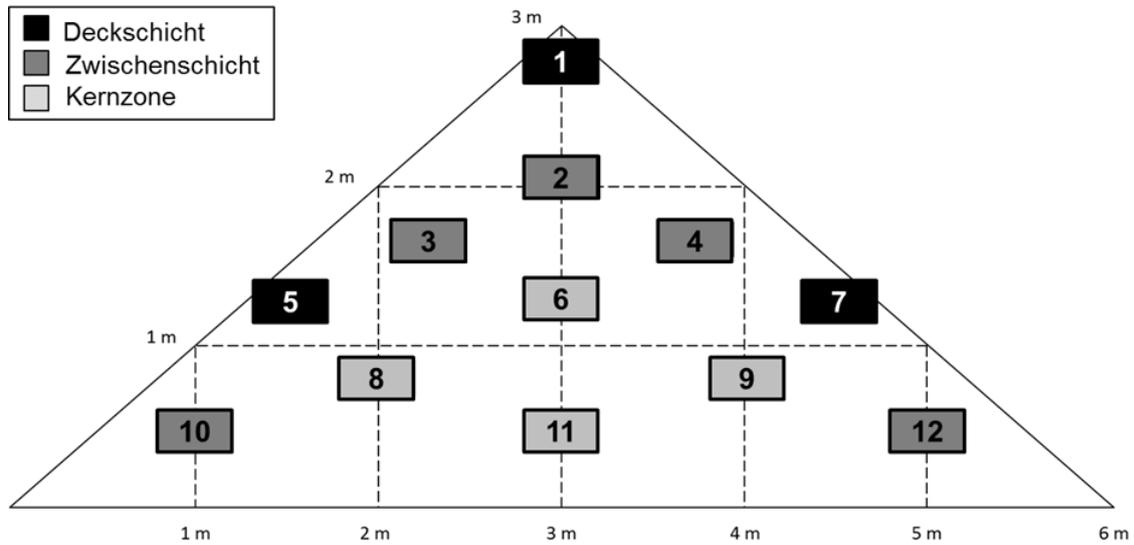


Abbildung 144: Probenverteilung im Mietenquerschnitt nach Schichten (Deckschicht, Zwischenschicht und Kernzone)

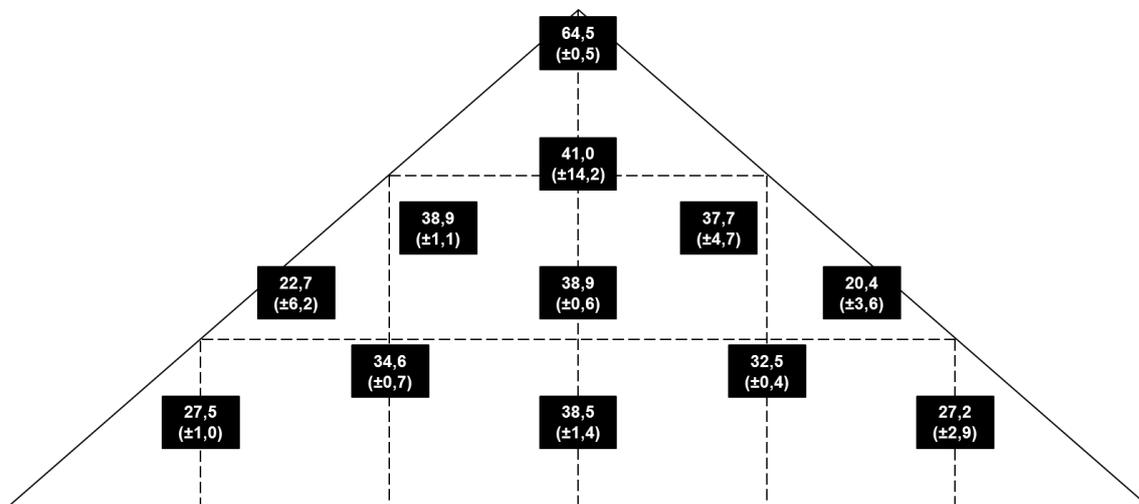


Abbildung 145: Mittlere Wassergehalte (± Standardabweichung) der ungesiebten Wrh-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt

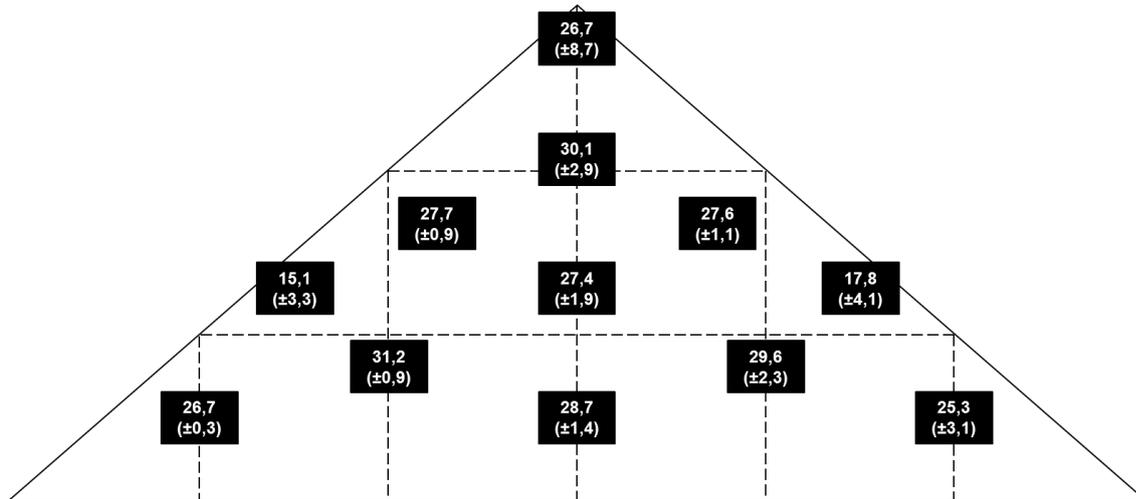


Abbildung 146: Mittlere Wassergehalte (± Standardabweichung) der gesiebten Wrh-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt

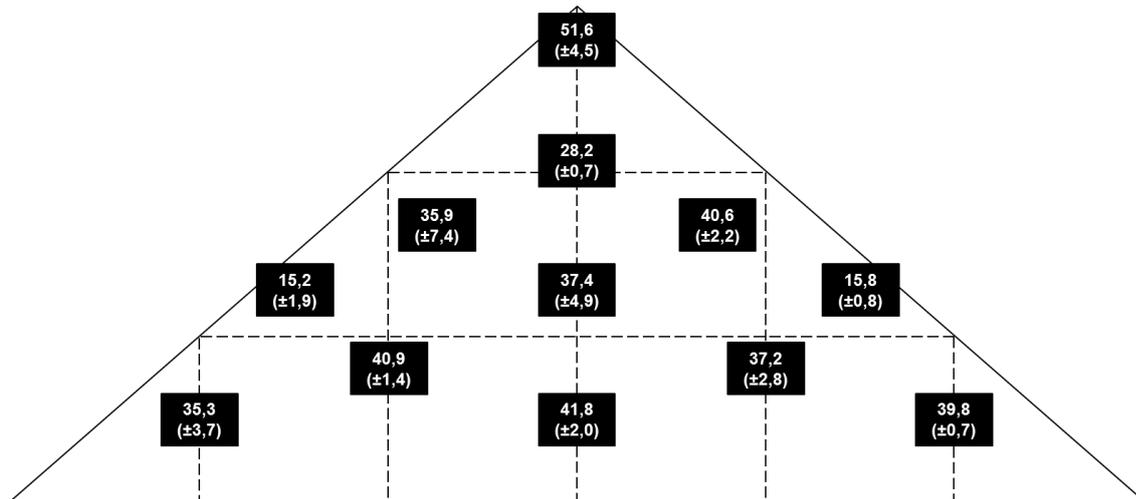


Abbildung 147: Mittlere Wassergehalte (± Standardabweichung) der ungesiebten Er-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt

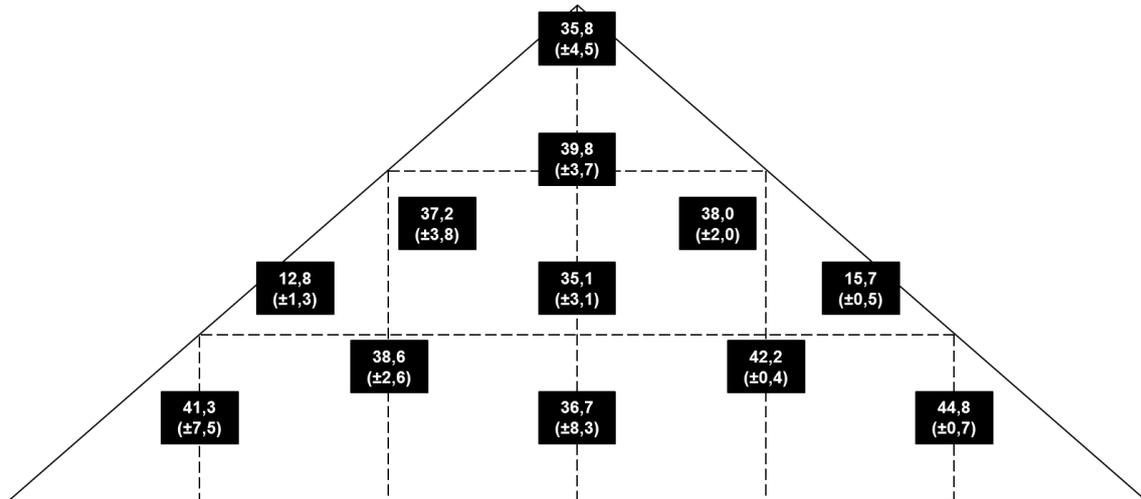


Abbildung 148: Mittlere Wassergehalte ( $\pm$  Standardabweichung) der gesiebten Er-Hackschnitzel nach 22 Wochen Lagerung im Mietenquerschnitt

### Anhang C: Herleitung der Berechnungsintensität

Die Berechnungsintensität der Holzhackschnitzel für die Sickerwasseruntersuchungen (Kapitel 13) wurde mithilfe eines Vorversuchs, der Auswertung einer Niederschlagszeitreihe und unter Verwendung der Definitionen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) berechnet und bestimmt.

Zuerst wurde das Verhältnis aus Volumen der potenziell durchsickerten Hackschnitzel (Deckschicht, 25 cm Mächtigkeit) zur Oberfläche (orthogonale Grundrissprojektion) in einer 3 m hohen, 6 m breiten und 10 m langen Beispielmiete berechnet. Es wurde hierbei aus Gründen der Vereinfachung nur das horizontale Mittelstück ohne die beiden Enden berücksichtigt:

$$\begin{aligned} \text{Volumen Deckschicht:} & & (10 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 6 \text{ m} \div 2) - (10 \text{ m} \times 2,75 \text{ m} \times 5,5 \div 2) \\ & & = 14,38 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Oberfläche (Aufsicht):} \quad 10 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 60 \text{ m}^2$$

$$\text{Verhältnis V/O:} \quad 0,24$$

Die gleiche Berechnung wurde für die Kunststofffässer durchgeführt:

$$\text{Volumen Fass:} \quad 0,22 \text{ m}^3 \text{ (Herstellerangabe)}$$

$$\text{Querschnittsfläche:} \quad \pi \times (0,58 \text{ m} \div 2)^2 = 0,26 \text{ m}^2$$

$$\text{Verhältnis V/Q:} \quad 0,83$$

Dies bedeutet: Um das gleiche Berechnungs- zu Holzhackschnitzelvolumenverhältnis bei den Fässern wie im Freiland zu erreichen, muss die natürliche Niederschlagsmenge mit dem Faktor 3,46 ( $0,83 \div 0,24$ ) multipliziert werden. Gleichzeitig muss für die Umrechnung von Millimeter Niederschlag zu Liter Berechnungsmenge die Querschnittsfläche des Fasses von  $0,26 \text{ m}^2$  berücksichtigt werden, weshalb die Umrechnung im Ergebnis zu annähernd gleichen Zahlen führte.

Die Berechnungsmenge der Fässer sollte in der einen Variante einem relativ schwachen Niederschlag entsprechen, der aber noch zu einem für die Laboranalysen ausreichenden Sickerwasseranfall (mind. 1,5 l) führt, und in der anderen Variante einem starken, aber auch in der Realität noch regelmäßig vorkommenden Niederschlag.

Bei einem Vorversuch mit Waldrestholzhackschnitzeln (WG ca. 45 m-%) führte eine Berechnungsmenge von 3 l zu einer Sickerwassermenge von 163 ml (Tabelle 69). Da während der Versuchsreihe mit höheren Wassergehalten in der Deckschicht und somit höherer Durchsickerungsmenge gerechnet wurde und in der Natur Niederschlagsereignisse mit einer je höheren Häufigkeit auftreten, desto schwächer sie sind, wurde sich bei der schwachen Berechnung für eine Berechnungsmenge von 2,3 l entschieden. Dies entspricht einem Niederschlag von 2,5 mm und liegt somit laut der Definition des DWD an der Grenze zwischen leichtem und mäßigem Niederschlag (Tabelle 69). Ein Ereignis mit ei-

ner Niederschlagsintensität von 1,7 bis 3,3 mm/h ( $\pm \frac{1}{3}$  der Grenze leichter/mäßiger Regen laut DWD) kommt gemäß einer Auswertung von Langzeitmessdaten des DWD am Versuchsstandort im Mittel ca. sechsmal pro Monat vor [25].

*Tabelle 69: Ergebnisse der Vorversuchsreihe zur künstlichen Beregnung von Waldrestholzhackschnitzeln (WG ca. 45 m-%) in 220-l-Kunststofffässern*

	Fass 1	Fass 2	Fass 3	Fass 4
Beregnungsmenge in ml	3000	6000	6000	12 000
Sickerwassermenge direkt nach Beregnungsende in ml	100	1240	900	4480
Zus. Sickerwassermenge 0,5 h nach Beregnungsende in ml	60	230	300	425
Zus. Sickerwassermenge 1 h nach Beregnungsende in ml	3	5	20	70
Summe Sickerwasser in ml	163	1475	1220	4975
Anteil durchgesickertes Wasser in %%	5,4	24,6	20,3	41,5

Bei der starken Beregnung wurde sich für eine Beregnungsmenge von 9,2 l entschieden, da dies umgerechnet einem 10-mm-Niederschlag entsprechen würde, der laut der Definition des DWD an der Grenze zwischen mäßigem und starkem Niederschlag liegt. Ein Ereignis mit einer Niederschlagsintensität von 6,7 bis 13,3 mm/h ( $\pm \frac{1}{3}$  der Grenze mäßiger/starker Regen laut DWD) kommt gemäß einer Auswertung von Langzeitmessdaten des DWD am Versuchsstandort noch ca. 0,4 Mal pro Monat, also alle zweieinhalb Monate einmal vor [25]. Die Beregnungsintensität weiter zu erhöhen, hätte aufgrund der Seltenheit solcher Ereignisse und somit Praxisferne keinen Sinn ergeben.

*Tabelle 70: Klassifizierung von Niederschlagsintensitäten (Regen) gemäß dem Deutschen Wetterdienst [23]*

Niederschlagsintensität	Niederschlagshöhe in 60 min (mm)	Niederschlagshöhe in 10 min (mm)
leicht	< 2,5	< 0,5
mäßig	≥ 2,5 bis < 10,0	≥ 0,5 bis < 1,7
stark	≥ 10,0	≥ 1,7
sehr stark	≥ 50,0	≥ 8,3

**Anhang D: Elementgehalt der Holzhackschnitzelproben aus Kapitel 13**

**Tabelle 71:** Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasser- versuche (Teil 1) (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Be- zugsbasis)

	Aluminium in mg kg <sup>-1</sup>	Antimon in µg kg <sup>-1</sup>	Barium in µg kg <sup>-1</sup>	Beryllium in µg kg <sup>-1</sup>	Bismut in µg kg <sup>-1</sup>
Wrh	168,9	24,4	17 574	4,5	6,2
Einlagerung	$\pm 24,2$	$\pm 3,9$	$\pm 2969,9$	$\pm 0,9$	$\pm 1,0$
Wrh	265,5	33,8	16 800	7,5	7,8
Auslagerung	$\pm 38,0$	$\pm 5,7$	$\pm 1460,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,7$
Er	48,8	5,0	20 774	1,9	0,9
Einlagerung	$\pm 14,8$	$\pm 1,1$	$\pm 4732,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Er	44,6	6,1	19 330	2,3	1,0
Auslagerung	$\pm 6,4$	$\pm 1,0$	$\pm 2622,7$	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$

**Tabelle 72:** Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasser- versuche (Teil 2) (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Be- zugsbasis)

	Bor in µg kg <sup>-1</sup>	Calcium in mg kg <sup>-1</sup>	Eisen in mg kg <sup>-1</sup>	Kalium in mg kg <sup>-1</sup>	Kobalt in µg kg <sup>-1</sup>
Wrh	2439,2	5867,0	128,4	1545,0	96,1
Einlagerung	$\pm 514,8$	$\pm 1046,6$	$\pm 17,3$	$\pm 210,9$	$\pm 15,2$
Wrh	2093,0	7939,8	198,7	958,5	128,7
Auslagerung	$\pm 530,5$	$\pm 1244,0$	$\pm 30,9$	$\pm 133,5$	$\pm 21,5$
Er	1438,	1892,2	33,7	692,7	134,4
Einlagerung	$\pm 351,2$	$\pm 379,2$	$\pm 8,5$	$\pm 85,9$	$\pm 23,5$
Er	1423,3	1853,6	34,3	462,4	115,2
Auslagerung	$\pm 309,4$	$\pm 209,8$	$\pm 4,1$	$\pm 28,1$	$\pm 19,3$

**Tabelle 73:** Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasser- versuche (Teil 3) (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Be- zugsbasis)

	Magnesium in mg kg <sup>-1</sup>	Mangan in mg kg <sup>-1</sup>	Molybdän in µg kg <sup>-1</sup>	Natrium in µg kg <sup>-1</sup>	Phosphor in mg kg <sup>-1</sup>
Wrh	730,5	10,8	345,9	27 156,0	152,1
Einlagerung	$\pm 118,3$	$\pm 1,9$	$\pm 321,8$	$\pm 7897,7$	$\pm 22,8$
Wrh	1.222,6	16,4	191,7	18 538,0	156,3
Auslagerung	$\pm 257,1$	$\pm 4,0$	$\pm 54,1$	$\pm 7083,2$	$\pm 25,3$
Er	260,4	286,3	61,7	8283,0	73,9
Einlagerung	$\pm 33,2$	$\pm 42,8$	$\pm 58,6$	$\pm 5887,9$	$\pm 6,4$
Er	260,3	270,6	84,3	6474,4	62,9
Auslagerung	$\pm 19,6$	$\pm 27,8$	$\pm 67,8$	$\pm 970,9$	$\pm 8,1$

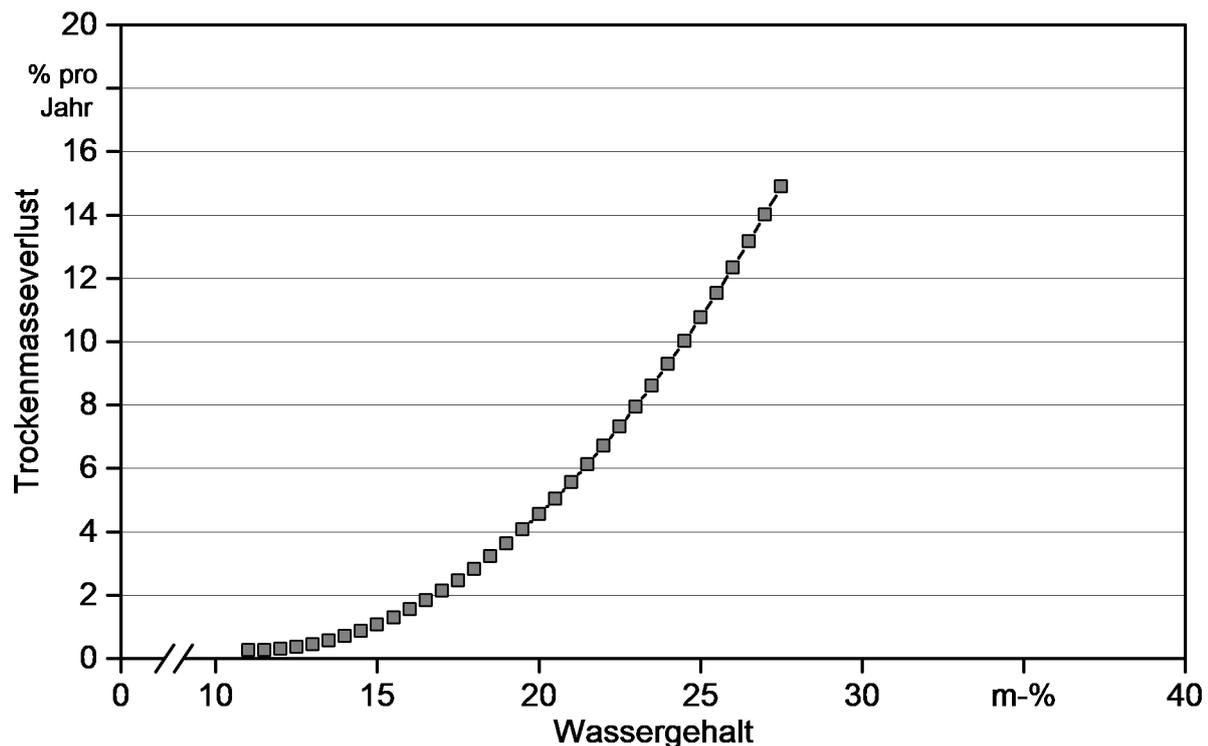
**Tabelle 74:** Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasser- versuche (Teil 4) (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Be- zugsbasis)

	Rubidium in µg kg <sup>-1</sup>	Selen in µg kg <sup>-1</sup>	Strontium in µg kg <sup>-1</sup>	Thallium in µg kg <sup>-1</sup>	Titan in µg kg <sup>-1</sup>
Wrh	1658,6	15,2	41 022,0	7,1	14 668,0
Einlagerung	$\pm 290,3$	$\pm 2,6$	$\pm 10 251,9$	$\pm 1,3$	$\pm 6500,7$
Wrh	1179,1	22,1	32 338,0	7,3	16 453,6
Auslagerung	$\pm 181,5$	$\pm 4,0$	$\pm 3853,0$	$\pm 1,0$	$\pm 10 064,1$
Er	5268,6	8,2	10 157,2	16,6	8796,8
Einlagerung	$\pm 1182,3$	$\pm 1,6$	$\pm 3225,7$	$\pm 4,8$	$\pm 4638,6$
Er	3114,0	8,7	7010,4	15,1	6509,2
Auslagerung	$\pm 113,1$	$\pm 1,5$	$\pm 697,3$	$\pm 3,0$	$\pm 3549,7$

**Tabelle 75:** Spurenelement- und Schwermetallgehalt der nicht in DIN EN ISO 17225-4 gelisteten Elemente in den Hackschnitzelproben für die Sickerwasser- versuche (Teil 5) (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung, wasserfreie Be- zugsbasis)

	Uran in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Vanadium in $\mu\text{g kg}^{-1}$	Zinn in $\text{mg kg}^{-1}$
Wrh Einlagerung	19,0 $\pm 3,2$	317,3 $\pm 32,9$	96,3 $\pm 18,3$
Wrh Auslagerung	37,2 $\pm 6,9$	478,4 $\pm 84,0$	70,8 $\pm 11,5$
Er Einlagerung	3,9 $\pm 1,5$	73,2 $\pm 23,4$	33,1 $\pm 9,6$
Er Auslagerung	2,8 $\pm 0,6$	69,8 $\pm 8,1$	25,6 $\pm 6,8$

#### Anhang E: Kapitel 10 – Trockenmasseverlust und Wassergehalt – Ergänzung



**Abbildung 149:** Rechnerischer Trockenmasseverlust in Prozent pro Jahr bei verschiedenen Wassergehalten der Waldrestholz hackschnitzel und einer Lagerungstemperatur von  $21 \pm 2$  °C. Es wurden hierbei nur die ersten sechs Wochen der Lagerung mit einer überdurchschnittlich starken Sauerstoff- abnahme berücksichtigt, weshalb die Extrapolation auf ein Jahr zu hohe Trockenmasseverlustwerte liefert.

## 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 Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse 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 – Marktbetrachtungen, 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 Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstanduntersuchungen 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 Prüfstanduntersuchungen
- 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 bayerische 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
- 56 Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
- 57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
- 58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
- 59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapsverarbeitung in Bayern
- 60 Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
- 61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
- 62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
- 63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
- 64 Amarant als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung – Stand und Entwicklungen
- 69 Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel



