

82

Berichte aus dem TFZ

Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex- Schneckenhacker

Projektpartner:



Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex- Schneckenhacker



Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker

Simon Lesche
Daniel Kuptz
Fabian Nebel
Florian Empl
Michael Russ
Claudia Schön
Stefan Pelz
Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 82

Straubing, Mai 2023

| | | |
|-----------------------|---|--|
| Titel: | Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker | |
| Projektleiter: | Dr. Daniel Kuptz (TFZ) | Prof. Dr. Stefan Pelz (HFR) |
| Autoren: | Simon Lesche (TFZ) Dr. Daniel Kuptz (TFZ) Fabian Nebel (TFZ) Claudia Schön (TFZ) Dr. Hans Hartmann (TFZ) | Florian Empl (HFR) Michael Russ (HFR) Prof. Dr. Stefan Pelz (HFR) |
| Mitarbeiter: | Albert Maierhofer (TFZ) Robert Mack (TFZ) Stephan Winter-Thoma (TFZ) Elisabeth Rist (TFZ) Anja Rocktäschel (TFZ) Thomas Kießlinger (TFZ) Alexander Marks (TFZ) Sebastian Kirner (TFZ) Tobias Rohrmaier (TFZ) Daniel Fera (TFZ) Katharina Gruber (TFZ) Felix Dötsch (TFZ) | Sebastian Paczkowski (HFR) Gregor Sailer (HFR) Victoria Knappe (HFR) Jan Springorum (HFR) |

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter den Förderkennzeichen 22016717 und 22023217 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.10.2018 bis zum 31.03.2022. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2023

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
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Simon Lesche, Daniel Kuptz, Fabian Nebel, Florian Empl, Michael Russ, Claudia Schön, Stefan Pelz, Hans Hartmann, Anna Grundner
Gestaltung: Simon Lesche, Daniel Kuptz, Fabian Nebel, Florian Empl, Robert Mack
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2023

Fotos: Tobias Hase (Titelbild, Abbildung 2 rechts), restliche TFZ

Danksagung

Der vorliegende Bericht zum Forschungsvorhaben „Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe“ (InnoFuels) umfasst die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen, die über den Zeitraum von über drei Jahren durch das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) in Kooperation mit der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (HFR) durchgeführt wurden.

Besonderer Dank gilt:

- der Firma Alvatec GmbH & Co. KG, namentlich Herrn Christian Albersinger, für die Bereitstellung des Effiters 20.30 sowie für die Unterstützung bei den Versuchen,
- dem Zentrum für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten AöR, namentlich Frau Annika Sander und Herrn Maximilian Riezler, für die Unterstützung bei der Beschaffung geeigneter Brennstoffe,
- den Herstellern der bei den Verbrennungsversuchen verwendeten Hackschnitzelkessel für die Bereitstellung entsprechender Anlagen und
- dem Betreiber des bei den Versuchen 2020 genutzten Holzgas-BHKW.

Die Studie wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) auf Beschluss des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 22016717 und 22023217 gefördert. Die Administration der Mittel erfolgte über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Abstract (deutsch)

In den Jahren 2019 und 2020 wurden Hackversuche mit einem neuartigen Duplex-Schneckenhacker (Effiter 20.30) und einem Referenz-Trommelhacker ähnlicher Leistungsklasse am TFZ durchgeführt. Zunächst kamen fünf Holzsortimente zum Einsatz. Der Effiter 20.30 zeigte niedrigere Durchsatzraten und einen höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch als der Referenzhacker, vermutlich aufgrund geringer Unterschiede in der Hackergrößenklasse. Er produzierte sehr grobe Partikel („Effits“) mit vorgebrochener Partikelstruktur und deutlich geringeren Feinanteilen. Die Effits verbesserten die natürliche Trocknung bei der fünfmonatigen Lagerung in Lagerbehältern sowie in kleinen Lagerhaufwerken und führten zu geringeren Trockenmasseverlusten. Sie zeigten niedrigere Belüftungswiderstände bei der technischen Trocknung im Vergleich zur Referenz auf und konnten insgesamt effizienter in Satztrockneranlagen getrocknet werden. Ihr Transport in herkömmlichen Förderschnecken war aber energieaufwendiger und führte zum weiteren Aufbrechen der Partikel. Bei Verbrennungsversuchen in zwei Hackschnitzelkesseln < 100 kW zeigten sich keine deutlichen Unterschiede zwischen Effits und Referenz bezüglich der bei der Verbrennung frei werdenden Emissionen (CO, NO_x, Gesamtstaub).

Im Jahr 2020 wurden Versuche im industriellen Maßstab mit beiden Hackern durchgeführt. Hierfür wurde Energierundholz aus Fichte verwendet. Der Effiter 20.30 schnitt im Vergleich zum stationären Versuch 2019 aufgrund von Anpassungen an der Duplex-Schnecke besser ab. Dies führte zu nur geringen Unterschieden in der Partikelgrößenverteilung zwischen Effits und Referenzhackschnitzeln. In der Folge zeigten sich bei einer fünfmonatigen Freilandlagerung in Haufwerken kaum Unterschiede hinsichtlich Qualitätsveränderungen oder Trockenmasseverlusten. Bei Vergasungsversuchen in einem dezentralen Holzgas-BHKW wurden Leistungsdaten und Prozessparameter der Anlage erhoben. Insgesamt zeigten die Effits höhere Gesamt-Anlagenwirkungsgrade (68,5 %) im Vergleich zum Referenzbrennstoff (64,4 %) sowie erhöhte Reformertemperaturen und einen niedrigeren Reformertdruck. Insgesamt könnten die mit dem Effiter 20.30 hergestellten Brennstoffe vor allem für private Waldbesitzer mit einem hohen Anspruch an die Brennstoffqualität und einem eingeschränkten Zugang zu technischen Trocknungsanlagen eine interessante Alternative zur konventionellen Hackschnitzelproduktion darstellen.

Abstract (englisch)

During 2019 and 2020, chipping trials were performed at TFZ with a novel duplex-spiral chipper (Effiter 20.30) and a reference drum chipper using five different wood assortments. The Effiter 20.30 showed lower throughput rates and higher specific fuel consumption compared to the reference, presumably due to small differences in chipper size class. It produced very coarse particles (“Effits”) with a pre-broken particle structure and significantly lower fines. The Effits improved natural drying during five-month storage trials in containers and small piles leading to lower dry matter losses. They showed lower air pressure resistances during ventilation and could be dried more efficiently in batch drying systems. Their transport in conventional screw conveyors was more energy-consuming compared to the reference and led to further breaking of the particles. During combustion trials in two small-scale boilers < 100 kW, no clear differences between Effits and reference fuels could be observed regarding emissions (CO, NO_x, TPM).

During 2020, industrial-scale trials were performed with both chippers using stemwood of Norway spruce. The Effiter 20.30 performed better compared to 2019 due to adjustments to the spiral. This led to only minor differences in the particle size distribution between Effits and reference. As a result, there were hardly any differences in terms of fuel quality changes or dry matter losses during five months of outdoor storage in piles. During gasification trials in a decentralized wood-gas CHP plant, performance data and process parameters were measured. The Effits showed higher plant efficiencies (68.5 %) compared to the reference (64.4 %) as well as increased reformer temperatures and lower reformer pressure. Overall, the Effits could represent an interesting alternative to conventional wood chips, especially for private forest owners with high demands on fuel quality and limited access to technical drying systems.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abstract (deutsch) | 7 |
| Abstract (englisch) | 8 |
| Abbildungsverzeichnis | 11 |
| Tabellenverzeichnis | 19 |
| 1 Einleitung und Problemstellung | 21 |
| 2 Zielstellung des Projekts | 23 |
| 3 Stationäre Versuche mit dem Effiter 20.30 | 25 |
| 3.1 Material und Methoden | 25 |
| 3.1.1 Verwendete Hackmaschinen | 25 |
| 3.1.2 Rohmaterialien..... | 27 |
| 3.1.3 Zerkleinerung..... | 29 |
| 3.1.4 Probennahme, Probenaufbereitung und Brennstoffanalyse..... | 32 |
| 3.1.5 Lagerungsversuche | 39 |
| 3.1.5.1 Behälterversuche..... | 40 |
| 3.1.5.2 Versuche in Haufwerken..... | 42 |
| 3.1.6 Technische Brennstofftrocknung..... | 44 |
| 3.1.7 Belüftungswiderstand..... | 47 |
| 3.1.8 Förderbarkeit | 51 |
| 3.1.9 Feuerungsversuche | 53 |
| 3.1.9.1 Prüfstands Aufbau und Messdurchführung am TFZ..... | 53 |
| 3.1.9.2 Prüfstands Aufbau und Messdurchführung an der HFR..... | 55 |
| 3.1.10 Statistische Auswertungen..... | 56 |
| 3.2 Ergebnisse und Diskussion | 57 |
| 3.2.1 Zerkleinerung..... | 57 |
| 3.2.1.1 Prozessparameter..... | 58 |
| 3.2.1.2 Brennstoffqualität | 60 |
| 3.2.2 Lagerungsversuche | 71 |
| 3.2.2.1 Behälterlagerung..... | 71 |
| 3.2.2.2 Lagerung im Haufwerk..... | 82 |
| 3.2.3 Technische Brennstofftrocknung..... | 87 |
| 3.2.4 Belüftungswiderstand..... | 89 |
| 3.2.4.1 Experimentelle Messung des spezifischen Belüftungswiderstands..... | 89 |
| 3.2.4.2 Modellierung des Belüftungswiderstands..... | 91 |
| 3.2.5 Förderbarkeit der Brennstoffe | 96 |
| 3.2.5.1 Förderbarkeit | 96 |
| 3.2.5.2 Veränderung der Brennstoffqualität durch die Förderung | 99 |
| 3.2.6 Beurteilung der Brennstoffe nach DIN EN ISO 17225-4 und nach ENplus..... | 104 |
| 3.2.7 Feuerungsversuche | 108 |
| 3.3 Zusammenfassung | 119 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4 | Versuche im industriellen Maßstab..... | 121 |
| 4.1 | Material und Methoden | 121 |
| 4.1.1 | Rohmaterial..... | 121 |
| 4.1.2 | Zerkleinerung | 122 |
| 4.1.3 | Lagerung im Haufwerk | 123 |
| 4.1.4 | Technische Trocknung | 125 |
| 4.1.5 | Vergasung in einem Holzgas-BHKW..... | 126 |
| 4.2 | Ergebnisse und Diskussion | 128 |
| 4.2.1 | Zerkleinerung | 128 |
| 4.2.2 | Lagerung im Haufwerk | 133 |
| 4.2.3 | Technische Trocknung..... | 138 |
| 4.2.4 | Vergasung in einem Holzgas-BHKW..... | 139 |
| 4.3 | Zusammenfassung..... | 143 |
| | Zusammenfassung | 145 |
| | Quellenverzeichnis | 147 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Effiter 20.30 mit trichterförmiger Brennstoffzuführung und Auswurfkamin („Puls-Craft-Austragung“) | 25 |
| Abbildung 2: | Das Zerkleinerungsaggregat des Effiters 20.30 aus Sicht der Revisionsklappe (links) mit steiler Zylinderschnecke (A) und flacher Planschnecke (B) sowie mit dem Hacker produzierte Effits (rechts) | 26 |
| Abbildung 3: | Rohmaterialien im ungehackten Zustand (oben links: Pappel aus einer Kurzumtriebsplantage; oben Mitte: Energierundholz aus Fichte; oben rechts: Energierundholz aus Buche; unten links: Waldrestholz aus Nadelholz; unten rechts: Waldrestholz aus Nadelholz) | 28 |
| Abbildung 4: | Messaufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs des Schleppers | 30 |
| Abbildung 5: | Bei den stationären Versuchen mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker erzeugten Brennstoffe in identischen Holzrahmen (320 × 245 mm Außenmaß); links: Effits; rechts: Referenzbrennstoffe; von oben nach unten: Pappel, Energierundholz aus Fichte, Energierundholz aus Buche | 31 |
| Abbildung 6: | Bei den stationären Versuchen mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker erzeugten Brennstoffe in identischen Holzrahmen (320 × 245 mm Außenmaß); links: Effits; rechts: Referenzbrennstoffe; von oben nach unten: Waldrestholz aus Nadelholz und Waldrestholz aus Laubholz | 32 |
| Abbildung 7: | Schematischer Aufbau der Bildanalyse am TFZ | 36 |
| Abbildung 8: | Messprinzip der Bildanalyse (Beispiel): Bestimmung des minimalen Feret-Durchmessers, der maximalen Partikellänge und des Kornformfaktors eines Partikels anhand des Schattenrisses [58] | 37 |
| Abbildung 9: | Beispiel für die Berechnung des Medianwerts sowie der 25%- und der 75%-Quantile der Partikellängenverteilung aus der Bildanalyse | 38 |
| Abbildung 10: | Lagerbehälter mit Dämmplatten ausgekleidet und mit perforiertem Boden (Füllvolumen = 0,6 m ³) | 40 |
| Abbildung 11: | Standort der Lagerbehälter während der fünfmonatigen Lagerdauer in einem wind- und regengeschützten Außenlager | 41 |
| Abbildung 12: | Schematischer Aufbau der Lagerhaufwerke mit einem Volumen von etwa 15 SRM (links: einer der drei Querschnitte mit der Platzierung der Bilanzbeutel; rechts: drei Querschnitte im Haufwerk; die roten Punkte markieren die Position der Thermofühler) | 42 |
| Abbildung 13: | Noch nicht abgedeckte Versuchsmiete aus Effits, mit Bilanzbeuteln und Temperaturloggern (nicht sichtbar) versehen (links). Wiegen eines befüllten Bilanzbeutels vor dem Einbringen in die Miete (rechts) | 43 |
| Abbildung 14: | Schematischer Aufbau der Trocknungsversuche im Batchverfahren mit einer angeschlossenen Satzrocknerbox | 44 |
| Abbildung 15: | Aufbau der Brennstofftrocknung des TFZ | 45 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 16: | Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Belüftungswiderstands..... | 48 |
| Abbildung 17: | Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Förderbarkeit | 51 |
| Abbildung 18: | Versuchsaufbau für die Messungen am Hackschnitzelkessel auf dem Feuerungsprüfstand des TFZ | 54 |
| Abbildung 19: | Spezifische, massenbezogene Durchsatzraten des jeweiligen Hackers und spezifischer Kraftstoffverbrauch (Diesel) des Antriebsschleppers bei den stationären Versuchen 2019 mit dem Effiter 20.30 und einem Referenzhacker (n = 1; wf = wasserfreie Bezugsbasis)..... | 58 |
| Abbildung 20: | Wassergehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert ± Standardabweichung; n = 10; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** p ≤ 0,01; Mann-Whitney-Test)..... | 60 |
| Abbildung 21: | Schüttdichten der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (angegeben auf wasserfreier Bezugsbasis, Mittelwert ± Standardabweichung; n = 5; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; t-Test und Mann-Whitney-Test)..... | 61 |
| Abbildung 22: | Feinanteil (Partikel ≤ 3,15 mm Durchmesser) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert ± Standardabweichung, n = 3; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** p ≤ 0,01; t-Test und Mann-Whitney-Test)..... | 62 |
| Abbildung 23: | Langlöcher im Querförderer des Effiters 20.30 (links) und durch die Langlöcher abgeschiedener Feinanteil nach der Zerkleinerung von Pappelholz, der rückseitig aus dem Effiter 20.30 abgeschieden wird (rechts)..... | 63 |
| Abbildung 24: | Anteil der Partikel mit einem Durchmesser ≥ 31,5 mm in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert ± Standardabweichung, n = 3; * zeigt signifikante Unterschiede an; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; t-Test und Mann-Whitney-Test)..... | 64 |
| Abbildung 25: | Kornformfaktoren der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (berechnet aus den Daten der Bildanalyse, n = 1)..... | 66 |
| Abbildung 26: | Länge-zu-Breite-Verhältnis der Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung (berechnet aus den Daten der Bildanalyse, n = 1)..... | 67 |
| Abbildung 27: | Aschegehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (wasserfreier Zustand; Mittelwert ± Standardabweichung; n = 5). Der Aschegehalt der Effits wurde anhand einer Mischprobe aus fünf Einzelproben bestimmt, somit fehlt hier die Standardabweichung. | 68 |
| Abbildung 28: | Heizwerte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (auf wasserfreier Bezugsbasis, Doppelbestimmung einer Mischprobe aus fünf Einzelproben)..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 29: Vom Hersteller des Effiters 20.30 angebotene, luftdurchlässige Trocknungs-Big-Bags zur Lagerung und natürlichen Trocknung der Effits | 71 |
| Abbildung 30: Tagesmittelwerte der Temperaturen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 und Umgebungslufttemperatur bei der Lagerung in Behältern über den gesamten Lagerzeitraum von 23 Wochen | 72 |
| Abbildung 31: Beispiel für den Verlauf der Behältergewichte anhand der Sortimente PA und WRH-L über die wiederkehrenden Wiegeungen der Behälter im Abstand von 21 Tagen (angegeben ist jeweils die absolute Masse des feuchten Brennstoffs) | 74 |
| Abbildung 32: Wassergehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (Mittelwert \pm Standardabweichung; n = 5; * zeigt signifikante Unterschiede an; *** p \leq 0,001, t-Test und Mann-Whitney-Test)..... | 75 |
| Abbildung 33: Schüttdichten der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (Mittelwert \pm Standardabweichung; n = 5; wasserfreie Bezugsbasis; * zeigt signifikante Unterschiede an; * p \leq 0,05; *** p \leq 0,001)..... | 76 |
| Abbildung 34: Trockenmasseverluste der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach der Lagerung in Behältern (Lagerdauer ca. 160 Tage, n = 1, berechneter negativer Trockenmasseverlust bei ERH-F-E fand keinen Eingang in die Grafik)..... | 77 |
| Abbildung 35: Aschegehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (wasserfreie Bezugsbasis, Mittelwert \pm Standardabweichung, Effits bei Einlagerung: n = 1; Referenz bei Einlagerung: n = 5; gelagertes Material: n = 3; * zeigt signifikante Unterschiede an; * p \leq 0,05; ** p \leq 0,01; t-Test and Mann-Whitney-Test)..... | 79 |
| Abbildung 36: Energieinhalt (absolut) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach der Lagerung in Behältern (n = 1; * = errechneter „Trockenmassezugewinn“ bei ERH-F-E führt zu Werten > 100 %)..... | 80 |
| Abbildung 37: Kumulierter Massenanteil in den Partikelgrößenfraktionen der jeweiligen Brennstoffpaare aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (n = 3)..... | 81 |
| Abbildung 38: Tagesmitteltemperaturen der Haufwerke aus den Brennstoffen 2019, gemittelt über jeweils zwei Temperatursensoren aus dem Kern der Haufwerke, sowie Umgebungstemperatur über den gesamten Lagerungszeitraum vom 15.04.2019 bis 24.09.2019 | 83 |
| Abbildung 39: Mittlere Wassergehalte und Schwankungsbreite der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Haufwerken (n = 12; * zeigt signifikante Unterschiede an; * p \leq 0,05; ** p \leq 0,01; *** p \leq 0,001)..... | 84 |
| Abbildung 40: Mittlere Wassergehalte (links) und mittlere Trockenmasseverluste (rechts) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in m-% an den jeweiligen Positionen im Haufwerk zum Zeitpunkt der Auslagerung (Mittelwert aus drei Querschnitten \pm Standardabweichung, n = 3) | 84 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 41: Mittlere Trockenmasseverluste der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in den Haufwerken über die gesamte Lagerdauer (n = 12, rechnerisch negative Werte für Trockenmasseverluste fanden keinen Eingang in die Darstellung)..... | 86 |
| Abbildung 42: Kumulierter Massenanteil der Partikelfractionen der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Haufwerken (Mittelwert, n = 9)..... | 87 |
| Abbildung 43: Wirkungsgrade der Trocknungsversuche mit den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 an der Satz-trocknungsanlage des TFZ (unter Berücksichtigung des Energieaufwands für Heizregister und Gebläse; Betrachtungsbereich von 30 m-% auf 20 m-% Wassergehalt; n = 1; Ausfall der Messtechnik bei PA-Referenz)..... | 88 |
| Abbildung 44: Belüftungswiderstände der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in Pa/m bezogen auf die Strömungsgeschwindigkeit der durchströmenden Luft (n = 2) | 90 |
| Abbildung 45: Kumulierte geförderte Masse (wasserfreie Bezugsbasis) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 im Förderungsprüfstand des TFZ über den gesamten Zeitraum eines Förderzyklus von 100 % bis 10 % der maximalen Förderleistung (n = 1)..... | 96 |
| Abbildung 46: Fördermengen in kg/h (wasserfreie Bezugsbasis) der jeweiligen Brennstoffe aus den Versuchen 2019 für Förderraten von 100 % und 50 % der maximalen Förderleistung (n = 1)..... | 97 |
| Abbildung 47: Massenanteil der Partikel > 31,5 mm, die vor und nach den Förderungsversuchen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 enthalten sind (n = 1)..... | 100 |
| Abbildung 48: Massenanteil der Partikel ≤ 8 mm, die vor und nach den Förderungsversuchen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 enthalten sind (n = 1)..... | 101 |
| Abbildung 49: Kumulierte Massenanteile der Partikelgrößenverteilung in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 vor und nach der Förderung (n = 1)..... | 102 |
| Abbildung 50: Kornformfaktoren der jeweiligen Brennstoffe vor und nach der Förderung, berechnet anhand von Daten der Bildanalyse (n = 1)..... | 103 |
| Abbildung 51: Länge-zu-Breite-Verhältnis der jeweiligen Brennstoffe vor und nach der Förderung, berechnet anhand von Daten der Bildanalyse (n = 1) . | 103 |
| Abbildung 52: Mittlere CO-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an: *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe) | 109 |
| Abbildung 53: Mittlere CO-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe) | 109 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 54: | Mittlere Org.-C-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)..... | 110 |
| Abbildung 55: | Lineare Regression zwischen den Org.-C-Emissionen und dem Wassergehalt der Brennstoffe am TFZ-Kessel (n = 12) | 111 |
| Abbildung 56: | Mittlere NO _x -Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe) | 112 |
| Abbildung 57: | Mittlere NO _x -Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)..... | 112 |
| Abbildung 58: | Lineare Regression zwischen den NO _x -Emissionen und dem Stickstoffgehalt der Brennstoffe bei den Versuchen am TFZ (n = 12) . | 113 |
| Abbildung 59: | Lineare Regression zwischen den NO _x -Emissionen und dem Stickstoffgehalt der Brennstoffe bei den Versuchen an der HFR (n = 12)..... | 114 |
| Abbildung 60: | Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)..... | 115 |
| Abbildung 61: | Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)..... | 115 |
| Abbildung 62: | Lineare Regression zwischen den Gesamtstaubemissionen und der Summe aerosolbildender Elemente der Brennstoffe bei den Versuchen am TFZ (n = 12) | 116 |
| Abbildung 63: | Lineare Regression zwischen den Gesamtstaubemissionen und der Summe aerosolbildender Elemente der Brennstoffe bei den Versuchen an der HFR (n = 12) | 117 |
| Abbildung 64: | Mittlere SO _x -Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; * p ≤ 0,05; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)..... | 118 |
| Abbildung 65: | Wirkungsgrade des Kessels bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (n = 1, gemittelt über den gesamten Versuchszeitraum; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe) | 119 |
| Abbildung 66: | Kleiner Teil des genutzten Rohmaterials am Ort des Anfalls für die Versuche im industriellen Maßstab 2020..... | 121 |
| Abbildung 67: | Aufbau der Haufwerksquerschnitte mit den genauen Positionen der Bilanzbeutel je Querschnitt für die Versuche im industriellen Maßstab 2020 | 123 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 68: Aufbau des gesamten, 11 m langen Haufwerks mit den drei Querschnitten und den Positionen der vier Thermofühler für die Versuche im industriellen Maßstab 2020 | 124 |
| Abbildung 69: Trocknung der Brennstoffe mit Abwärme des Holzgas-BHKW bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 | 126 |
| Abbildung 70: Durchsatzrate bei der Zerkleinerung in t/h sowie spezifischer Kraftstoffverbrauch in l/t (jeweils auf wasserfreier Bezugsbasis) bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 | 129 |
| Abbildung 71: Schwankungsbreite der Wassergehalte der jeweiligen Brennstoffe aus den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 direkt nach der Zerkleinerung (n = 36; Mittelwert zusätzlich als Zahlenwert genannt; *** zeigt signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,001$ an; t-Test) | 131 |
| Abbildung 72: Kumulierte Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (n = 9)..... | 132 |
| Abbildung 73: Tagesmitteltemperaturen der Haufwerke sowie der Umgebungsluft bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 über den gesamten Lagerungszeitraum von etwa 150 Tagen vom 10.06.2020 bis zum 17.11.2020..... | 133 |
| Abbildung 74: Mittlere Wassergehalte zum Zeitpunkt der Ein- und Auslagerung (Mittelwert \pm Standardabweichung; n = 36; *** zeigt signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,001$ an; t-Test und Mann-Whitney-Test)..... | 134 |
| Abbildung 75: Mittlere Wassergehalte an den jeweiligen Positionen in den Haufwerken bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (n = 3; grau gekennzeichnet: Wassergehaltszunahmen bzw. Mittelwerte, bei denen Wassergehaltszunahmen eingeflossen sind)..... | 135 |
| Abbildung 76: Schwankungsbreite der Trockenmasseverluste über den gesamten Zeitraum der Lagerung in den Haufwerken bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (n = 36; Mittelwert zusätzlich als Zahlenwerte genannt)..... | 136 |
| Abbildung 77: Kumulierter Massenanteil der Brennstoffe vor und nach der fünfmonatigen Lagerung im Haufwerk bei den Versuchen im industriellen Maßstab (n = 9) | 137 |
| Abbildung 78: Trocknerwirkungsgrade des TFZ-Satzrockners mit den Brennstoffen aus den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (n = 1)..... | 138 |
| Abbildung 79: Mittlere Reformertemperatur über den gesamten Versuchszeitraum von etwa 80 Stunden (etwa 3,5 Tage) bei der Nutzung der Effits und des zugehörigen Referenzbrennstoffs aus den industriellen Versuchen 2020 in einem Holzgas-BHKW | 139 |
| Abbildung 80: Differenzdruck am Produktgasfilter über einen repräsentativ ausgewählten Betrachtungszeitraum von 50 Minuten bei der Nutzung der Effits und der zugehörigen Referenzbrennstoffe in einem Holzgas-BHKW..... | 140 |

- Abbildung 81: Differenzdruck im Reformier über den gesamten Versuchszeitraum von 80 Stunden bei der Nutzung der Effits und der zugehörigen Referenzbrennstoffe in einem Holzgas-BHKW 141
- Abbildung 82: Wirkungsgrade des Holzgas-BHKW bei der Nutzung der Brennstoffe aus den Versuchen im industriellen Maßstab, aufgegliedert in den thermischen und den elektrischen Wirkungsgrad ($n = 1$)..... 142

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1: | Untersuchte Brennstoffe inklusive der Zerkleinerungsmethode und der verwendeten Brennstoffbezeichnung | 29 |
| Tabelle 2: | Beispiel für die Probennahme bei den Hackversuchen mit dem Effiter 20.30 und dem jeweiligen Referenzhacker: beprobte Parameter, angewendete Norm sowie Anzahl der Einzelproben..... | 33 |
| Tabelle 3: | Analysierte Inhaltsstoffe sowie verwendete Analysegeräte und Methoden | 39 |
| Tabelle 4: | Zeitpunkt der Ein- und Auslagerung der Behälterversuche und des Lagerhaufwerks sowie die jeweilige Lagerdauer im Jahr 2019..... | 39 |
| Tabelle 5: | Leistungseinstellungen bei der Bestimmung der Förderfähigkeit (jeder Leistungspunkt wurde 480-mal wiederholt, was einer Dauer von acht Minuten entspricht)..... | 52 |
| Tabelle 6: | Erzeugte Brennstoffmassen, -volumina und Arbeitskräfteeinsätze bei den stationären Hackversuchen 2019 mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker | 57 |
| Tabelle 7: | Einordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in die Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225-4:2021 | 65 |
| Tabelle 8: | Längenparameter der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (gemessen mittels Bildanalyseverfahren) | 66 |
| Tabelle 9: | Chemische Inhaltsstoffe (Nebenelemente) in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 nach der Zerkleinerung in m-% (N, Cl, S) und in mg/kg (Ca, K, Mg, Mn, Na) auf wasserfreier Bezugsbasis | 69 |
| Tabelle 10: | Chemische Inhaltsstoffe (Schwermetalle) in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 nach der Zerkleinerung in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis..... | 69 |
| Tabelle 11: | Trocknungsdauer der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in den Satzrocknerboxen des TFZ von 30 m-% auf 20 m-% in Stunden (Ausfall der Messtechnik bei PA-R)..... | 89 |
| Tabelle 12: | Regressionsparameter a und b, gefittet nach der Formel nach ERGUN für den spezifischen Belüftungswiderstand der Effits und der Referenzbrennstoffe aus den Versuchen 2019 inklusive zugehörigen Bestimmtheitsmaßes..... | 92 |
| Tabelle 13: | Spezifischer Belüftungswiderstand (in Pa/m) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019, berechnet anhand der gefitteten Parameter a und b nach ERGUN in Abhängigkeit der Belüftungsgeschwindigkeit (in m/s).... | 92 |
| Tabelle 14: | Berechnete Werte der Parameter a und b nach dem Modell von KUPTZ et al. (2021) [58] für die Brennstoffe aus den Versuchen 2019 anhand physikalischer Brennstoffparameter | 93 |
| Tabelle 15: | Spezifischer Belüftungswiderstand (in Pa/m), berechnet anhand der physikalischen Brennstoffparameter der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach dem Modell von KUPTZ et al. (2021) in | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | Abhängigkeit der Belüftungsgeschwindigkeit (in m/s) inklusive der mittleren Abweichung zwischen den berechneten und den tatsächlich gemessenen Werten..... | 93 |
| Tabelle 16: | Benötigte Gebläseleistung in kW für die Trocknungsluftzufuhr der Brennstoffe aus den Versuchen 2019, berechnet für ein Praxisbeispiel mit einem Trocknungscontainer (Maße: 6,0 m × 2,4 m × 2,3 m) bei variierenden Strömungsgeschwindigkeiten in m/s | 95 |
| Tabelle 17: | Jährliche Kosten für die Belüftung bei der technischen Trocknung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in Euro bei 500 Volllaststunden im Jahr und einem Strompreis von 0,25 €/kWh bei variierenden Strömungsgeschwindigkeiten in m/s, ausgehend von der in Tabelle 16 berechneten benötigten Gebläseleistung..... | 95 |
| Tabelle 18: | Leistungs- und Energiedaten der Förderversuche mit den Brennstoffen aus den Versuchen 2019..... | 99 |
| Tabelle 19: | Partikelgröße klassifizierter Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2021 (Auszug) | 104 |
| Tabelle 20: | Spezifikation klassifizierter Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2022 (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand; Auszug) | 105 |
| Tabelle 21: | Anforderungen der ENplus-Zertifizierung an die Eigenschaften von Holzhackschnitzeln (die Partikelgrößenklassen werden nach DIN EN ISO 17225-4:2014 bestimmt)..... | 106 |
| Tabelle 22: | Zuordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in die Klassifikationen nach DIN EN ISO 17225-4:2021 (Grün: A1; Gelb: A2; Rot: B1; Grau für nicht klassifizierbare Brennstoffe) | 107 |
| Tabelle 23: | Zuordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach ENplus (Grün: A1; Gelb: A2; Rot: B; Grau für nicht klassifizierbare Brennstoffe) | 107 |
| Tabelle 24: | Ausgewählte Brennstoffparameter der jeweiligen Charge direkt nach der Zerkleinerung bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (Mittelwert ± Standardabweichung; wf = wasserfreie Bezugsbasis)..... | 130 |

1 Einleitung und Problemstellung

Dezentrale Heizsysteme auf Basis biogener Festbrennstoffe sind ein wesentlicher Bestandteil der deutschen Wärmewende [8] [36]. Vor allem im ländlichen Raum werden zur nachhaltigen Wärmeerzeugung häufig Biomassekessel < 100 kW, sogenannte Kleinfeuerungsanlagen, installiert, die Holzhackschnitzel, Pellets oder Scheitholz einsetzen [39] [41]. Kleinfeuerungsanlagen stellen hohe Anforderungen an die Brennstoffqualität, um eine störungsfreie, energieeffiziente und emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten. Relevante Brennstoffeigenschaften sind z. B. ein geeigneter Wassergehalt, ein niedriger Aschegehalt, geringe Feinanteile und eine geeignete Partikelgrößenverteilung [6] [28] [48] [64] [69] [74] [78] [79].

Betreiber von Kleinfeuerungsanlagen sind häufig Landwirte oder private Waldbesitzer, die ihre Brennstoffe (z. B. Holzhackschnitzel oder Scheitholz) selbst produzieren [48]. Die Verbrennung von Holz gilt dabei gemeinhin als nahezu CO₂-neutral, da bei einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung nur so viel Holz verbrannt wird, wie an anderer Stelle im Wald durch den Zuwachs wieder gebunden wird. Bei der Bereitstellung wird jedoch Energie aufgewendet, wodurch Emissionen freigesetzt werden [31] [51] [52]. Gleichzeitig kann es während der Produktion zu Verlusten an Brennstoff kommen, beispielsweise durch Zersetzungsprozesse bei der Lagerung der Materialien in Haufwerken [1] [2] [45] [46] [47] [63] [71] [72] [87].

Vor allem im ländlichen Raum ist die Brennstoffbereitstellung häufig in den eigenen Betrieb privater Land- und Forstwirte integriert und viele Kesselbetreiber führen die notwendigen Prozessschritte wie Holzernte, Holzeinschlag, Transport, Lagerung, Hacken, Trocknung und/oder Siebung selbst durch. Im privaten Bereich werden hierfür häufig Hacker aus einer niedrigen Leistungsklasse eingesetzt [62]. Diese Maschinen sind in der Regel zapfwellenbetrieben und mit dem Ziel konstruiert, Holzhackschnitzel mit einer hohen und definierten Brennstoffqualität zu erzeugen. Letztere hängt u. a. vom eingesetzten Rohmaterial und von dem Erfahrungsgrad des Maschinenführers ab, zu einem großen Teil aber auch von der verwendeten Hackmaschine selbst [3] [4] [56]. Zahlreiche Maschineneinstellungen beeinflussen die Brennstoffqualität, v. a. die Partikelgröße und die Partikelform. Hierunter fallen beispielsweise der Hackertyp, die Messerschärfe, die Schnittlänge, das Einzugssystem, das Austragssystem oder die Ausführung der Hackersiebe [32] [35] [38] [53] [65] [67] [82]. Dieselben Prozessparameter beeinflussen den Kraftstoffverbrauch und die Durchsatzrate während der Produktion [4] [56] [59] [65] [83]. Die Partikelgröße und die Partikelform wiederum beeinflussen die nachgeschalteten Aufbereitungsschritte (Lagerung, Trocknung, Siebung) sowie die Verbrennung (Emissionen, störungsfreier Anlagenbetrieb etc.).

Technische Innovationen können helfen, die Energieeffizienz und die Produktqualität bei der Produktion von Holzhackschnitzeln, aber auch bei den nachfolgenden Verarbeitungsschritten (Trocknung, Lagerung, Verbrennung), sowohl in kleinstrukturierten, ländlichen Bereitstellungsketten als auch im Industriemaßstab erheblich zu verbessern. Eine mögliche technische Innovation zur Optimierung der landwirtschaftlichen Hackschnitzelproduktion ist der Duplex-Schneckenhacker Effiter 20.30 des bayerischen Unternehmens Alvatec

GmbH & Co. KG. Bei diesem System handelt es sich um einen zapfwellenbetriebenen Kleinhacker (Leistungsbedarf: 40 bis 70 kW), der zwei simultan betriebene Hackerschnecken auf derselben Welle mit gegenläufigen Gewinden installiert hat. Die resultierenden Brennstoffe (genannt „Effits“) unterscheiden sich in ihren physikalischen Brennstoffeigenschaften wie Partikelgröße und Partikelform erheblich von konventionellen Holzhackschnitzeln, d. h., sie bestehen hauptsächlich aus eher großen Partikeln mit vorgebrochener Partikelstruktur und einem sehr geringen Feinanteil. Aufgrund ihrer neuartigen Struktur lassen sie erhebliche Verbesserungen der Gesamtprozesskette, v. a. im Bereich der Brennstofflagerung und -trocknung, aber auch bei der Verbrennung erwarten.

2 Zielstellung des Projekts

Das Ziel des Vorhabens „InnoFuels“ war es, innovative Verfahren zur Produktion und Aufbereitung von Holzhackschnitzeln in konventionelle Prozessketten zu integrieren und die dadurch entstehenden neuen Verfahrensketten und Brennstoffe im Praxisversuch zu bewerten. Hierzu wurden in dem Projekt zwei neuartige Verfahren – der Duplex-Schneckenhacker Effiter 20.30 der Firma Alvatec GmbH & Co. KG (Teilvorhaben 1) sowie das Hackschnitzelpressverfahren der Firma Bohnert-Technik GmbH (Teilvorhaben 2) – verwendet. Mit beiden Verfahren entstehen Brennstoffe, die sich maßgeblich von typischen Holzbrennstoffen unterscheiden und das Potenzial aufweisen, durch ihre veränderten Produkteigenschaften einen positiven Einfluss auf die Energieeffizienz und damit auf die Kosten der Gesamtverfahrensketten, auf die weitere Aufbereitung mittels Trocknung, Lagerung und Pelletierung, auf die Emissionen an CO, NO_x und Gesamtstaub bei der Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen und auf den Wirkungsgrad dezentraler Holzgas-BHKW zu haben.

Der vorliegende Bericht umfasst die Ergebnisse aus Teilvorhaben 1. Die Untersuchungen umfassen die Analyse kompletter Prozessketten von der Zerkleinerung bis hin zur thermischen und energetischen Nutzung. Hierunter fallen:

- die Brennstoffproduktion mit dem Effiter 20.30 inklusive der Bewertung der Brennstoffqualität,
- Untersuchung zur Brennstoffaufbereitung, darunter v. a. die Lagerung und natürliche Trocknung sowie die technische Trocknung inklusive der Messungen zum Belüftungswiderstand,
- die Transporteigenschaften der Brennstoffe in Förderschnecken realer Kessel,
- Verbrennungsversuche an kleinen Hackschnitzelkesseln < 100 kW zur Bewertung des Emissionsverhaltens und des Wirkungsgrads der Anlagen und
- Versuche an einem dezentralen Holzgas-BHKW zur Strom- und Wärmeengewinnung.

3 Stationäre Versuche mit dem Effiter 20.30

In dem hier dargestellten Kapitel 3 werden stationäre Versuche zur Erzeugung von Versuchsbrennstoffen mit dem Effiter 20.30 und einem Trommelhacker ähnlicher Leistungsklasse („Referenzhacker“) am Betriebshof des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) sowie die weiteren Analysen zur Lagerung, Trocknung, Belüftung, Förderung und Verbrennung der Brennstoffe beschrieben. Die Versuche unterscheiden sich von den in Kapitel 4 dargestellten Versuchen („industrieller Maßstab“) hinsichtlich der verwendeten Rohmaterialien, hauptsächlich aber im Hinblick auf die erzeugten Massen und die Größe der Versuchsaufbauten. Die stationären Versuche fanden im Jahr 2019 statt.

3.1 Material und Methoden

3.1.1 Verwendete Hackmaschinen

Der Effiter 20.30 der Firma Alvatec GmbH und Co. KG aus Schechen (Abbildung 1) ist ein Schneckenhacker. Er unterscheidet sich jedoch grundsätzlich von konventionellen Maschinen durch sein neuartiges Hackaggregat, die sogenannte Duplex-Schnecke. Dieses zum Patent angemeldete Bauteil besteht im Gegensatz zu herkömmlichen Schneckenhackern nicht aus einer einzelnen, sondern aus zwei Schnecken, die auf derselben Antriebswelle montiert sind. Dabei handelt es sich zum einen um eine steile Zylinderschnecke, zum anderen um eine flache Planschnecke (Abbildung 2, links).



Abbildung 1: Effiter 20.30 mit trichterförmiger Brennstoffzuführung und Auswurfkamin („Puls-Craft-Austragung“)

Beide Schnecken weisen gegensätzliche Windungen auf und besitzen Schneiden an den Gewindegängen. Durch diesen Aufbau schert die Duplex-Schnecke das Material vom Stamm ab. Es entstehen sehr grobe und an den Jahrringen vorgebrochene Partikel, die sogenannten Effits (Abbildung 2, rechts). Die neuartigen Brennstoffe sollen laut dem Hersteller Vorteile bei der Lagerung bieten, beispielsweise durch deutlich geringere Trockenmasseverluste oder eine effektivere natürlichen Trocknung. Überdies versprechen die Effits Vorteile bei der technischen Trocknung durch eine bessere Belüftbarkeit der grobporigen Schüttgüter. Aufgrund der sehr geringen Feinanteile wird zudem von einem besseren Emissionsverhalten bei der Verbrennung in Hackschnitzelkesseln ausgegangen.



Abbildung 2: Das Zerkleinerungsaggregat des Effiters 20.30 aus Sicht der Revisionsklappe (links) mit steiler Zylinderschnecke (A) und flacher Planschnecke (B) sowie mit dem Hacker produzierte Effits (rechts)

Der Effiter 20.30 ist ein Anbauhacker mit 600 kg Masse, der an der Dreipunktaufnahme eines landwirtschaftlichen Trägerfahrzeugs montiert wird. Der Hersteller gibt einen Leistungsbedarf des Hackers von 40 bis 70 kW an. Das Gerät ist als manuell beschickter Hacker konzipiert, kann jedoch mit einem alternativen Fülltrichter bestückt werden, um eine Beschickung per Kran zu ermöglichen. Dann ist jedoch keine Personenschutzeinrichtung mehr vorhanden, weshalb diese Version eine Beschickung per Hand verbietet.

Die Antriebswelle, auf der die Duplex-Schnecke sitzt, dreht sich mit 270 Umdrehungen je Minute bei einer Zapfwellendrehzahl von 570 Umdrehungen. Die Einzugsweite des Effiters 20.30 beträgt 200 × 300 mm. Laut Hersteller ist die Maschine zur Zerkleinerung waldfrischer Materialien bis zu einem Durchmesser von 20 cm zugelassen. Sowohl Stammholz als auch Waldrestholz kann als Rohmaterial genutzt werden. Wie bei allen Hackern ist ein Eintrag von Fremdstoffen zu vermeiden, um die Schneidwerkzeuge zu schonen und die Brennstoffqualität nicht negativ zu beeinträchtigen.

Der Effiter 20.30 benötigt aufgrund seiner Funktionsweise keine Einzugsbänder oder -walzen. Das Hackaggregat führt das Rohmaterial selbst zu. Die Maschine besitzt im Gegensatz zu herkömmlichen Trommel- und Scheibenradhackern keine Gegenschneide. Die Schneiden an den Kanten der Gewindegänge können getauscht und erneut geschärft werden.

In der hier dargestellten Studie wurde eine Version des Hackers mit einer sogenannten Puls-Craft-Austragung verwendet. Diese nutzt ein Federstahlblatt, das abwechselnd gespannt und entspannt wird. Bei der Entspannung schleudert die Austragung den zerkleinerten Brennstoff durch einen Austragskamin. Daneben existieren weitere Modelle der Hackmaschine, die teils mit Förderbändern oder gänzlich ohne einen weiteren Materialaustrag auskommen. So fällt bei einem aktuellen, preiswerteren Modell der Brennstoff lediglich unterhalb der Maschine in einen Big Bag.

Als Referenzhacker für den Maschinenvergleich wurde ein konventioneller Trommelhacker gewählt. Es handelt sich hierbei um eine handbeschickte Maschine mit einer nominalen Einzugsweite von 400 × 670 mm. Die Trommel ist mit acht Messern ausgestattet und der eingesetzte Siebkorb hatte eine Siebweite von 35 × 40 mm. Der Brennstoff wurde mit einer klassischen Austragung über einen Kamin gefördert. Bei dem Referenzhacker handelt es sich um einen Anbauhacker, der eine Antriebsleistung von ca. 45 kW bis ca. 140 kW benötigt. Der Hacker wurde über einen Lohnunternehmer für die Dauer der Feldversuche beschafft.

3.1.2 Rohmaterialien

Für die stationären Versuche 2019 kamen fünf verschiedene Rohmaterialien zum Einsatz (Abbildung 3). Rohmaterial 1 bestand aus **Pappeln** (*Populus maximowiczii* × *Populus nigra*, Klon „Max 3“) aus einer Kurzumtriebsplantage, die etwa 10 km entfernt von Straubing lag und sich im dritten Aufwuchsjahr befand. Die Pappeln wurden als unbelaubte Ganzbäume im März 2019 mit einem Fällgreifer geerntet und auf den Betriebshof des TFZ geliefert. Sie wiesen Stammdurchmesser von etwa 10 bis 15 cm auf.

Als Rohmaterial 2 wurde **Energierundholz aus Fichte** (*Picea Abies*) gewählt. Dabei handelt es sich um dünne, grob entastete Stammstücke, die aufgrund ihres Zustands (z. B. zu geringer Durchmesser bei Durchforstungsholz, gebrochene Stammstücke etc.) häufig nicht als stoffliches Sortiment ausgehalten werden. Für die hier dargestellten Versuche wurden Fichtenstämme im möglichst hiebfrischen Zustand beschafft. Die Stammstücke wiesen eine Länge von 2 m und einen Durchmesser von 10 bis 20 cm auf. Der Einschlag des Holzes erfolgte wenige Tage vor dem stationären Hackversuch auf Waldflächen im näheren Umkreis (50 km) von Straubing.

Als Rohmaterial 3 wurde **Energierundholz aus Buche** (*Fagus Sylvatica*) gewählt. Hierbei handelte es sich analog zum Energierundholz aus Fichte um Stammstücke mit einer Länge von zwei Metern. Das Material stammte erneut aus dem näheren Umkreis von Straubing. Bei diesem Sortiment lagen die Durchmesser der Stammstücke jedoch teils über den maximal angeforderten 20 cm (Maximaldurchmesser des Effiters 20.30), sodass

eine manuelle Vorsortierung durchgeführt werden musste, um die reibungslose Zerkleinerung von ca. zehn Schüttraummetern (SRM) an Holzhackschnitzeln mit dem Effiter 20.30 zu ermöglichen. Die Stammstücke, die den maximalen Stammdurchmesser des Hackers überschritten, wurden im Referenzhacker eingesetzt (siehe Abschnitt 3.1.3), wobei ein Großteil des eingesetzten Materials dennoch < 20 cm lag und der maximale Stammdurchmesser 40 cm nicht überschritten hat. Hierdurch kann es allerdings zu geringfügigen Unterschieden in den physikalischen und inhaltsstofflichen Parametern der erzeugten Brennstoffe, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Verhältnisse von Stammholz zu Rinde, aber auch zu unterschiedlichen Durchsatzleistungen beim Hacken kommen. Alle Materialien wurden im möglichst frischen Zustand geordert. Bei dem Energierundholz aus Buche war dies aufgrund der angespannten Waldschutzsituation im Jahr 2019 jedoch nicht möglich. Durch das hohe Aufkommen an Schadinsekten im Jahr 2019 waren die Kapazitäten der Forstbetriebe gebunden und hiebfrisches Buchenholz nicht erhältlich. Die Stämme von Rohmaterial 3 waren demnach bereits einige Wochen vor der Versuchskampagne gefällt worden.



Abbildung 3: Rohmaterialien im ungehackten Zustand (oben links: Pappel aus einer Kurzumtriebsplantage; oben Mitte: Energierundholz aus Fichte; oben rechts: Energierundholz aus Buche; unten links: Waldrestholz aus Nadelholz; unten rechts: Waldrestholz aus Nadelholz)

Die Sortimente 4 und 5 waren **Waldrestholz**, sowohl aus **Nadelholz** als auch aus **Laubholz**. Das Nadelholz bestand hauptsächlich aus Gipfelstücken der Baumart Fichte (*Picea Abies*) und zu einem geringen Anteil aus Kiefer (*Pinus sylvestris*). Das Laubholz setzte sich aus Schwarzerle (*Alnus glutinosa*), Stieleiche (*Quercus robur*), Sandbirke (*Betula*

pendula), gemeiner Esche (*Fraxinus excelsior*) und Silberweide (*Salix alba*) zusammen. Die Brennstoffe fielen im Rahmen von Pflegemaßnahmen an und variierten vor der Zerkleinerung optisch teils erheblich, beispielsweise hinsichtlich ihres Trocknungszustands. Sie stammten alle aus der unmittelbaren Region um Straubing. Beide Waldrestholz-Sortimente wiesen lange Stammstücke mit bis zu 4 m Länge auf. Zudem waren sie durch den Transport stark ineinander verkeilt und konnten nicht wie geplant manuell in den jeweiligen Hacker beschickt werden. Deswegen wurden beide Waldrestholz-Sortimente den jeweiligen Hackern mit dem Forstkran eines Rückwagens durch einen externen Lohnunternehmer zugeführt (siehe Abschnitt 3.1.3).

Alle fünf Sortimente wurden sowohl mit dem Effiter 20.30 als auch mit dem Referenzhacker zerkleinert. Die in diesem Bericht verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Bezeichnungen setzen sich jeweils zusammen aus der Abkürzung für das Rohmaterial (**PA**, **ERH-F**, **ERH-B**, **WRH-N** und **WRH-L**) sowie einem angehängten **-E** (Effiter) bzw. **-R** (Referenzhacker) für die Art der Zerkleinerung. Bei den Lagerungsversuchen (siehe Abschnitt 3.1.5) wird zudem noch zwischen **-B** (Behälter) und **-H** (Haufwerk) unterschieden.

Tabelle 1: Untersuchte Brennstoffe inklusive der Zerkleinerungsmethode und der verwendeten Brennstoffbezeichnung

| Rohmaterial | Zerkleinerungsmethode | Bezeichnung |
|----------------------------|-----------------------|-------------|
| Pappel aus einer KUP | Effiter 20.30 | PA-E |
| | Referenzhacker | PA-R |
| Energierundholz aus Fichte | Effiter 20.30 | ERH-F-E |
| | Referenzhacker | ERH-F-R |
| Energierundholz aus Buche | Effiter 20.30 | ERH-B-E |
| | Referenzhacker | ERH-B-R |
| Waldrestholz aus Nadelholz | Effiter 20.30 | WRH-N-E |
| | Referenzhacker | WRH-N-R |
| Waldrestholz aus Laubholz | Effiter 20.30 | WRH-L-E |
| | Referenzhacker | WRH-L-R |

3.1.3 Zerkleinerung

Die stationären Zerkleinerungsversuche im Versuchsjahr 2019 wurden auf dem Betriebs- hof des TFZ durchgeführt. Die Rohmaterialien wurden mit beiden Hackern jeweils an aufeinanderfolgenden Tagen zerkleinert.

Beide Hacker wurden in den Versuchskampagnen jeweils mit demselben Schlepper be- trieben. Bei den Sortimenten PA, ERH-F, WRH-N und WRH-L wurde ein Kubota M8560

mit 67 kW genutzt. Beim Sortiment ERH-B wurde ein John Deere 6135R mit 100 kW eingesetzt.

Um bei allen Versuchen eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde vor jeder Zerkleinerungskampagne der Zustand der beiden Hacker kontrolliert, beide Maschinen gereinigt und bei Bedarf gewartet. Bei den Zerkleinerungsversuchen wurden Daten zum Zeitbedarf, den erzeugten Volumina und Massen sowie dem Kraftstoffverbrauch der Trägermaschine bestimmt. Der Zeitbedarf wurde ab dem Zuführen des ersten Holzes in den jeweiligen Hacker bis zum Ende der letzten Zerkleinerung gemessen. Die Volumina der erzeugten Brennstoffe wurden durch Nivellieren der Holzhackschnitzel in einem landwirtschaftlichen Anhänger, in den die Brennstoffe beim Hacken gefördert wurden, und anschließendes Messen des Leervolumens des Anhängers bestimmt. Im Anschluss wurde der erzeugte Brennstoff im Anhänger auf einer Überfahrtswaage gewogen. Die Brennstoffmassen wurden im frischen Zustand bestimmt und über den Wassergehalt auf die Brennstoffmasse im wasserfreien Zustand (wf) umgerechnet.

Der Kraftstoffverbrauch des Trägerschleppers wurde bestimmt, indem das Kraftstoffleitungssystem aufgetrennt und ein separater Tank auf einer Waage platziert wurde (siehe Abbildung 4). So wurde der Kraftstoffverbrauch der Zerkleinerung gravimetrisch gemessen. Der Kraftstoffverbrauch in Litern wurde anschließend über die Dichte des Dieseldiesels ermittelt. Als Dichte wurde 0,83 kg/l als mittlerer Wert aus der aktuell gültigen Norm für Dieseldiesels angenommen [21].



Abbildung 4: Messaufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs des Schleppers

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die jeweils erzeugten Brennstoffe zu sehen. Die Effits sind auf der linken Seite, die Referenzbrennstoffe aus dem gleichen Ausgangsmaterial auf der rechten Seite dargestellt.



Abbildung 5: Bei den stationären Versuchen mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker erzeugten Brennstoffe in identischen Holzrahmen (320 × 245 mm Außenmaß); links: Effits; rechts: Referenzbrennstoffe; von oben nach unten: Pappel, Energierundholz aus Fichte, Energierundholz aus Buche



Abbildung 6: Bei den stationären Versuchen mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker erzeugten Brennstoffe in identischen Holzrahmen (320 × 245 mm Außenmaß); links: Effits; rechts: Referenzbrennstoffe; von oben nach unten: Waldrestholz aus Nadelholz und Waldrestholz aus Laubholz

3.1.4 Probennahme, Probenaufbereitung und Brennstoffanalyse

Die erzeugten Brennstoffe wurden unmittelbar nach dem jeweils zu untersuchenden Prozessschritt, beispielsweise direkt nach der Zerkleinerung mit dem Effiter 20.30 repräsentativ in Anlehnung an DIN EN ISO 18135 [24] bzw. DIN EN ISO 21945 [26] beprobt und hinsichtlich ihrer physikalischen, ggf. auch hinsichtlich ihrer inhaltsstofflichen Brennstoffparameter analysiert. Repräsentative Teilproben wurden zudem für die Analysen zur Lagerung, technischen Trocknung, Belüftbarkeit, Förderbarkeit oder für die Feuerungsversuche gewonnen. Je nach Fragestellung erfolgte eine Beprobung der Brennstoffe sowohl vor als auch nach dem jeweiligen Prozessschritt.

Vor einer Probennahme wurden die Brennstoffe i. d. R. homogenisiert, beispielsweise durch dreimaliges Umschaukeln der kompletten Charge (manuell oder mithilfe eines Radladers). Die Anzahl der gezogenen Teilproben richtete sich jeweils nach der Menge des zu beprobenden Materials sowie nach der durchzuführenden Analyse. Beispielhaft ist in Tabelle 2 die Anzahl an Analyseproben für die Untersuchungen zur Zerkleinerung unterschiedlicher Rohmaterialien mit dem Effiter 20.30 wiedergegeben.

Tabelle 2: *Beispiel für die Probennahme bei den Hackversuchen mit dem Effiter 20.30 und dem jeweiligen Referenzhacker: beprobte Parameter, angewendete Norm sowie Anzahl der Einzelproben*

| Beprobter Parameter | Angewendete Norm | Anzahl der Proben je Brennstoff im „stationären Hackversuch“ (Kapitel 3) | Anzahl der Proben je Brennstoff im „industriellen Versuch“ (Kapitel 4) |
|----------------------------|---|--|--|
| Wassergehalt | DIN EN ISO 18134-1 [14] | 10 | 36 |
| Siebanalyse | DIN EN ISO 17827-1 [18] | 3 | 9 (Mischproben) |
| Bildanalyse | Eigene Methode [43] [58] | 1 (Mischprobe) | – |
| Schüttdichte | DIN EN ISO 17828 [19] | 5 | 10 |
| Aschegehalt | DIN EN ISO 18122 [20] | 5 bzw. 1 (Mischprobe) | 9 (Mischproben) |
| Heizwert | DIN EN ISO 18125 [23] | 5 bzw. 1 (Mischprobe) | 9 (Mischproben) |
| Inhaltsstoffliche Analysen | DIN EN ISO 16948 [15] DIN EN ISO 16994 [17] DIN EN ISO 16967 [16] DIN EN ISO 16968 [13] DIN EN ISO 11885 [12] DIN 22022-2 [11] | 1 (Mischprobe) | 1 (Mischprobe) |
| Ascheschmelzverhalten | DIN EN ISO 21404 [25] | 1 (Mischprobe) | – |

Die Einwaage der Proben für die Bestimmung des Wassergehalts und die Analyse der Schüttdichte erfolgte direkt am Ort der Probennahme. Die Analyse der Partikelgrößenverteilung (Sieb- und Bildanalyse), des Aschegehalts, des Heizwerts sowie für die inhaltstofflichen Analysen wurde in den Laboren des TFZ und der Hochschule Rottenburg (HFR) vorgenommen. Vor der Analyse im Labor erfolgte zunächst eine Trocknung der Brennstoffe bei Raumtemperatur. Danach wurden die Proben für die Bestimmung des Aschegehalts, des Heizwerts sowie für die inhaltstofflichen Analysen auf eine Partikelgröße < 0,25 mm gemahlen. Die Zerkleinerung im Labor (Schneidmühle, Fritsch Pulverisette 19) und die dafür notwendige Probenteilung erfolgten nach DIN EN ISO 14780 [22]. In der Schneidmühle sind Schneidwerkzeuge aus schwermetallfreien Legierungen verbaut, um einen Eintrag von Schwermetallen durch Abrieb zu vermeiden.

Neben den Analyseproben wurden zu mehreren Zeitpunkten im Projekt repräsentative Teilproben größerer Brennstoffchargen für weiterführende Versuche gewonnen. Diese umfassen die Versuche zur Bestimmung des Lagerverhaltens in Haufwerken sowie in Lagerbehältern (siehe Abschnitt 3.1.5). Zudem erfolgte die Trocknung der Brennstoffe in Satzrocknerboxen auf ca. 15 m-% Wassergehalt (siehe Abschnitt 3.1.6) für nachfolgende Analysen, wie z. B. zur Förderbarkeit der Brennstoffe, zum Belüftungswiderstand und zum Emissionsverhalten bei der Verbrennung. Hierzu wurden die Brennstoffe nach der technischen Trocknung in Big Bags überführt und in überdachten Lagerhallen bis zur weiteren Verwendung gelagert.

Wassergehalt. Der Wassergehalt (M in m-%) jedes Brennstoffs wurde gravimetrisch nach DIN EN ISO 18134-1 [14] durch Trocknung der Probe in einem Trockenschrank (FED 720,

Binder GmbH) bestimmt. Hierzu wird der Wassergehalt über den Massenverlust der Probe während der Trocknung bei 105 °C gemessen. Die Trocknung erfolgte jeweils bis zur Gewichtskonstanz der Probe, d. h. bis zum absolut trockenen Zustand, maximal jedoch für 24 Stunden.

Für die Analyse des Aschegehalts und des Heizwerts muss der Wassergehalt der Analyseprobe bestimmt werden, da diese Parameter im wasserfreien Zustand (wf) angegeben werden. Der sogenannte analysefeuchte Wassergehalt M_a (in m-%) der gemahlene Probe wird nach DIN EN ISO 18134-3 bestimmt. Dies erfolgt analog der DIN EN ISO 18134-1 über die Trocknung einer gemahlene 1-g-Probe bei 105 °C in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz der Probe, maximal jedoch für vier Stunden.

Aschegehalt. Der Aschegehalt (A in m-%, wf) wurde nach DIN EN ISO 18122 [20] in einem Muffelofen (L40/11BO, Nabertherm GmbH) gemessen. Je Probe wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Hierzu wird eine auf 1 mg eingewogene, gemahlene Probe von ca. 5 g stufenweise anhand eines Temperaturprofils bei maximal 550 °C verascht. Anschließend werden die Schalen zur Abkühlung in einem Exsikkator zwischengelagert. Der Aschegehalt wird aus dem Massenrückstand der veraschten Probe ermittelt. Er wird auf wasserfreie Bezugsbasis angegeben.

Heizwert. Der Heizwert der Brennstoffproben (Q in MJ/kg, wf) wurde mithilfe eines Bombenkalorimeters (C 2000 basic, IKA Analysetechnik) nach DIN EN ISO 18125 [23] ermittelt. Hierfür wurde für jede Probe eine Doppelbestimmung durchgeführt. Hierzu wird eine auf 1 mg eingewogene, gemahlene Probe von ≥ 1 g zu einem Pressling verarbeitet und anschließend in dem Bombenkalorimeter in einer Sauerstoffatmosphäre vollständig verbrannt. Für die Berechnung des Heizwerts auf wasserfreier Bezugsbasis muss ebenfalls der Wassergehalt der Analyseprobe nach DIN EN ISO 18134-3 bestimmt werden. Zur Bestimmung des Heizwerts müssen zudem die Gehalte an Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff bekannt sein. Diese Elemente wurden für jede Brennstoffprobe in den Laboren der HFR analysiert.

Nach der jeweiligen Analyse wurde die Flüssigkeit in der Kalorimeterbombe gesammelt und auf 50 ml mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Aus diesen Flüssigkeitsproben wurden später die Chlor- und Schwefelgehalte der Brennstoffe bestimmt.

Schüttdichte. In vielen Fällen wurde direkt nach dem jeweils untersuchten Prozessschritt die Schüttdichte (BD in kg/m^3) der Brennstoffe bestimmt. Hierfür wurde ein genormter 50-l-Behälter für Holzhackschnitzel mit bekanntem Leergewicht verwendet. Die Bestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 17828 [19]. Nach dem Befüllen des Behälters mit einer Schaufel aus etwa 15 bis 20 cm Höhe wurde das überschüssige Material, der sogenannte Schüttkegel, mit einem Kantholz abgestrichen. Der Behälter erfuhr eine mechanische Stoßanwendung nach DIN EN ISO 17828 (dreimaliges Fallenlassen aus 15 cm Höhe auf einen ebenen Untergrund), wurde anschließend erneut befüllt und nach dem Abstreichen des Schüttkegels erneut gewogen. Die Schüttdichte wird im Anlieferungszustand angegeben ($ar = as\ received$).

In Einzelfällen, beispielsweise zur Modellierung des Belüftungswiderstands, wird statt der Schüttdichte im Anlieferungszustand ein auf 15 m-% Wassergehalt berechneter Wert (BD_{15}) verwendet. Hierbei wird eine mögliche Schrumpfung der Partikel bei Trocknung unterhalb des Fasersättigungspunkts über die Vorgehensweise nach DIN EN ISO 17828 [19] mitberücksichtigt.

Siebanalyse. Die Partikelgrößenverteilung der Holzbrennstoffe wurde nach DIN EN ISO 17827-1 bestimmt [18]. Hierzu wurde für jeden Brennstoff ein zweidimensionales Plansiebverfahren mit Rundlochsieben durchgeführt. Am TFZ wurde die Plansiebmaschine (AS 400 control, Retsch GmbH) verwendet. Die Siebe wurde mit einer zuvor eingewogenen 8-Liter-Brennstoffprobe befüllt und für 15 Minuten bei 200 Umdrehungen pro Minute bei horizontalen Bewegungen gesiebt. Dabei durchliefen die Brennstoffe sechs verschiedene, übereinander gestapelte Rundlochsiebe ($\varnothing = 400$ mm) mit Öffnungen von 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm und 63 mm. So ergaben sich sechs verschiedene Partikelfractionen $> 3,15$ mm sowie eine Feinanteilfraktion in der Bodenschale des Siebs ($\leq 3,15$ mm). Die Massen der einzelnen Fractionen wurden mit einer Waage (PG12001-S, Mettler-Toledo) bestimmt. Durch den Massenanteil der jeweiligen Siebfractionen an der Gesamtmasse kann der prozentuale Anteil der jeweiligen Partikelfraction (F_x in m-%) ermittelt werden.

Falls Partikel in den oberen drei Sieben vorhanden waren, wurden die maximale Länge sowie der maximale Partikelquerschnitt des jeweils größten Partikels gemessen. Beide Parameter wurden zusätzlich für die Gesamtprobe separat bestimmt.

Anhand der Daten der Siebanalyse wurde eine Einteilung der Brennstoffe in die Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225-4 [28] vorgenommen.

Bildanalyseverfahren. Alle Siebanalyseproben wurden zusätzlich mithilfe eines fotooptischen Bildanalyseverfahrens (CP4, Haver & Boecker OHG, Münster) gemessen. Dies ermöglicht eine detaillierte Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und der Partikelform. Abbildung 7 illustriert den schematischen Aufbau des Verfahrens.

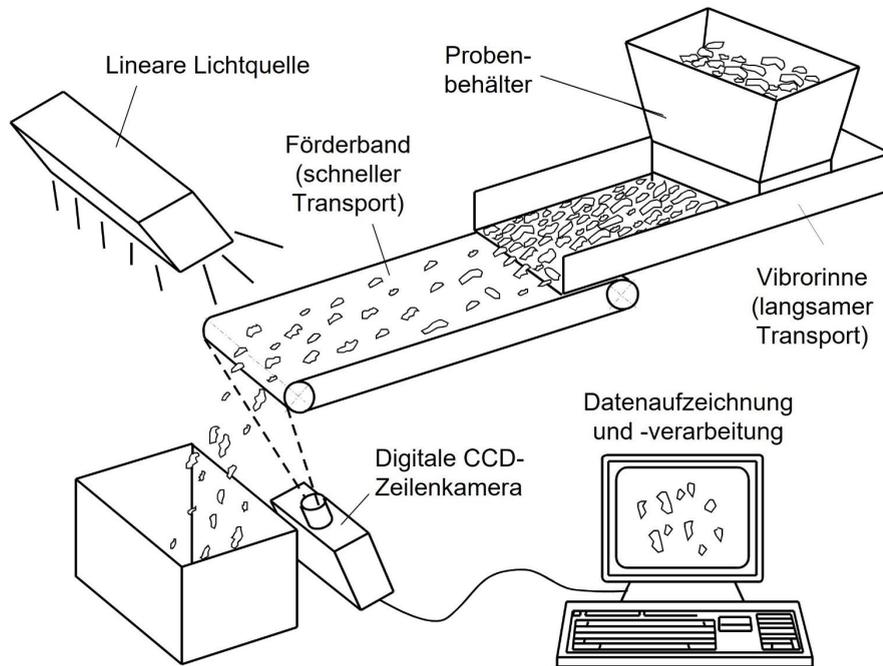
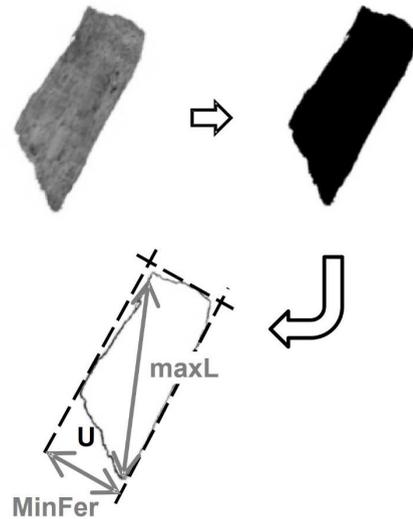


Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Bildanalyse am TFZ

Zunächst wird das zu analysierende Material in den Probenbehälter gegeben. Von dort gelangt es durch eine Vibro-Rinne (langsamer Transport) auf ein Förderband (schneller Transport) und wird dadurch räumlich aufgeteilt. Jeder einzelne Partikel durchläuft anschließend eine lineare Lichtquelle, die gegenüber einer digitalen, lichtempfindlichen CCD-Kamera (*charge coupled device*) angebracht ist. Die Kamera misst kontinuierlich 4.096 Pixel über eine Breite von 382 mm. Die Auflösung pro Pixel beträgt $98 \times 98 \mu\text{m}$. Durch den Schattenriss der Partikel kann die Kamera mehrere Form- und Längenparameter erfassen (Abbildung 8). Diese werden anschließend für die einzelnen Partikelgrößenklassen als Mittelwerte zusammengefasst. Die Partikelgrößenklassen orientieren sich dabei an der ISO-565-Siebnebenreihe R20. Mittelwerte über die gesamte Probe werden aus den Werten der einzelnen Partikelgrößenklassen, gewichtet anhand ihres Anteils an der Gesamtprobe, ermittelt.

Messverfahren der Bildanalyse



Kornformfaktoren (KFF)

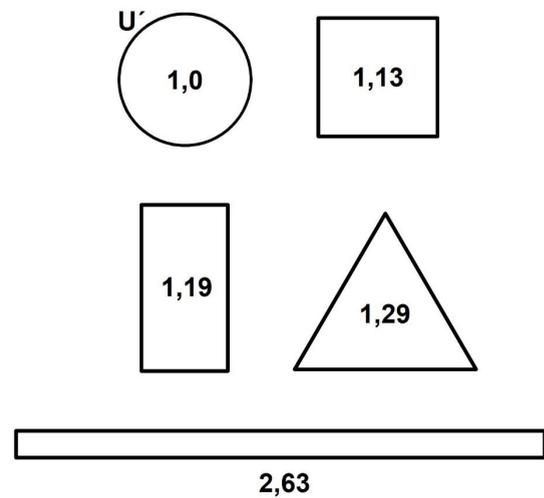


Abbildung 8: Messprinzip der Bildanalyse (Beispiel): Bestimmung des minimalen Feret-Durchmessers, der maximalen Partikellänge und des Kornformfaktors eines Partikels anhand des Schattenrisses [58]

Die Software der Bildanalyse gibt zahlreiche Längen- und Formparameter aus [43] [58]. Der minimale Feret-Durchmesser (*MinFer* in mm) beschreibt beispielsweise den minimalen Abstand zweier paralleler Tangenten, die den Umfang eines Partikels berühren. Er gibt somit den minimalen Durchmesser eines Partikels am genauesten wieder. Die maximale Länge (*MaxL* in mm) stellt wiederum den größten gemessenen Abstand zweier Pixel eines Partikels dar, gibt also die maximale reale Partikellänge wieder.

Durch diese Angaben werden dimensionslose Formparameter berechnet. Diese sind beispielsweise das Länge-zu-Breite-Verhältnis (*LzuB*) oder der Kornformfaktor (*KFF*). Das Länge-zu-Breite-Verhältnis gibt das Verhältnis von *MaxL* zu *MinFer* an. Der Kornformfaktor beschreibt den Umfang eines Partikels im Verhältnis zum Umfang eines flächengleichen Kreises. Er berechnet sich nach Formel (3.1).

$$KFF = \frac{U}{U'} \quad (3.1)$$

Wobei:

KFF = Kornformfaktor

U = Umfang des Partikels

U' = Umfang eines flächengleichen Kreises

Der *KFF* stellt somit die „Kreisförmigkeit“ eines Partikels als Faktor dar. Ein Wert von 1 bedeutet, dass der gemessene Schattenriss einem kreisrunden Partikel entspricht. Je höher der *KFF* ist, desto mehr weicht der Partikel von der kreisrunden Form ab.

Ebenso lässt sich die Längenverteilung der Partikel in der Gesamtprobe über die einzelnen Größenklassen anhand des Medians (in mm) sowie der 25%- und 75%-Quantile (Q_{25} , Q_{75} in mm) und der maximalen Länge des größten Partikels darstellen. Diese Werte lassen sich durch Interpolation anhand der kumulierten Partikellängenverteilung bestimmen (Abbildung 9).

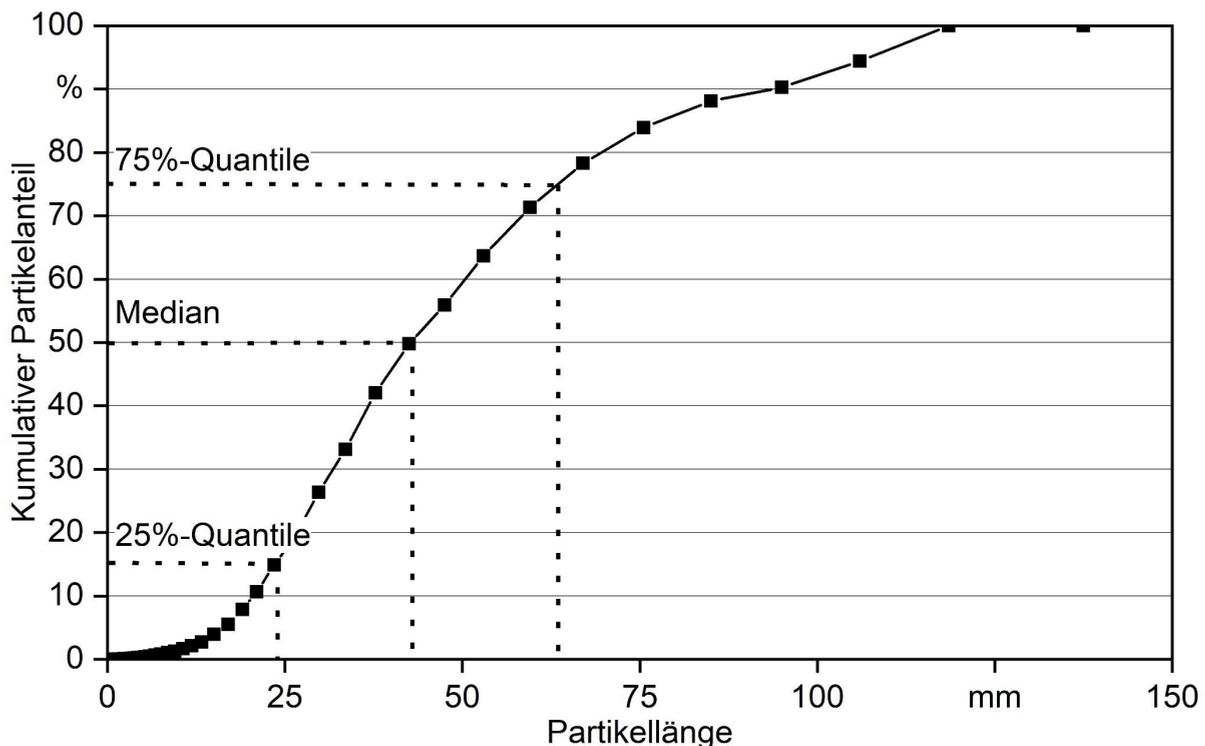


Abbildung 9: Beispiel für die Berechnung des Medianwerts sowie der 25%- und der 75%-Quantile der Partikellängenverteilung aus der Bildanalyse

Inhaltsstoffliche Analysen. Alle Brennstoffe wurden hinsichtlich ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung untersucht. Hierzu wurden auf 0,25 mm Partikelgröße zerkleinerte Proben an der HFR analysiert. Für die Bestimmung der chemischen Inhaltsstoffe wurden die Analyseverfahren der *Inductively coupled plasma optical emission spectrometry* (ICP-OES), der Elementaranalyse (EA) und der Ionen-Chromatografie (IC) verwendet (Tabelle 3). Es wurde jeweils mindestens eine vierfache Bestimmung je Brennstoffprobe durchgeführt. Im Falle einer Unterschreitung der Nachweisgrenze einiger Elemente wurde die individuelle Nachweisgrenze (abhängig von der Probeneinwaage) berechnet, für die Mittelwertberechnung angenommen und angegeben. Im Falle einer Unterschreitung der Nachweisgrenze durch den Mittelwert, wurde der Wert „< Nachweisgrenze“ in den Ergebnissen dokumentiert.

Tabelle 3: *Analysierte Inhaltsstoffe sowie verwendete Analysegeräte und Methoden*

| Analysierte Inhaltsstoffe | Methode nach | Abkürzung Messgerät | Gerät |
|--|--|------------------------|----------------------------------|
| C, H, N | DIN EN ISO 16948 | EA | CHN828, LECO |
| Al, Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, Tl, V, Zn | DIN EN ISO 11885 und DIN 22022-2 | ICP-OES | Spectro Blue, SPECTRO |
| Cl, S | DIN EN ISO 18125 und DIN EN ISO 16994 | IC | 833 Basic IC plus, Metrohm AG |
| O | Berechnung nach DIN 51733 | – | – |

3.1.5 Lagerungsversuche

Direkt nach der jeweiligen Zerkleinerung der Materialien wurden mehrmonatige Lagerungsversuche gestartet und bei allen bereitgestellten Brennstoffen in kleinen Lagerbehältern (siehe Abschnitt 3.1.5.1) durchgeführt. Bei den beiden Brennstoffen aus ERH-F wurde zusätzlich jeweils ein kleines Lagerhaufwerk (Abschnitt 3.1.5.2) aufgebaut und untersucht. Die Einlagerung der Haufwerke fand zum selben Zeitpunkt wie die der dazugehörigen Behälter statt.

Die Versuchsbrennstoffe wurden jeweils für etwa 23 Wochen auf dem Gelände des TFZ eingelagert. Durch die verschiedenen Hackzeitpunkte kam es zu unterschiedlichen Einlagerungszeitpunkten. Folglich wurden die Lagerungsversuche auch zu verschiedenen Zeitpunkten beendet. Eine Übersicht der Zeitpunkte findet sich in Tabelle 4. In allen Fällen konnte der Zeitraum einer typischen Sommerlagerung (fünf bis sechs Monate) abgebildet und untersucht werden.

Tabelle 4: *Zeitpunkt der Ein- und Auslagerung der Behälterversuche und des Lagerhaufwerks sowie die jeweilige Lagerdauer im Jahr 2019*

| Brennstoffe | Einlagerung | Auslagerung | Lagerdauer |
|------------------|-------------|-------------|------------|
| PA | KW 13 | KW 35 | 157 Tage |
| ERH-F (Behälter) | KW 16 | KW 39 | 162 Tage |
| ERH-F (Haufwerk) | KW 16 | KW 39 | 162 Tage |
| ERH-B | KW 16 | KW 39 | 160 Tage |
| WRH-N | KW 24 | KW 47 | 161 Tage |
| WRH-L | KW 24 | KW 47 | 161 Tage |

3.1.5.1 Behälterversuche

Als Behälter wurden Lagerkisten mit einem Volumen von ca. $0,6 \text{ m}^3$ verwendet. Ihre Innenmaße betragen $1.100 \times 900 \times 560 \text{ mm}$. In die Böden der Behälter wurden in gleichmäßigen Abständen Löcher ($\varnothing = 35 \text{ mm}$) gebohrt. Anschließend wurde der Boden des jeweiligen Behälters mit einem engmaschigen Netz ausgelegt. So wurde eine gute Luftzirkulation gewährleistet, ohne dass Brennstoff aus den Löchern rieselt. Die Seitenwände der Kisten wurden mit 30 mm starken Hartschaumplatten (extrudiertes Polystyrol) ausgekleidet. So wurden möglichst geringe Temperaturunterschiede innerhalb der Behälter ermöglicht und die Bildung einer Kondensationsschicht an den Außenwänden vermieden (Abbildung 10). Der Temperaturverlauf innerhalb der Brennstoffschüttung wurde mithilfe von Thermosensoren (Testo 175-H1, Testo AG) bestimmt und im 60-Minuten-Takt aufgezeichnet. In dem Lagerraum, einem überdachten und windgeschützten Außenlager (Abbildung 11), wurden Umgebungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet.

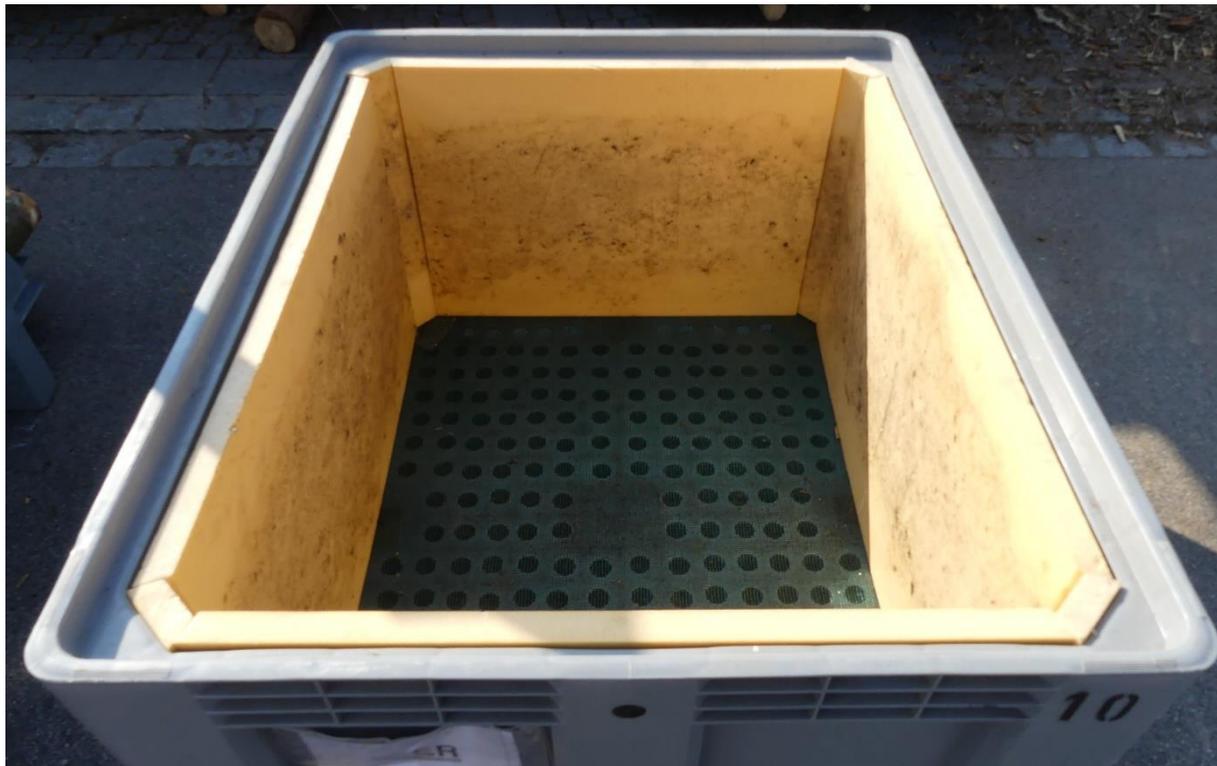


Abbildung 10: Lagerbehälter mit Dämmplatten ausgekleidet und mit perforiertem Boden (Füllvolumen = $0,6 \text{ m}^3$)

Alle erzeugten Versuchsbrennstoffe, sowohl die Effits als auch die Referenzbrennstoffe, wurden am selben Tag nach der Zerkleinerung für die Lagerversuche eingesetzt. Dazu wurden die Brennstoffe im gehackten Zustand durch dreimaliges Umschäufeln auf einer befestigten und gesäuberten Unterlage manuell homogenisiert. Nachdem der entsprechende Lagerbehälter mit dem Temperatursensor leer mit einer Kranwaage (Dini Argeo MCW1500, AS Wägetechnik GmbH, Messgenauigkeit $\pm 0,45 \text{ kg}$) gewogen worden war,

wurde der Brennstoff mit Schaufeln und einem Radlader eingefüllt. Unmittelbar nach der Befüllung wurde der Behälter erneut gewogen. Die Probenahme zur Bestimmung des Wassergehalts ($n = 5$) erfolgte ebenfalls bei der Befüllung.

Im zeitlichen Verlauf wurden die Lagerbehälter in einem Intervall von 21 Tagen einer Zwischenwiegun mit derselben Kranwaage unterzogen. Dies diente der Überwachung des Trocknungsfortschritts.

Nach einer Lagerdauer von etwa fünf bis sechs Monaten bzw. nach ca. 23 Wochen (siehe Tabelle 4) wurden die Behälter ausgelagert. Hierbei wurden die Brennstoffe auf einer befestigten und gesäuberten Unterlage durch dreimaliges Umschaufeln homogenisiert. Bei den vier Brennstoffen aus Waldrestholz geschah dies nicht wie bei den restlichen Brennstoffen per Hand, sondern mit einem Radlader. Auf eine Homogenisierung von Hand wurde hier aufgrund der deutlich sichtbaren Schimmelbildung im Behälter und der daher angenommenen hohen Belastung durch Schimmelsporen zugunsten des Arbeitsschutzes verzichtet. Nach dem Homogenisieren wurden Proben zur Bestimmung des Wassergehalts ($n = 5$), Aschegehalts ($n = 3$) und der Partikelgrößenverteilung ($n = 3$) gezogen. Ebenso wurde die Schüttdichte bestimmt ($n = 3$).



Abbildung 11: Standort der Lagerbehälter während der fünfmonatigen Lagerdauer in einem wind- und regengeschützten Außenlager

3.1.5.2 Versuche in Haufwerken

Die Lagerversuche in Haufwerken wurden in Form von kleinen Hackschnitzel-Lagermieten direkt im Anschluss an die Zerkleinerungsversuche der Brennstoffe durchgeführt. Im Gegensatz zu den Versuchen in den Lagerbehältern wurden die Lagerversuche in den Haufwerken lediglich an den beiden Brennstoffen aus ERH-F durchgeführt.

Die Haufwerke wiesen ein Volumen von etwa 15 SRM auf. Sie wurden auf dem Betriebs- hof des TFZ auf einer mit Schotter befestigten Fläche errichtet. Als Untergrund diente ein Bodenschutzgewebe, um eine Wiederbefeuchtung während der Lagerung und eine mineralische Verschmutzung beim Auf- und Abbau zu vermeiden. Die Haufwerke hatten Maße von ca. $5 \times 3 \times 2$ m. Sie wiesen dieselbe Lagerdauer wie die zugehörigen Lagerbehälter mit demselben Brennstoff auf (siehe Tabelle 4). Die Lagerdauer betrug somit 23 Wochen. Um eine hohe Vergleichbarkeit zu erzielen, wurden beide Haufwerke direkt nebeneinander errichtet.

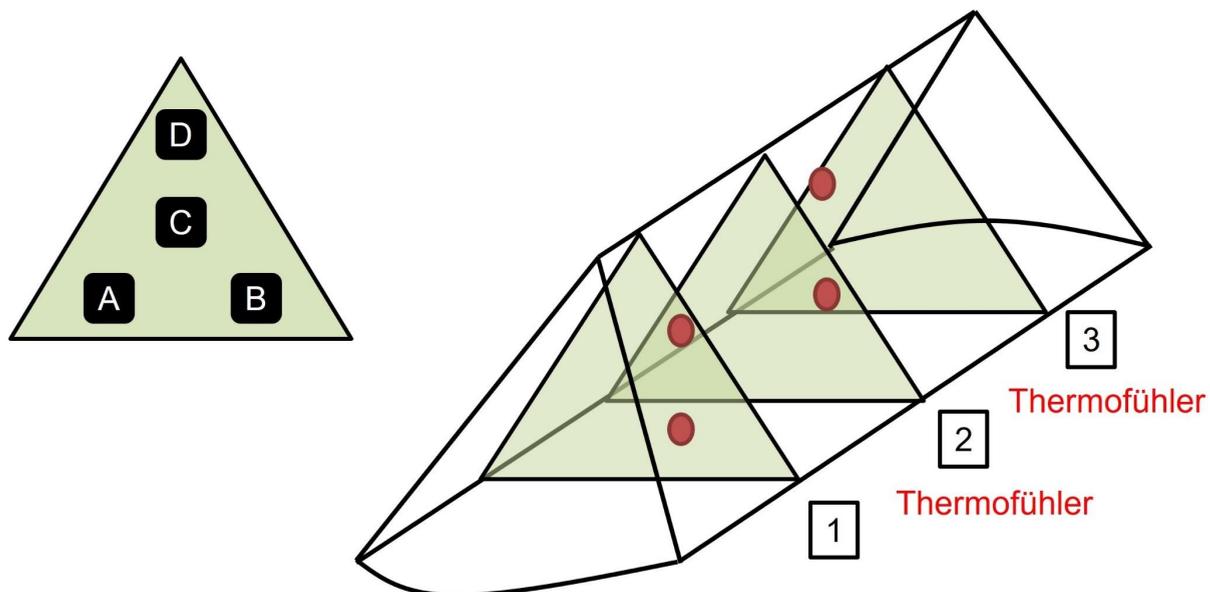


Abbildung 12: Schematischer Aufbau der Lagerhaufwerke mit einem Volumen von etwa 15 SRM (links: einer der drei Querschnitte mit der Platzierung der Bilanzbeutel; rechts: drei Querschnitte im Haufwerk; die roten Punkte markieren die Position der Thermofühler)

Das Rohmaterial wurde direkt nach der Zerkleinerung auf einer befestigten und geteerten Fläche durch mindestens dreimaliges Umschauen homogenisiert. Nach dem Homogenisieren erfolgte eine Beprobung der Brennstoffe (Wassergehalt: $n = 10$; Aschegehalt: $n = 5$; Partikelgrößenverteilung: $n = 5$; Schüttdichte: $n = 5$). Diese verlief analog zu der Beprobung aller anderen Rohmaterialien (vgl. Tabelle 2). Im Anschluss daran wurde begonnen, die Haufwerke mithilfe eines Radladers aufzuschütten.

Insgesamt wurden jeweils zwölf „Bilanzbeutel“ an definierten Stellen in die Haufwerke eingebaut (siehe Schema in Abbildung 12). Dabei handelt es sich um eine definierte Menge

an frischem Brennstoff, der in zwei Raschelsäcken verpackt wird. Anschließend wurden die Raschelsäcke in einem äußeren Drahtgeflecht stabilisiert, mit einer Probenkennung versehen und an jedem Sack ein Seil befestigt, um das Wiederfinden zu erleichtern. Mithilfe der Bilanzbeutel lässt sich die Veränderung der Brennstoffqualität und der Trockenmasse zwischen Einlagerung und Auslagerung bestimmen. Der Aufbau der Bilanzbeutel (siehe Abbildung 13) ist detailliert bei HOFMANN et al. [45] beschrieben.

Für die Befüllung jedes Bilanzbeutels wurde eine Brennstoffmenge von etwa zwölf Litern mit einem Probenteiler (Retsch GmbH) repräsentativ geteilt. Mit einem Teil der Probe wurde der Bilanzbeutel befüllt, während der andere Teil in einer Probenschale eingewogen wurde, um den Wassergehalt des entsprechenden Bilanzbeutels zu Beginn der Lagerung zu bestimmen. An jedem Bilanzbeutel wurden nach dem Befüllen und Verpacken außen anhaftende Brennstoffteilchen mit einem Handbesen entfernt und anschließend das gefüllte Gewicht bestimmt (Abbildung 13). Das Leergewicht der Bilanzbeutel wurde im Vorfeld ermittelt.



Abbildung 13: Noch nicht abgedeckte Versuchsmiete aus Effits, mit Bilanzbeuteln und Temperaturloggern (nicht sichtbar) versehen (links). Wiegen eines befüllten Bilanzbeutels vor dem Einbringen in die Miete (rechts)

Die zwölf Bilanzbeutel wurden dann zu je vier Stück in drei Querschnitten in dem jeweiligen Haufwerk positioniert (Abbildung 12). Zusätzlich zu den Bilanzbeuteln wurden in beide Haufwerke jeweils vier Temperatursensoren mit jeweils zwei Dataloggern an zuvor festgelegten Positionen verbaut und Messgeräte zur Aufzeichnung der Umgebungstemperatur sowie der Umgebungsluftfeuchte in unmittelbarer Nähe der Haufwerke installiert. Nachdem der Aufbau der Haufwerke abgeschlossen war, wurden diese mit einem diffusionsoffenen Vlies (PolyTex, 200 g/m², Zill GmbH und Co KG) abgedeckt. Die Abdeckung erfolgte, um eine Wiederbefeuchtung des Brennstoffs durch Niederschlag zu vermeiden und

zeitgleich eine Trocknung der Holzhackschnitzel durch Verdunstung zu ermöglichen [1] [45] [60].

Nach der zuvor festgelegten Lagerdauer wurden die beiden Haufwerke abgebaut. Bei der Auslagerung wurden die Bilanzbeutel per Hand aus den Haufwerken gezogen, wiederum mit einem Handbesen gereinigt, um außen anhaftende Teilchen zu entfernen, und danach erneut gewogen. Der Inhalt der Bilanzbeutel wurde mit einem Probenteiler geteilt. Ein Teil des Inhalts wurde zur Bestimmung des Wassergehalts herangezogen, der andere Teil wurde genutzt, um den Aschegehalt zu bestimmen. Aufgrund der bekannten Ausgangswassergehalte sowie der Ausgangsgewichte der jeweiligen Bilanzbeutel konnten so der Trockenmassenverlust und die Veränderung im Wassergehalt für jeden Bilanzbeutel bestimmt werden.

3.1.6 Technische Brennstofftrocknung

Teilchargen aller in Abschnitt 3.1.3 erzeugten Brennstoffe wurden in Satzrocknerboxen technisch auf einen Wassergehalt von ca. 15 m-% getrocknet und der Trocknungsverlauf dabei überwacht. Der Aufbau der TFZ-Trocknungsanlage ist in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

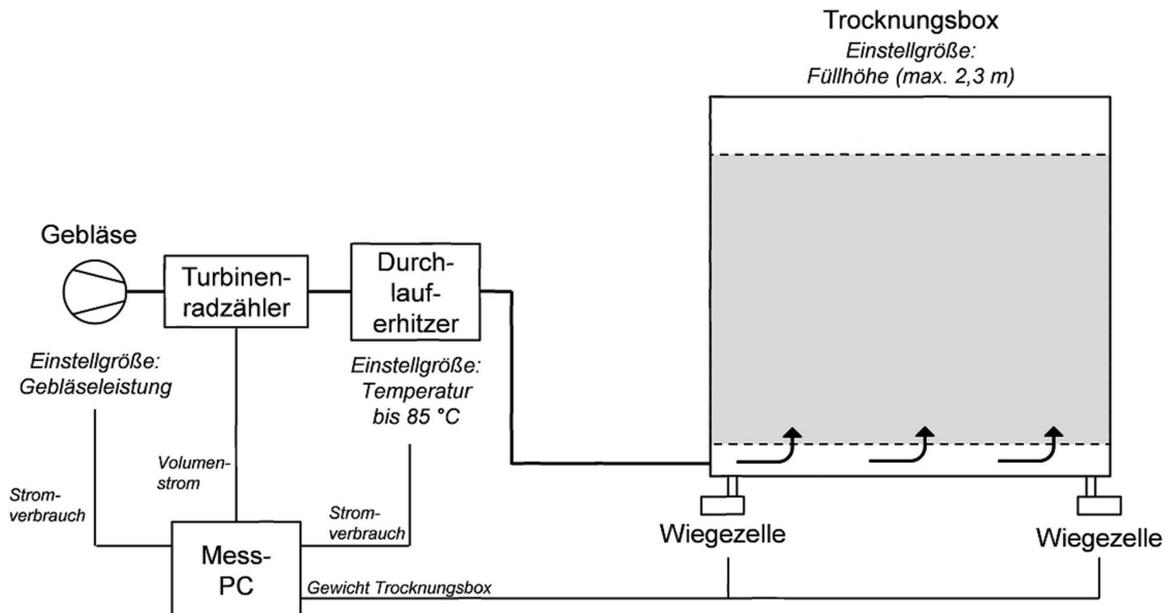


Abbildung 14: Schematischer Aufbau der Trocknungsversuche im Batchverfahren mit einer angeschlossenen Satzrocknerbox

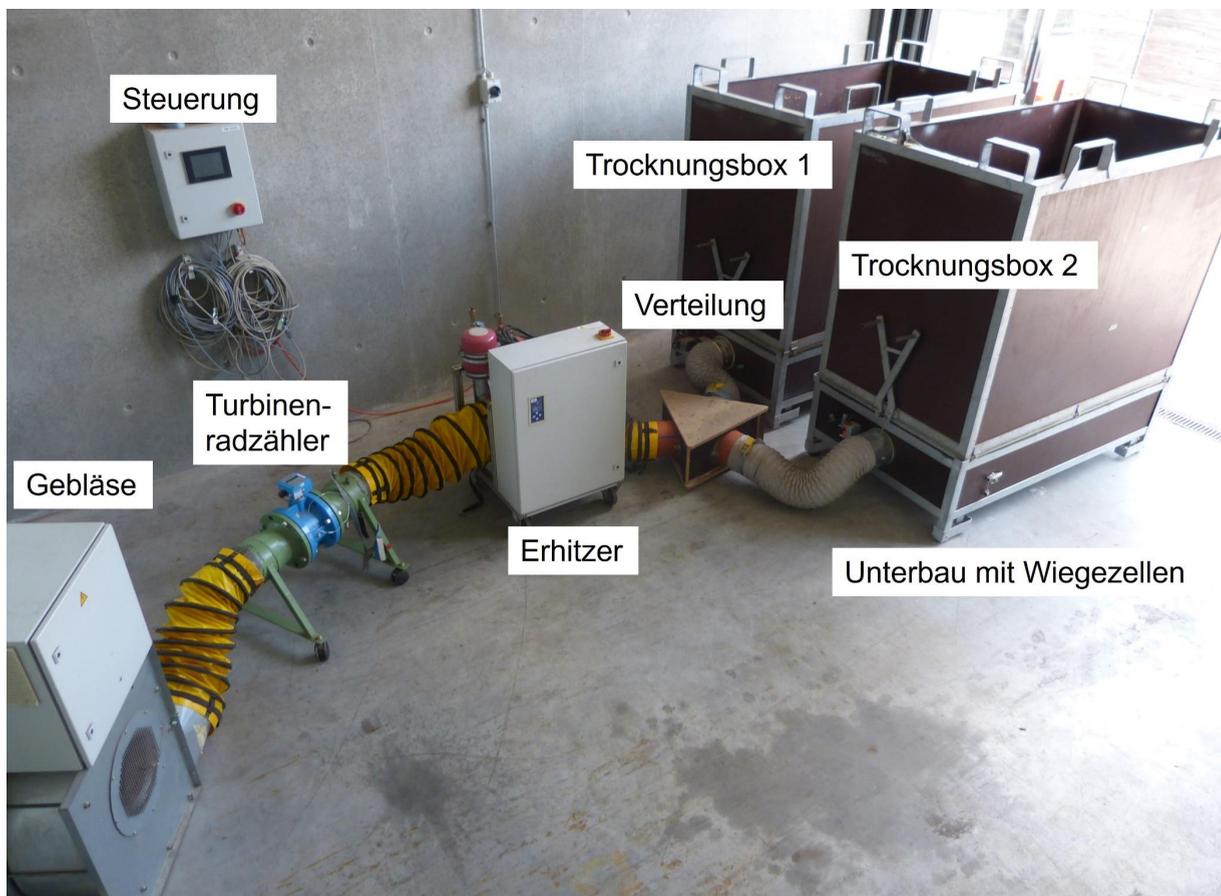


Abbildung 15: Aufbau der Brennstofftrocknung des TFZ

Neben einer Analyse des Trocknungsverhaltens war es u. a. Ziel, die Brennstoffe auf einen lagerstabilen Zustand zu bringen, um sie für die weitergehenden Versuche verlustarm lagern zu können. In den Fällen, in denen eine technische Trocknung nicht direkt am Tag der Zerkleinerung möglich war, wurde das Material in Big Bags mit Volumina von 0,5 bis 1 m³ eingelagert und diese nahezu luftdicht mit Verpackungsfolie umwickelt. Durch diese annähernd anaeroben Bedingungen sollten mikrobielle Abbauprozesse in den frischen Brennstoffen sowie eine unkontrollierte Trocknung vermieden werden. Die eingewickelten Big Bags wurden bis zum Beginn der technischen Trocknung in einem wind- und regengeschützten Außenlager zwischengelagert.

Die Trocknungsanlage selbst besteht aus zwei mobilen Trocknungsboxen, die in ihrer Grundeinheit jeweils aus selbstkonstruierten Holzkisten mit einem Innenvolumen von 1.650 × 950 × 1.320 mm bestehen. Als Bodenplatte werden je Box zwei Lochbleche mit einem Lochdurchmesser von 9 mm verwendet. Über einen Verriegelungsmechanismus können die beiden Bodensegmente zur Entleerung der Kisten nach unten hin aufgeklappt werden.

Bei dem Trocknungsvorgang werden die Kisten auf passgenaue Bodengruppen gestellt. In den Füßen der Bodengruppen befinden sich jeweils vier Wägezellen (K-SQB, Bische Wägetechnik GmbH), um die Masse der Trocknungsboxen kontinuierlich zu bestimmen.

Die Trocknung erfolgt über die Belüftung des Schüttguts durch ein mobiles Gebläse (TLR, Himmel Maschinen). Als Einstellungen wurde ein Volumenstrom von etwa 600 m³/h (gesamt) für beide Trocknungsboxen gewählt. Um die Luft zu erwärmen, wurde zwischen dem Gebläse und den Trocknungsboxen ein Heizregister (Helios Ventilatoren AG) mit einer thermischen Leistung von 18 kW eingesetzt. Dies führte zu einer Erwärmung der Lufttemperatur direkt nach dem Heizregister auf ca. 50 bis 60 °C. In der zu trocknenden Schüttung hatte die Luft eine Temperatur von ca. 20 bis 40 °C. Der eingeblasene Volumenstrom wurde mittels eines Turbinenradgaszählers (TERZ 94, RMG Messtechnik GmbH) vor dem Heizregister bestimmt. Der erwärmte Luftstrom wird auf die beiden Trocknungsboxen aufgeteilt. Der Wassergehalt ($n = 5$) der Brennstoffe wurde zu Beginn jeder Trocknung nach DIN EN ISO18134-1 bestimmt.

Bei der Trocknung der Brennstoffe entweicht Wasser aus der Schüttung. Sofern der Ausgangswassergehalt (M_{Start}) und die Masse des Brennstoffs zu Beginn der Trocknung (m_{Start}) bekannt sind, kann mittels Formel (3.2) das Zielgewicht bei einem Zielwassergehalt (M_{Ziel}) berechnet werden. In den hier durchgeführten Versuchen wurde der Zielwassergehalt auf jeweils 15 m-% angesetzt. Bei Erreichen des berechneten Zielgewichts schließt die Steuerung der Trocknung automatisch die Zuluftklappen an der Bodeneinheit der Trocknungsboxen.

$$m_{\text{Ziel}} = \frac{m_{\text{Start}} \times (100 - M_{\text{Start}})}{(100 - M_{\text{Ziel}})} \quad (3.2)$$

Wobei:

m_{Start} = Ausgangsmasse in kg

m_{Ziel} = Zielgewicht in kg

M_{Start} = Ausgangswassergehalt in m-%

M_{Ziel} = Zielwassergehalt in m-%

Über den gesamten Zeitraum der Trocknung wurde die Massenveränderung der Trocknungsboxen, der Volumenstrom der eingeblasenen Luft und die Energieverbräuche des Gebläses sowie des Heizregisters kontinuierlich aufgezeichnet. Das Aufzeichnungsintervall betrug zehn Sekunden. Sowohl die Steuerung als auch die Datenaufzeichnung erfolgte über die Software LabView 2.0.

Bei der Berechnung des Wirkungsgrads der Trocknung wurde die benötigte Leistung zur Verdampfung des entfernten Wassers berechnet und in Bezug zur tatsächlich aufgewendeten elektrischen Energie (elektrischer Energiebedarf Lüfter [W_L] und Heizregister [W_H]) gesetzt. Dabei wurde die Verdampfungsenthalpie (H_v) des Wassers bei der vorliegenden Temperatur (T) in kJ/mol Wasser nach einer empirischen Formel (3.3) errechnet und nach der Umrechnung in kWh/kg (3.4) durch die Summe der benötigten elektrischen Energie für Lüfter (W_L) und Heizregister (W_H) geteilt (3.5). Das Vorgehen ist in den folgenden Formeln beschrieben. Bei allen Trocknungsversuchen wurde nur der Wassergehaltsbereich

von 30 m-% auf 20 m-% betrachtet, um die Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen zu gewährleisten.

$$H_v \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right] = \left(50,9 - 0,9298 \times \frac{T}{1.000} - 65,19 \times \left(\frac{T}{1.000} \right)^2 \right) \quad (3.3)$$

$$H_v \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] = H_v \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right] \times \frac{1}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \times 1.000 \times \frac{1}{3.600} \quad (3.4)$$

$$\eta_{\text{Trocknung}} = \frac{H_v \times m_w}{W_L + W_H} \quad (3.5)$$

Wobei:

H_v = Verdampfungsenthalpie von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur in kJ/mol

T = vorherrschende Temperatur in K

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ = molare Masse von Wasser in g/Mol

$\eta_{\text{Trocknung}}$ = Wirkungsgrad der technischen Trocknung in %

m_w = Masse des entfernten Wassers in kg

W_L = genutzte elektrische Energie für den Lüfter in kWh

W_H = genutzte elektrische Energie für das Heizregister in kWh

Nach der Trocknung wurde das Material aus den Trocknungsboxen entleert und anschließend durch dreimaliges Umschaukeln homogenisiert. Nach der Homogenisierung wurden Proben für Wassergehaltsbestimmungen ($n = 5$) sowie zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ($n = 1$) entnommen.

3.1.7 Belüftungswiderstand

Für die Bestimmung des Belüftungswiderstands wurde ein am TFZ konstruierter Strömungskanal verwendet [58] [62]. Hierbei wird das jeweils zu untersuchende Material in einen Metallzylinder gefüllt und mit einem regulierbaren Gebläse belüftet. Jede Holzhack-schnitzel-Charge (sowohl Effits als auch die Referenzbrennstoffe) wurde zweimal gemessen, um eventuelle Variationen der Schüttdichte durch das Befüllen zu berücksichtigen ($n = 2$). Durch den ermittelten Druckverlust über die Schütthöhen und die Strömungsgeschwindigkeit kann der spezifische Belüftungswiderstand für jede einzelne Brennstoffprobe berechnet werden. Abbildung 16 veranschaulicht den schematischen Versuchsaufbau mit allen angeschlossenen technischen Geräten.

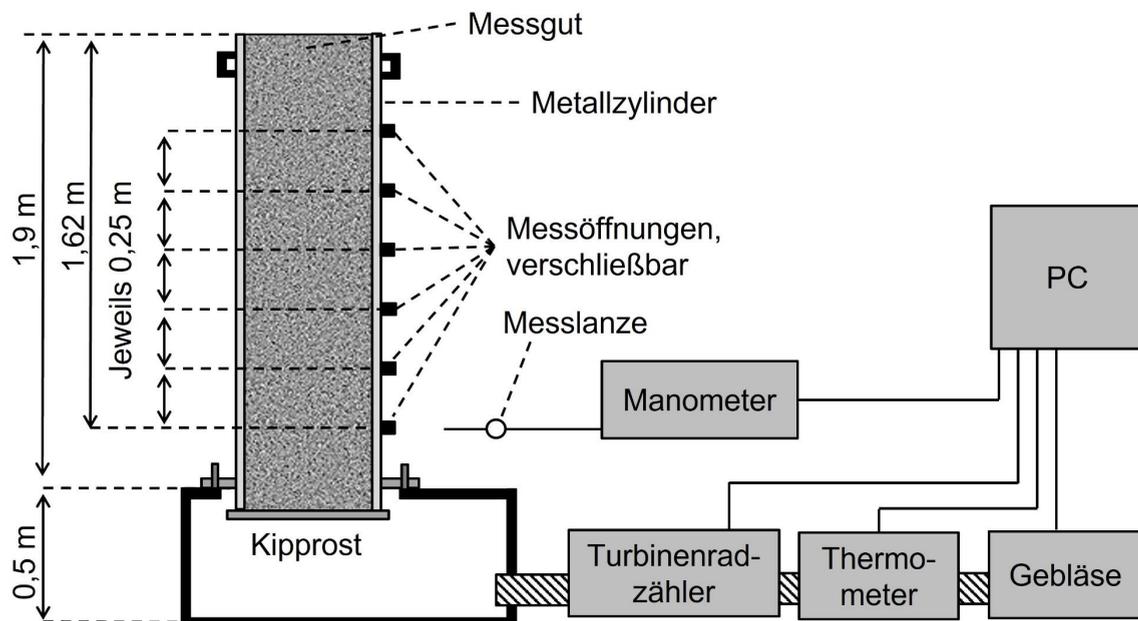


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Belüftungswiderstands

Der eigentliche Strömungskanal besteht aus einem Metallzylinder mit einem Innendurchmesser von 500 mm, einer Höhe von 2.000 mm und einem luftdurchlässigen Kipprost an der Unterseite. Der Strömungskanal wird an eine sich darunter befindenden Holzbox (Bodeneinheit) angeschlossen. Die Schnittstelle zwischen Metallzylinder und Holzbox ist durch Schaumstoffdichtungen abgedichtet. An einer Seite der Bodeneinheit ist eine Öffnung für die Luftzuführung durch ein Gebläse (TLR, Himel Maschinen GmbH & Co. KG) und einen dazwischengeschalteten Turbinenradzähler (TERZ 94, RMG Messtechnik GmbH) angebracht.

Auf einer Höhe von 380 mm am Metallzylinder befindet sich die erste von insgesamt sechs verschließbaren Messöffnungen, die im Abstand von je 250 mm zueinander angebracht sind. Die Messöffnungen besitzen einen Durchmesser von 5 mm und werden zur Messung des statischen Drucks benötigt. Über eine Messlanze, die bis zur Mitte des Metallzylinders reicht, kann der statische Druck bei variablen Luftgeschwindigkeiten ermittelt werden. Dafür ist die Messlanze mit einem PVC-Schlauch an einem Manometer (Differenzdruckumformer P26, Halstrup-Walcher GmbH, Kirchzarten) verbunden. Im Manometer sind drei Sensoren mit Messbereichen von 0 bis 100 Pa, 0 bis 500 Pa und 0 bis 2500 Pa verbaut, damit möglichst präzise Ergebnisse sowohl im niedrigen als auch höheren Druckbereich erzielt werden können. Das Manometer sowie der Turbinenradgaszähler sind über eine Schnittstelle an einen PC angeschlossen. Über das Programm LabView 2.0 ist das Ablesen der Messwerte am Bildschirm möglich. Auch in LabView enthalten ist die Steuerung des Gebläses, das variabel zwischen 0 % (Leerlauf) und 100 % (Nennlast) der Drehzahl gesteuert werden kann.

Der Messzylinder wird mittels eines Lastenkrans aus einem Big Bag auf exakt 2.000 mm Füllhöhe mit Brennstoff befüllt, wodurch ein Schüttvolumen von etwa 0,4 m³ entsteht. Überschüssiges Material wird mit einem Kantholz abgestrichen. Gestartet wird die Messung bei Leerlauf des Gebläses. Dabei werden sowohl der Umgebungsdruck, die Umgebungstemperatur, der Volumenstrom als auch der statische Druck an jeder Messstelle festgehalten. Dies wird für jede der elf Gebläseleistungen (0 % bis 100 % in 10-Prozentpunkte-Schritten) durchgeführt. Der Belüftungswiderstand (ΔP in Pa/m) bei der jeweils festgelegten Gebläseleistung wird durch die lineare Steigung des statischen Drucks (in Pa) beider Durchgänge zwischen den einzelnen Messstellen (Schütthöhe in m) ermittelt. Nach der Messung wird der stehende Strömungskanal von der sich darunter befindlichen Holzbox mit einem Lastenkran gelöst und über den Kipprost an der unteren Zylinderöffnung wieder in einen Big Bag entleert.

Anhand der gemessenen Werte können mittels Regressionen die zwei dimensionslosen Parameter a und b nach den Formeln nach ERGUN [34] und RAMSIN [75] bestimmt werden, die klassischerweise für die Darstellung des Belüftungswiderstands (ΔP in Pa/m) im Verhältnis zum Volumenstrom bzw. zur Luftgeschwindigkeit (V in m/s) verwendet werden:

$$\text{Ramsin: } \Delta P = aV^b \quad (3.6)$$

$$\text{Ergun (vereinfacht): } \Delta P = aV + bV^2 \quad (3.7)$$

Hierbei wird auf das „vereinfachte Modell“ von Ergun zurückgegriffen. Eine für das ausführliche Modell benötigte exakte Bestimmung des Parameters Porosität war am TFZ mit dem Brennstoff Effits nicht durchführbar. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung des Belüftungswiderstands ist in TFZ-Bericht Nr. 40 [62] und in KUPTZ et al. (2021) [58] wiedergegeben.

Um den spezifischen Belüftungswiderstand von Holzhackschnitzeln ohne aufwändige Messung abschätzen zu können, sind neben der Luftgeschwindigkeit V vor allem materialspezifische Brennstoffparameter wie die Partikelgröße oder die Partikelform von Relevanz. Ziel ist es, die für die Berechnung des Belüftungswiderstands nach RAMSIN und ERGUN benötigten, dimensionslosen Regressionsparameter a und b direkt anhand physikalischer Brennstoffparameter wie z. B. Schüttdichte, Partikelgrößenverteilung oder Länge-zu-Breite-Verhältnis zu ermitteln. Zu diesem Zweck kann mittels multipler linearer Regressionsanalyse aus bestehenden Messdaten ein Modell entwickelt werden. Da für ein eigenes Berechnungsmodell in den hier dargestellten Versuchsreihen die Anzahl an Einzelmessungen zum Belüftungswiderstand insgesamt jedoch sehr gering war ($n = 10$ je Aufbereitungstechnik), wurde eine eigene multiple Regressionsanalyse nicht durchgeführt. Stattdessen wurde das bereits bestehende, durch KUPTZ et al. [58] entwickelte Berechnungsmodell, das auf der vereinfachten Formel nach ERGUN basiert, verwendet und für die Brennstoffe aus dem Projekt „InnoFuels“ validiert. Dieses Berechnungsmodell wurde

speziell für Holzhackschnitzel entwickelt. Es verwendet sowohl normative Brennstoffparameter wie die Schüttdichte als auch die Längen- und Formparameter der Bildanalyse. Es sind zwei Formeln für die Parameter a und b angegeben:

$$\begin{aligned}
 Ergun_a = & 58,7 + 88,1 \times LzuB + 1,65 \times MinFer^2 + 0,08 \times (BD_{15} \times Median) \\
 & - 0,15 \times (BD_{15} \times MinFer) + 0,26 \times (Q_{25} \times Median) \\
 & - 10,9 \times (Q_{25} \times KFF) + 8,4 \times (Median \times KFF) \\
 & - 4,1 \times (Median \times LzuB) - 1,13 \times (Median \times MinFer) \\
 & + 16,9 \times (KFF \times LzuB)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
 Ergun_b = & 685,6 - 438 \times KFF + 523 \times LzuB - 3,2 \times Q_{25}^2 + 7,8 \times MinFer^2 \\
 & + 0,25 \times (BD_{15} \times Median) - 0,36 \times (BD_{15} \times MinFer) \\
 & + 2,76 \times (Q_{25} \times Median) + 21,9 \times (Median \times KFF) \\
 & - 15,3 \times (Median \times LzuB) - 5,78 \times (Median \times MinFer)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Wobei:

BD_{15} = Schüttdichte bei einem Wassergehalt von 15 m-% in kg/m³

Q_{25} = 25%-Quantil in m

$Median$ = Median in m

$LzuB$ = Länge-zu-Breite-Verhältnis

$MinFer$ = minimaler Feret-Durchmesser

KFF = Kornformfaktor

Anhand des Belüftungswiderstands kann mithilfe von Formel (3.10) die zur Trocknung benötigte minimale Gebläseleistung ermittelt werden [48]. Diese ergibt sich aus dem Produkt der angenommenen Luftgeschwindigkeit durch das Schüttgut, der zu belüftenden Fläche und dem spezifischen Belüftungswiderstand. Dem ist noch der Wirkungsgrad des Gebläses und des Gebläsemotors entgegenzurechnen. Auf den absoluten Belüftungswiderstand wird in der Praxis zudem oft ein Sicherheitsfaktor von ca. 20 % aufgeschlagen [62].

$$L = \frac{V \times A \times P}{\eta_M \times \eta_G \times 3.600.000} \tag{3.10}$$

Wobei:

L = minimale benötigte Leistung des Gebläses in kW

V = Luftgeschwindigkeit in m³/h × m² bzw. m/h

A = Belüftungsfläche in m²

P = Belüftungswiderstand in Pa

η_M = Wirkungsgrad des Antriebsmotors

η_G = Wirkungsgrad des Gebläses

3.1.8 Förderbarkeit

Für die Untersuchung der Förderbarkeit der im Projekt angefallenen Brennstoffe wurde eine für den Versuch eigens entwickelte Messmethodik inklusive eines selbstkonstruierten Messaufbaus verwendet (Abbildung 17). Die Förderversuche wurden am Feuerungsprüfstand des TFZ realisiert. Der Versuchsaufbau soll den Austrag der Brennstoffe vom Brennstoffbunker in einen Kessel simulieren. Hierzu wurden reale Förderschnecken genutzt.

Für den Versuchsaufbau wurde eine Plattformwaage (KD 600, Mettler-Toledo) mit einem Messbereich von 0 bis 600 kg und einer zulässigen Gesamtbelastung von 3.500 kg genutzt. Die Ablesbarkeit betrug 5 g. Der mobile Austragsbehälter wurde auf der Plattformwaage platziert. Dieser hat ein Leergewicht von 120 kg und konnte über einen darüber hängendem Big Bag befüllt werden. Eine Austragsschnecke mit einem Durchmesser von 100 mm förderte das Material aus dem Austragsbehälter in einen Big Bag.

Eine an das Gesamtsystem angeschlossene Messtechnik nimmt während der Versuchsdauer die benötigte elektrische Leistung sowie die geförderte Masse an Brennstoff auf. Das Intervall der Aufzeichnung beträgt eine Sekunde. Die gemessenen Werte werden über das Programm LabView 2.0 aufgezeichnet. An der Messtrecke ist eine programmierbare elektrische Schalteinheit „Logo“ Typ 6ED1 (Siemens Energy) angeschlossen. Durch eine Programmierung konnte die gewünschte Taktung für die Förderversuche eingestellt werden.

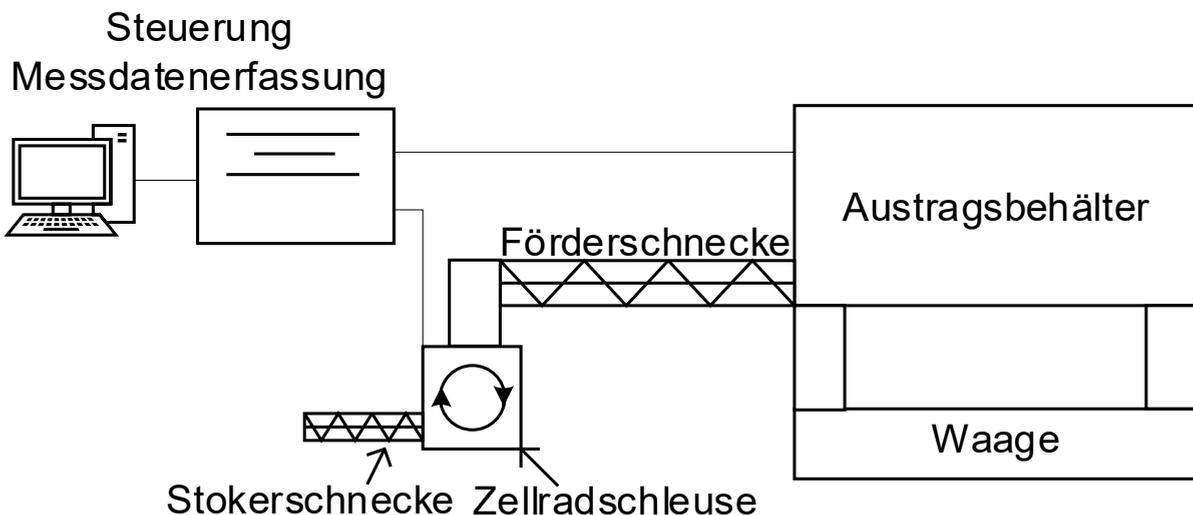


Abbildung 17: Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Förderbarkeit

Die Aktivierung der Fördertechnik sowie die Steuerung des Leistungsbereichs erfolgten über die am Bunker angeschlossene Messstrecke sowie den Messrechner. Manuelle Eingriffe in den Versuchsablauf, wie das Beseitigen von Brückenbildungen und das etwaige Nachfüllen des Bunkers, wurden zeitlich erfasst und im Anschluss bei der Auswertung der

Ergebnisse in den Messwerten korrigiert. Die Messung der Förderbarkeit wurde anhand des gravimetrischen Durchsatzes des Förderguts vom Brennstoffbunker in einen Kessel (in kg/h) quantifiziert. Dabei gilt:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (3.11)$$

Wobei:

\dot{m} = Massenstrom in kg/h

m = geförderte Masse in kg

t = Zeit in h

Da im realen Betrieb ein Kessel selten mit konstant 100 % seiner Nennleistung betrieben wird, sondern je nach benötigter Wärme und Ladezustand des Pufferspeichers taktet, wurde auch für den Förderversuch eine variable Taktung gewählt. Die Förderleistung der Austragung kann allerdings nur in zwei Zuständen betrieben werden: ausgeschaltet und in Nennlast. Deshalb wurden zur Bestimmung der Förderleistung zehn Leistungspunkte festgelegt, die eine Kesselleistung zwischen 10 % und 100 % simulieren sollten. Die zehn verschiedenen Leistungspunkte wurden zu je acht Minuten gemessen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Leistungseinstellungen bei der Bestimmung der Förderfähigkeit (jeder Leistungspunkt wurde 480-mal wiederholt, was einer Dauer von acht Minuten entspricht)

| Leistung in % | Dauer Nennlast in s | Dauer Stillstand in s |
|------------------|------------------------|--------------------------|
| 10 | 1 | 9 |
| 20 | 2 | 8 |
| 30 | 3 | 7 |
| 40 | 4 | 6 |
| 50 | 5 | 5 |
| 60 | 6 | 4 |
| 70 | 7 | 3 |
| 80 | 8 | 2 |
| 90 | 9 | 1 |
| 100 | 10 | 0 |

Dabei ergibt sich eine gesamte Versuchslaufzeit von 4.800 Sekunden. Bei einem Probe-
lauf wurde ein maximaler Massenstrom von 125 g/s gemessen. Dieser Wert wurde bei
einer mechanischen Einwirkung auf die Waage, z. B. bei der Befüllung des Bunkers oder
Entfernung von Brücken, überschritten. Aus diesem Grund wurde bei der Auswertung der

Daten eine Plausibilitätsprüfung implementiert, die größere Gewichtssprünge über 500 g/s aus der Messung entfernt. Die geförderte Masse wurde aus der kumulierten Gewichtsabnahme des Hackschnitzelbunkers ermittelt.

Um Brennstoffproben für Sieb- und Bildanalysen zu erhalten, wie sie nach der Förderung im Kessel anfallen würden, wurde jeder Brennstoff in einem separaten Versuch zusätzlich durch eine Zellradschleuse und mit Stokerschnecke in den Brennraum des für die Feuerungsversuche verwendeten Hackschnitzelkessels (Abschnitt 3.1.9.1) gefördert, ohne einen Zündvorgang zu starten (siehe Abbildung 17). Dadurch konnte eine kleine Teilmenge von acht Litern für die Sieb- und Bildanalyse gewonnen werden. Die Einschubschnecke des Hackschnitzelkessels hat eine Weite von 80 mm und ist damit 20 mm kleiner dimensioniert als die Förderschnecke.

3.1.9 Feuerungsversuche

Im Rahmen des Projekts wurden mit allen Brennstoffen aus den stationären Hackversuchen Emissionsmessungen an den Feuerungsprüfständen von TFZ und HFR durchgeführt. Insgesamt wurden zwölf Hackschnitzelbrennstoffe verwendet. Dabei kamen zwei Hackschnitzelkessel, einer am TFZ und einer an der HFR, zum Einsatz. Insgesamt wurden 24 Feuerungsversuche durchgeführt.

3.1.9.1 Prüfstandsaufbau und Messdurchführung am TFZ

Der Aufbau des Prüfstands am TFZ ist in Abbildung 18 dargestellt. Bei dem am TFZ verwendeten Hackschnitzelkessel handelt es sich um einen 20-kW-Kessel aus dem Jahr 2019 mit einem Stufenrost und einer seitlichen Brennstoffzufuhr. Somit gelten für ihn die Grenzwerte der Stufe 2 nach 1. BImSchV.

Die Messstrecke bestand aus Edelstahlrohren (V2). Der untere Teil vom Abgasstutzen bis zur Entkopplung hatte einen Innendurchmesser von 130 mm. Der obere Teil der Messstrecke wurde für eine verbesserte Abgasgeschwindigkeitsmessung auf 80 mm verjüngt.

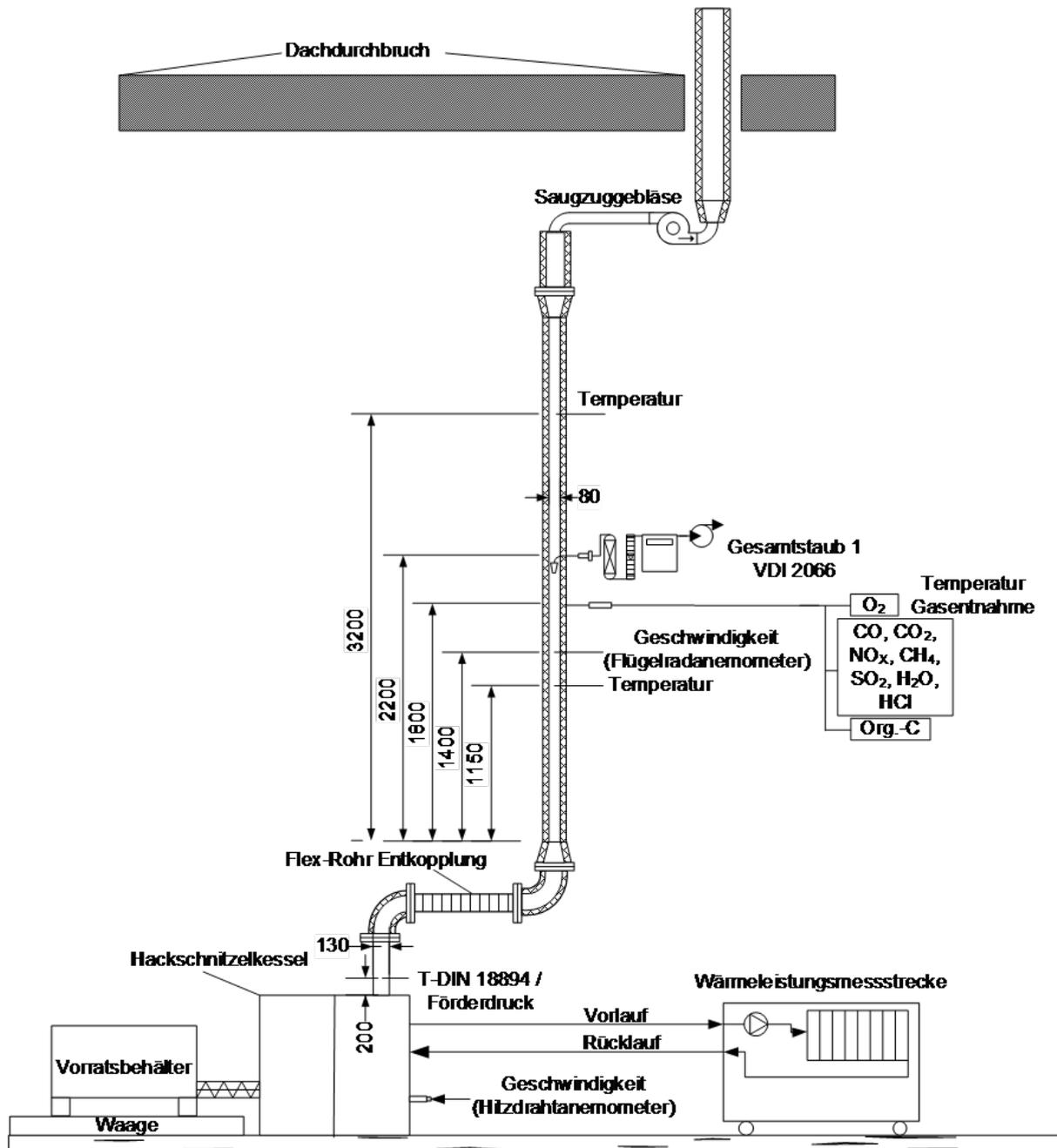


Abbildung 18: Versuchsaufbau für die Messungen am Hackschnitzelkessel auf dem Feuerungsprüfstand des TFZ

Zunächst erfolgte vor jedem Feuerungsversuch eine vollständige Reinigung des Kessels (Brennkammer, Aschekasten, Wärmetauscher), der Brennstoffzufuhr und des Vorratsbehälters für den Brennstoff. Der Brennstoffbehälter wurde mit ausreichend Material vor dem Start der Messung befüllt. Nach dem Erreichen stationärer Bedingungen bei Nennlast erfolgte eine kontinuierliche Messung der gasförmigen Emissionen über mehrere Stunden. Fünf gravimetrische Gesamtstaubmessungen zu je 30 Minuten wurden während der stationären Phase gleichmäßig verteilt auf ca. sechs Stunden Nennlastbetrieb durchgeführt. Nach dem Betrieb wurde die Feuerung ausgeschaltet und kühlte über Nacht vollständig

ab. Die Messung der Staubemissionen erfolgte in Anlehnung an VDI 2066 Blatt 1 mit Quarzplanfiltern und wurden vor und nach der Beladung bei 160 °C für jeweils eine Stunde thermisch behandelt. Anschließend wurden sie in einem Exsikkatorschrank für mindestens zwölf Stunden gelagert und auch im Exsikkator gewogen. Die Staubsonden wurden stets am Ende eines Messtags ausgebaut und mit Aceton gespült. Die Rückstände aus der Spülflüssigkeit wurden nach dem Verdampfen des Acetons proportional zur Beladung der Filter rechnerisch auf die Einzelmessungen verteilt. Die Filtrationstemperatur während der Staubprobennahme wurde auf 160 °C eingestellt. Die Messung der Gaskomponenten CO und CO₂ erfolgte mit NDIR-Einzelkomponentenmessgeräten und die Messung der Sauerstoffkonzentration paramagnetisch (AO2020, ABB Automation GmbH). NO_x wurde mittels eines Chemilumineszenzdetektors (CLD 822 Mhr Analysator, Eco Physics GmbH) und der Wasserdampfgehalt im Abgas mittels FTIR (FTIR DX4000N, Ansyco GmbH) bestimmt.

Für die Messung des Abgasvolumenstroms wurde ein Flügelradanemometer (Strömungssensor ZS25/25-ZG4, Höntzsch GmbH) verwendet. Die Erfassung des Brennstoffmassenstroms erfolgte durch kontinuierliche Wägung des Brennstoffvorratsbehälters mittels einer Plattformwaage (MT KD600, Mettler-Toledo GmbH) mit einer Auflösung von 0,005 kg. Der Hackschnitzelkessel wurden bei Nennwärmeleistung (20 kW) und bei einem vom Hersteller vorgegebenen konstanten Förderdruck von -8 Pa betrieben.

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

3.1.9.2 Prüfstandsaufbau und Messdurchführung an der HFR

An der HFR wurden die Brennstoffe in einem 50-kW-Hackschnitzelkessel mit seitlichem Einschub und Raupenbrenner verbrannt. Der Kessel ist laut Herstellerangaben auf Holzhackschnitzel der Qualität A1 bis B1 nach DIN EN ISO 17225-4 mit einer Partikelgröße P16s und P31s ausgelegt. Für die an der HFR verwendete Feuerung gelten ebenfalls die Grenzwerte der Stufe 2 nach 1. BImSchV.

Zur Erfassung des Massenstroms wurde der Kessel, der einen integrierten Bunker hat, auf einer Waage platziert (Combics 2, Sartorius AG). Die Anzeige der Waage wurde bei Start und Ende jedes Nennlastversuchs notiert. Im Aufbau wurden des weiteren Thermoelemente (Typ K) zur Erfassung der Rauchgastemperatur sowie ein Pyrometer zur Absaugung eines Teils des Gasstroms installiert. Dieser wurde über nicht dispersive Infrarot-Spektroskopie (URAS 26, ABB Automation GmbH) auf seine Gehalte an Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Stickstoffoxide (NO_x) sowie Schwefeldioxid (SO₂) untersucht und die Werte sekundlich erfasst. Ebenfalls wurde der Restsauerstoff, der mittels paramagnetischer Messung (MAGNOS 206, ABB Automation GmbH) ermittelt wurde, aufgezeichnet. Der Unterdruck im Prüfaufbau wurde über einen Rauchgasventilator auf

-12 ± 2 Pa geregelt. Der Hackschnitzelkessel verfügte über ein vertikales Abgasrohr (150 mm) mit einer Abzweigung.

Um die Emissionen an Gesamtstaub quantifizieren zu können, wurde die gravimetrische Outstack-Methode angewandt. Dafür wurde eine Lanze mit Sonde mittig und mit einem Ansaugrohr von 12 mm Durchmesser der Rauchgasrichtung entgegengesetzt in das Abgasrohr eingeführt. Die Sonde, die eine mit Glaswolle gestopfte Filterhülse sowie einen zusätzlichen Mikroglasfaser-Filter mit 47 mm Durchmesser enthält, wurde durchgehend auf 180 °C beheizt und mit einem Rauchgasstrom von ca. 700 l/h durchströmt. Vor Einsatz in den Filterhalter wurden die Filter bei 200 °C, danach bei 180 °C für mindestens 45 Minuten ausgeheizt. Nach den thermischen Behandlungen wurden sie in einem Exsikkator für ≥ 12 h auf 20 °C in einem hierfür gezielt temperierten Raum abgekühlt. Eine Spülung der Sonde mit Aceton (vgl. Abschnitt 3.1.9.1) fand nicht statt. Zur Erfassung der Gewichts-differenz wurde eine Präzisionswaage (CPA 1245, Sartorius AG) verwendet. Je Brennstoff fanden mindestens fünf, in zwei Einzelfällen lediglich drei Messungen von jeweils 45 Minuten statt. Beim Referenzbrennstoff „Waldrestholz aus Laubholz“ wurden eine Filterhülse und ein Planfilter verwendet. Bei allen anderen Materialien wurde aufgrund der geringeren Staubmenge lediglich ein Planfilter verwendet.

3.1.10 Statistische Auswertungen

Alle statistischen Analysen der Messdaten wurden mit der Software Origin Pro 2019 (TFZ) durchgeführt. Für den Test auf Normalverteilung der Messdaten wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Zur Varianzanalyse für den direkten Vergleich, ob sich zwei Mittelwerte signifikant unterscheiden, wurde ein t-Test für zwei Stichproben verwendet. Lag keine Normalverteilung der Daten vor, wurde anhand eines Mann-Whitney-Tests auf signifikante Unterschiede getestet. Die Unterschiede in den Messdaten wurden als signifikant angenommen, sobald der p -Wert $\leq 0,05$ war. Genauere Unterscheidungen werden jeweils an entsprechender Stelle in den Ergebnisdarstellungen angezeigt.

Wurden mehrere Mittelwerte miteinander verglichen, beispielsweise bei der Auswertung der Feuerungsversuche, wurde mit einer ANOVA mit dem Tukey-Post-hoc-Test gearbeitet. Für Korrelationsanalysen wurden Pearson-Korrelationen berechnet. Sobald in den folgenden Ausführungen von Signifikanz oder Korrelation die Rede ist, sind stets diese Bedingungen erfüllt. Die Abhängigkeiten einzelner Parameter untereinander, beispielsweise der lineare Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt im Brennstoff und den NO_x-Emissionen bei der Verbrennung, wurden zudem mittels Regressionsanalyse und Bestimmtheitsmaß bewertet.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

3.2.1 Zerkleinerung

Die Zerkleinerung der Rohmaterialien bei den stationären Versuchen 2019 verlief in allen Fällen ohne Komplikationen. In Tabelle 6 sind die erzeugten Volumina und Massen aufgeführt.

Tabelle 6: Erzeugte Brennstoffmassen, -volumina und Arbeitskrfteinsätze bei den stationären Hackversuchen 2019 mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker

| Brennstoff | Erzeugtes Volumen | Erzeugte Masse | Beteiligte Personen bzw. Maschinen |
|------------|-------------------|----------------|---------------------------------------|
| | in SRM | in t | |
| PA-E | 9,64 | 3,42 | 3 Personen |
| PA-R | 8,69 | 3,48 | 3 Personen |
| ERH-F-E | 21,23 | 6,62 | 3 Personen |
| ERH-F-R | 16,40 | 5,46 | 3 Personen |
| ERH-B-E | 6,48 | 1,90 | 4 Personen |
| ERH-B-R | 18,82 | 6,86 | 4 Personen |
| WRH-N-E | 6,28 | 1,80 | 1 Kran |
| WRH-N-R | 8,40 | 2,40 | 1 Kran |
| WRH-L-E | 5,63 | 1,62 | 1 Kran |
| WRH-L-R | 7,73 | 2,34 | 1 Kran |

Die Volumina lagen zwischen 5,63 SRM und 21,23 SRM. Die Unterschiede resultierten vor allem aus der Projektplanung, d. h. aus den im Anschluss an die Zerkleinerung benötigten Mengen an Material. So wurden aus den Brennstoffen aus ERH-F zusätzlich 10 SRM an Material für die Lagerungsversuche in kleinen Haufwerken benötigt. Folglich mussten für diese Brennstoffe 15 bis 20 SRM je Material erzeugt werden. Das höhere Volumen des Sortiments ERH-B-R ist dagegen darauf zurückzuführen, dass ein hoher Anteil des ungehackten Ausgangsmaterials Stammdurchmesser aufwies, die den maximalen Durchmesser des Effiters 20.30 überstiegen und somit mit dem Referenzhacker zerkleinert werden mussten.

Die erzeugten Massen lagen zwischen 1,62 t und 6,86 t (Frischmasse), abhängig von Bereitstellungskette und Ausgangsmaterial. Die Brennstoffe unterschieden sich bezüglich ihrer Schüttdichten und Wassergehalte (siehe Abschnitt 3.2.1.2).

Bei den Sortimenten PA und ERH-F waren jeweils drei Personen mit der Beschickung der Hacker beschäftigt. Bei ERH-B waren bei beiden Bereitstellungsketten jeweils vier Personen tätig. Die höhere Personenanzahl bei der Zerkleinerung des Buchenholzes ist durch

die höhere Dichte und den größeren Durchmesser der Stämme und somit durch die höheren Massen der Buchenstämme zu erklären. Hier wurde, um einer Überlastung des Personals vorzubeugen, die Anzahl der Mitarbeiter erhöht.

Bei den Brennstoffen aus Waldrestholz war aufgrund des „Ineinandergreifens“ der sehr streichen Materialien keine händische Beschickung möglich. Der Einsatz eines Forstkrans bei beiden Waldrestholz-Sortimenten ist somit durch die physikalische Ausgestaltung der Rohmaterialien zu erklären. Da Waldrestholz auch in der Praxis i. d. R. nicht per Hand beschickt wird, wurde während der Versuche entschieden, eine Kranbeschickung zu verwenden.

3.2.1.1 Prozessparameter

Die auf die Trockenmasse bezogenen Durchsatzraten (in t_{wf}/h) der Maschinen unterschieden sich bei Rohmaterialien wie auch Zerkleinerungsverfahren (Abbildung 19).

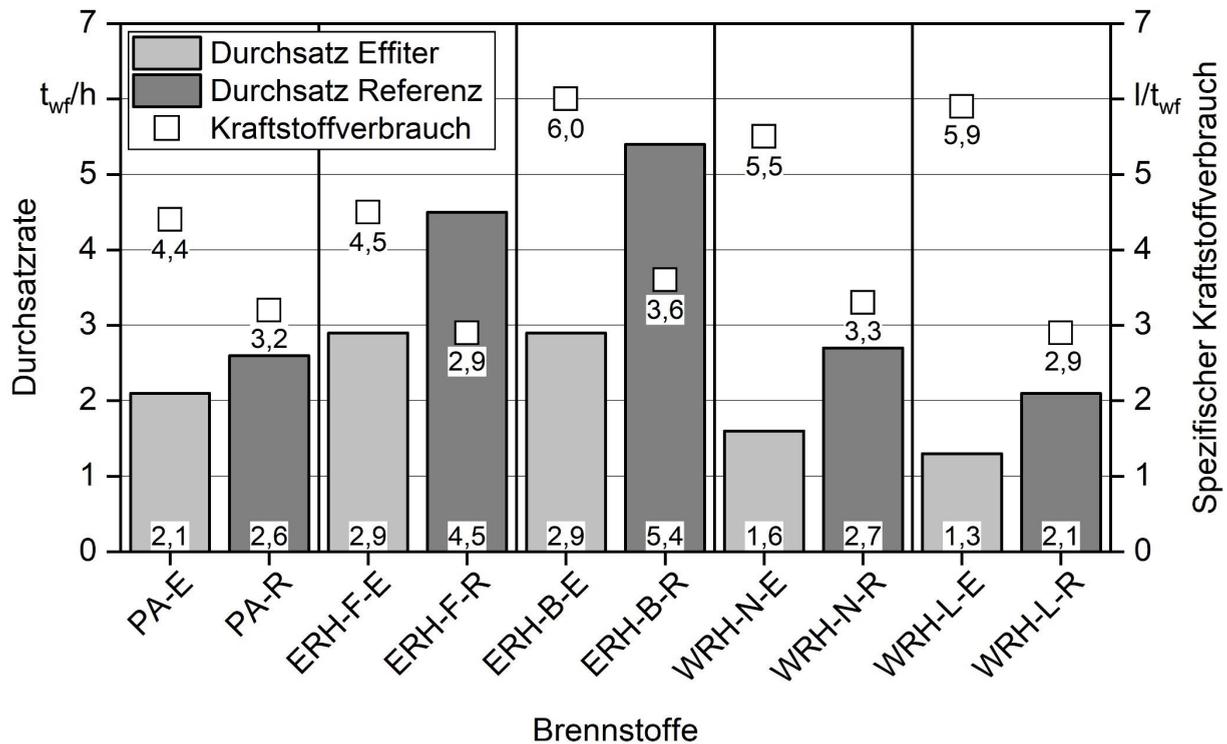


Abbildung 19: Spezifische, massenbezogene Durchsatzraten des jeweiligen Hackers und spezifischer Kraftstoffverbrauch (Diesel) des Antriebsschleppers bei den stationären Versuchen 2019 mit dem Effiter 20.30 und einem Referenzhacker ($n = 1$; wf = wasserfreie Bezugsbasis)

Beide Sortimente aus Energierundholz Fichte und Buche (ERH-F und ERH-B) wiesen generell höhere Durchsatzraten als die übrigen Sortimente auf. ERH-B erreichte bei der Zerkleinerung mit dem Referenzhacker den höchsten Wert mit $5,4 t_{wf}/h$. Die hohen Durchsatzraten des Energierundholzes liegen vermutlich an den höheren Packungsdichten der

Stämme im Vergleich zu astreichen Materialien wie Waldrestholz oder KUP-Pappel [3] [4] [56] [59]. Die Unterschiede zwischen Fichte und Buche lassen sich wiederum über die höheren Rohdichten des Buchenholzes im Vergleich zur Fichte erklären (Buche: 680 kg/m^3 [wf], Fichte: 430 kg/m^3 [wf] [41]), möglicherweise aber auch über die größeren Stammdurchmesser des Buchenholzes.

Die spezifischen Durchsatzraten des Effiters 20.30 waren in allen Fällen niedriger als die des Referenzhackers. Die Unterschiede variierten dabei je nach Rohmaterial. Bei den Brennstoffen aus Pappel erreicht der Schneckenhacker ca. 80 % des Durchsatzes der Referenzmaschine. Der größte Unterschied trat bei der Zerkleinerung von ERH-B auf. Hier betrug die Durchsatzrate des Duplex-Schneckenhackers lediglich 54 % des Referenzhackers. Vor allem beim Buchenholz unterschieden sich die Stammdurchmesser bei den Versuchen aufgrund der manuellen Vorsortierung des Rohmaterials. Somit wurden dem Referenzhacker durchschnittlich dickere Stämme zugeführt als dem Effiter 20.30, was vermutlich die deutlich höheren Durchsatzraten beim Sortiment ERH-B-R im Vergleich zu ERH-B-E erklären dürfte. Somit sind die Durchsatzdaten beider Maschinen für das Sortiment ERH-B nicht direkt vergleichbar.

Eine weitere Erklärung für die generell niedrigeren Durchsatzraten des Effiters 20.30 kann die Bauweise der Maschine liefern. Bei der Zerkleinerung mit einem Schneckenhacker wird, anders als bei Trommel- oder Scheibenradhackern, keine Energie aus der Schwungmasse der Aggregate genutzt. Beim Effiter 20.30 werden die Antriebskräfte unmittelbar auf die Duplexschnecke ohne größere Anlaufverzögerung übertragen. Bei dem Referenzhacker beträgt die Masse des Rotors dahingegen etwa 1 t und erzeugt daher ein Drehmoment, sobald sie rotiert. Diese Energie kann zusätzlich für die Zerkleinerung genutzt werden.

Schlussendlich ist der Referenzhacker einer höheren Leistungsklasse zuzuordnen als der Schneckenhacker. Die Vergleichbarkeit beider Maschinen ist somit kaum gegeben. Der Hersteller des Referenzhackers empfiehlt sogar die Verwendung von Antriebsmaschinen mit einer höheren Motorleistung. Die Durchsatzleistung des Trommelhackers sollte sich also durch einen leistungsstärkeren Antrieb noch weiter steigern lassen [56] [84].

Der spezifische, auf die Masse bezogene Kraftstoffverbrauch bei der Zerkleinerung ($l_{\text{Diesel}}/t_{\text{wf}}$) lag beim Effiter 20.30 um 38,7 % (PA) bis 103,4 % (WRH-L) über dem Wert des Referenzhackers. Eine Auswertung der durchschnittlichen Dieserverbräuche pro Stunde über alle Versuche zeigte dagegen beim Effiter 20.30 mit 11,23 l/h annähernd denselben Kraftstoffverbrauch wie beim Referenzhacker mit 11,17 l/h, sodass die Variation in den spezifischen Kraftstoffverbräuchen hauptsächlich durch die unterschiedlichen Durchsatzraten zu erklären sein muss. Die durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche der beiden Maschinen decken sich in etwa mit dem Wert, den SPINELLI et al. (2021) [84] mit 12 l/h für Hacker mit einer Antriebsleistung von etwa 100 kW angeben.

3.2.1.2 Brennstoffqualität

Wassergehalt. Direkt nach der Zerkleinerung wurde der Wassergehalt der Brennstoffe bestimmt (Abbildung 20). Bei den Sortimenten PA und ERH-F lagen die Wassergehalte bei ca. 50 bis 60 m-% und somit in einem Bereich, der häufig für frisch geerntetes Holz aus dem Wald oder von Kurzumtriebsplantagen berichtet wird [48] [63] [71] [72].

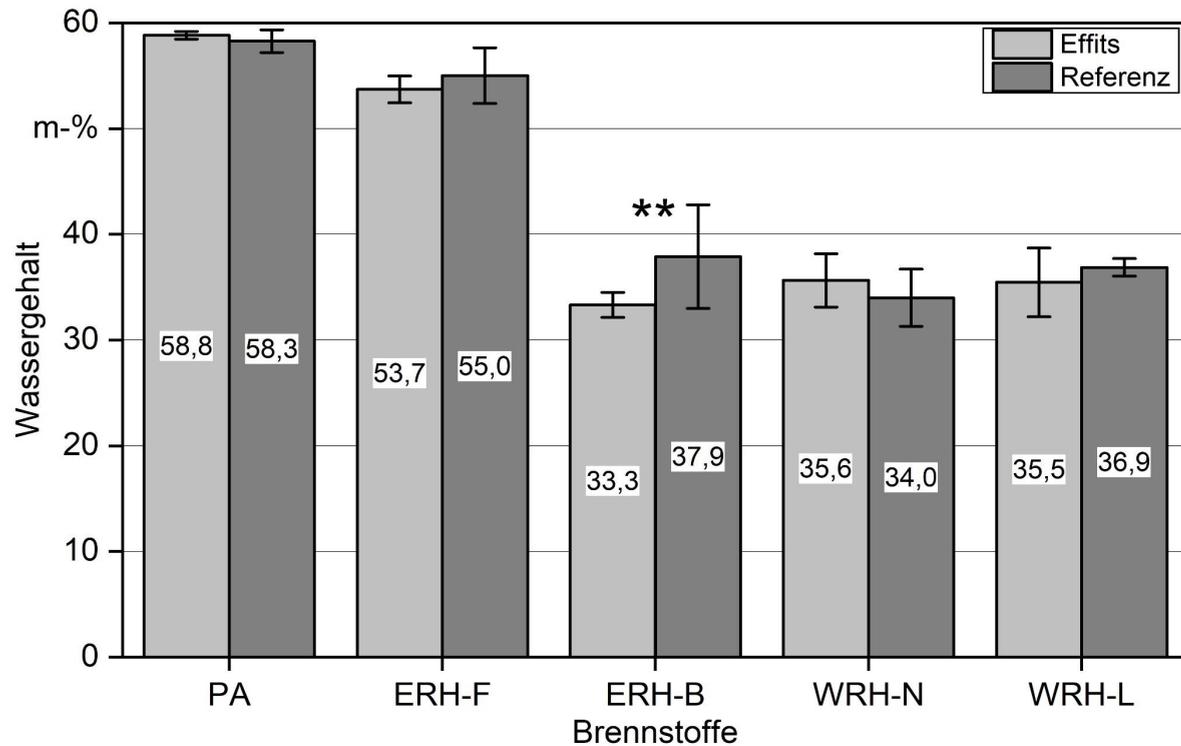


Abbildung 20: Wassergehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 10$; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** $p \leq 0,01$; Mann-Whitney-Test)

Bei ERH-B, WRH-L und WRH-N lagen die Wassergehalte dagegen zwischen 30 und 40 m-%. Diese Werte entsprechen nicht mehr erntefrischen Wassergehalten [48] [56] und es ist davon auszugehen, dass die Materialien bereits im Bestand oder während der Bereitstellung zwischengelagert und dabei vorgetrocknet wurden [33] [45] [76] [77]. Alle drei Materialien wiesen jedoch Wassergehalte ≥ 30 m-% auf, bei denen noch davon ausgegangen werden kann, dass bei der Lagerung der Brennstoffe mikrobielle Abbauprozesse ablaufen [48] und sie daher für die Versuche zur Lagerung (Abschnitt 3.1.5) geeignet sein sollten.

Ein statistisch signifikanter Unterschied im Wassergehalt zeigte sich lediglich zwischen ERH-B-R und ERH-B-E ($p \leq 0,01$). Eine mögliche Erklärung hierfür könnte der höhere Durchmesser der für den Referenzhacker genutzten Buchenstämme sein. Es ist wahrscheinlich, dass dünnere Stämme, die vor allem im Effiter 20.30 verwendet wurden, bei

der vorangegangenen Zwischenlagerung schneller getrocknet sind als die dickeren Stammstücke des Referenzhackers.

Schüttdichte. Die Schüttdichten der Brennstoffe (im wasserfreien Zustand) sind in Abbildung 21 dargestellt. Die höchsten Werte zeigten, unabhängig von der Art der Zerkleinerung, die Brennstoffe aus ERH-B. Buchenholz weist eine der höchsten Rohdichten einheimischer Baumarten auf [41], weshalb dieser Trend zu erwarten war.

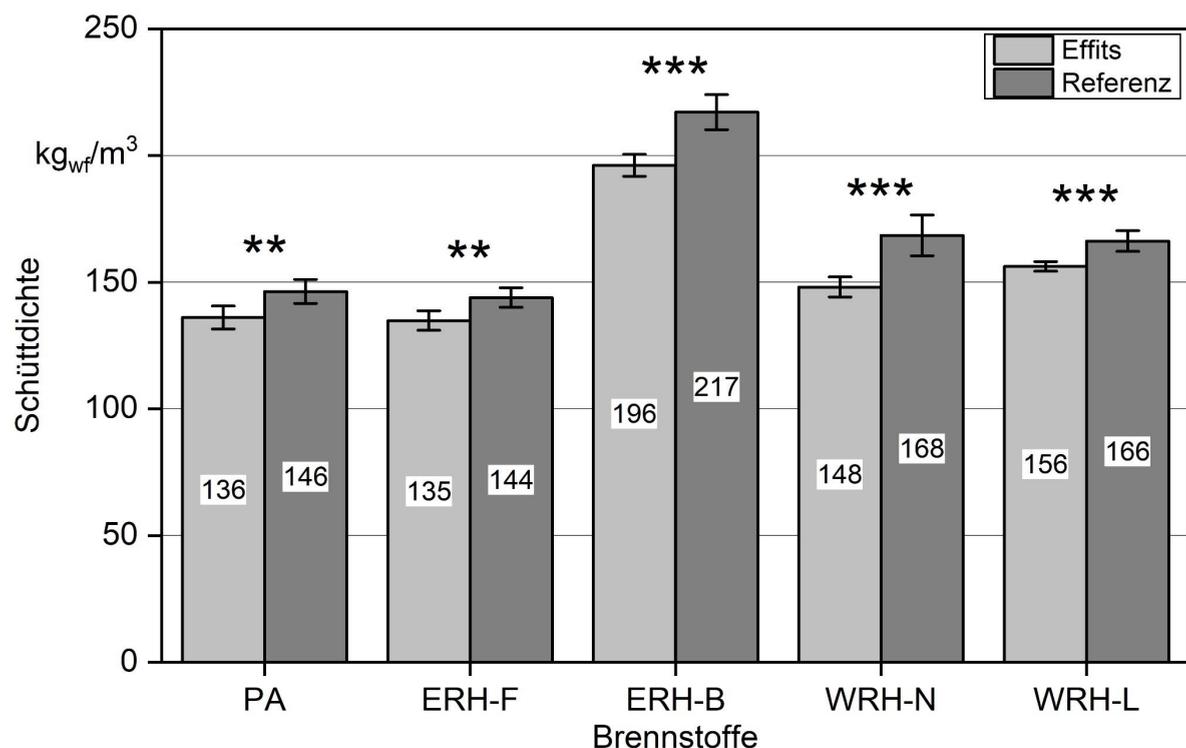


Abbildung 21: Schüttdichten der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (angegeben auf wasserfreier Bezugsbasis, Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 5$; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; t-Test und Mann-Whitney-Test)

In allen Fällen zeigten die Effits eine signifikant geringere Schüttdichte als die Referenzbrennstoffe ($p \leq 0,01$ und $p \leq 0,001$). Sie sind vermutlich auf die neuartige Partikelstruktur der Effits zurückzuführen. Angesichts der gröberer Partikel und des gleichzeitig geringen Feinanteils (siehe weiter unten) ist davon auszugehen, dass das Porenvolumen in der Schüttung ansteigt. Bei einem höheren Porenvolumen ist der Anteil der freien Luftzwischenräume in einem Schüttgut erhöht und die Schüttdichte nimmt ab [57]. Dies deckt sich mit dem optischen Eindruck der Brennstoffe (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6).

Feinanteil. Die Effits wiesen bei vier von fünf Sortimenten wesentlich geringere Massen an Feinanteil (Partikel mit einem Durchmesser $\leq 3,15$ mm) als die Referenzbrennstoffe auf (Abbildung 22). Lediglich für das Sortiment Pappel war der Effekt signifikant ($p \leq 0,01$). Es ist aber davon auszugehen, dass dies auch für die übrigen Sortimente bei einer Erhöhung der Stichprobenanzahl (hier: $n = 3$) der Fall gewesen wäre.

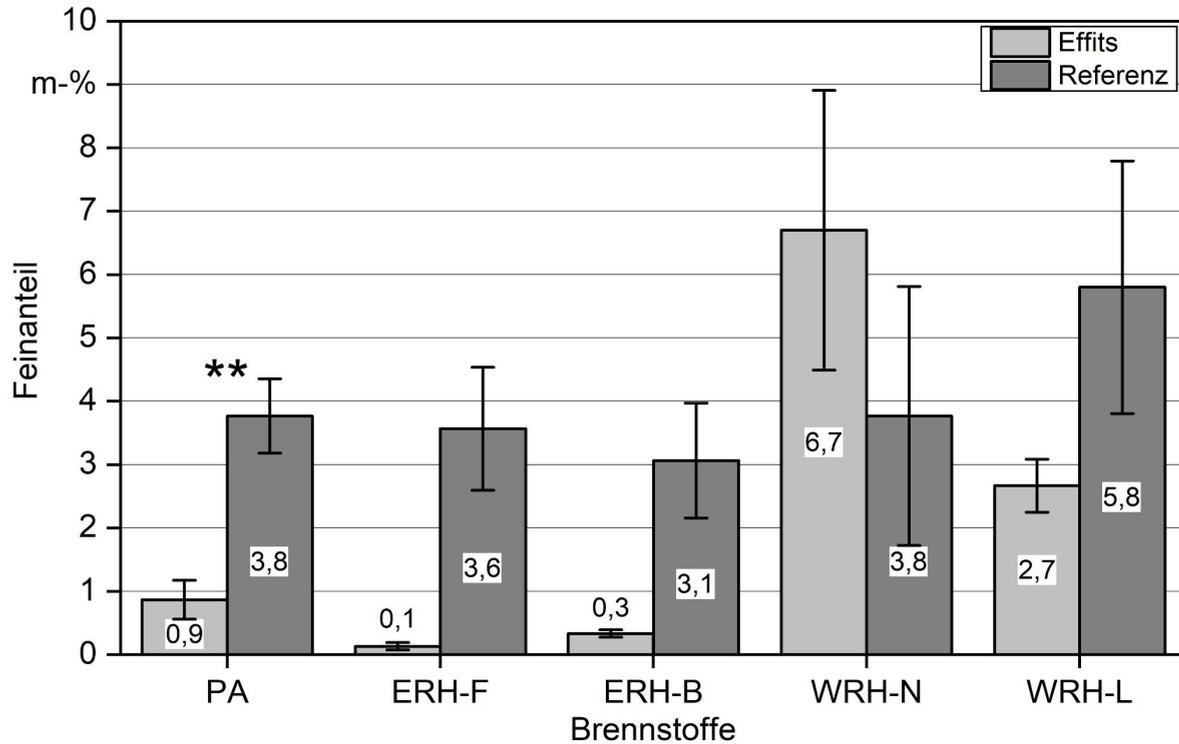


Abbildung 22: Feinanteil (Partikel $\leq 3,15$ mm Durchmesser) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 3$; * zeigt signifikante Unterschiede an; ** $p \leq 0,01$; t-Test und Mann-Whitney-Test)

Interessanterweise zeigten die Effits aus WRH-N als einziges Sortiment einen höheren Feinanteil im Vergleich zu den Referenzbrennstoffen. Betrachtet man die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung desselben Sortiments an anderen Stellen der Versuchsreihen (siehe z. B. Abschnitte 3.2.2 und 3.2.5), so zeigt sich dort stets ein geringerer Feinanteil für die Effits aus WRH-N im Vergleich zum Referenzbrennstoff. Ein Effekt der Probenahme wird vermutet.

Die meist geringen Feinanteile lassen sich vor allem durch das Hackaggregat des Effiters 20.30 erklären. Durch die geringe Drehzahl der Duplex-Schnecke wird das Material in einer langsameren Bewegung vom Stammstück abgeschert bzw. abgeschnitten. Im Vergleich dazu werden in einem Trommelhacker mit einer vielfach höheren Drehzahl die Holzstücke abgehackt. Zudem kommt es in einem Trommelhacker ggf. zu einer intensiveren Nachzerkleinerung zwischen Hackertrommel und Siebkorb.

Ein weiterer Grund für den deutlich geringeren Feinanteile der Effits kann in der Feinteilabtrennung in der „Puls-Craft-Austragung“ liegen (Abbildung 23). Hierbei ist ein Teil der Förderschnecken-Einfassung des Austragssystems mit einem Langlochblech verkleidet. Durch die länglichen Schlitze wird bei der Querförderung vor dem Auswurfmechanismus ein gewisser Anteil der feineren Partikel abgeschieden. Im Rahmen der Versuche wurde keine Massenbestimmung dieser abgeschiedenen Partikelfraktion vorgenommen, somit

kann hierzu keine quantitative Aussage getätigt werden. In den aktuell vertriebenen kleineren Modellreihen des Effiters 20.30 ohne eine separate Austragung ist diese Abscheidung nicht verbaut.



Abbildung 23: Langlöcher im Quersförderer des Effiters 20.30 (links) und durch die Langlöcher abgeschiedener Feinanteil nach der Zerkleinerung von Pappelholz, der rückseitig aus dem Effiter 20.30 abgeschieden wird (rechts)

Abbildung 24 zeigt die Fraktion an groben Partikeln mit einem Durchmesser $\geq 31,5$ mm. In allen Fällen zeigten die Effits signifikant höhere Anteile in dieser Partikelfraktion als die Referenzbrennstoffe. Die höchsten Anteile an groben Partikeln wiesen Effits aus ERH-F auf (54,5 m-%), der geringste Anteil wurde in den Effits aus WRH-L (11,1 m-%) gemessen. Die Referenzbrennstoffe wiesen in allen Fällen < 2 m-% an groben Partikeln auf. Der Grobanteil von Holzhackschnitzeln aus Trommelhackern variiert i. d. R. in Abhängigkeit von den gewählten Einstellungen am Zerkleinerungsaggregat (Schnittweite, Vorschubgeschwindigkeit) oder dem gewählten Siebkorb der Maschine [4] [32] [38] [59] [82].

Der hohe Anteil grober Partikel in den Effits kann erneut durch die Art und Weise der Zerkleinerung begründet werden. Der Brennstoff, der bei den Versuchen am TFZ hergestellt wurde, entspricht laut Hersteller des Effiters 20.30 den in der Praxis üblichen Stückigkeiten. Durch das Abscheren bzw. Abschneiden der Partikel orthogonal zu den Jahrringen des Stamms erzeugt der Schneckenhacker Holzstücke, die teilweise sogar den Durchmesser des jeweiligen Stammstücks aufweisen. Bei der Zerkleinerung von Rohmaterial, das einen größeren Anteil an kleineren Partikeln wie Zweigen, Blättern oder Rindenfragmenten aufweist (z. B. Waldresthölzer), ist dementsprechend auch ein durchschnittlich größerer Anteil an kleineren Partikeln $< 31,5$ mm im Brennstoff gegebenen [3] [56]. Dieser Zusammenhang erklärt die teils deutlich geringeren Grobanteile in den Sortimenten WRH-L und WRH-N.

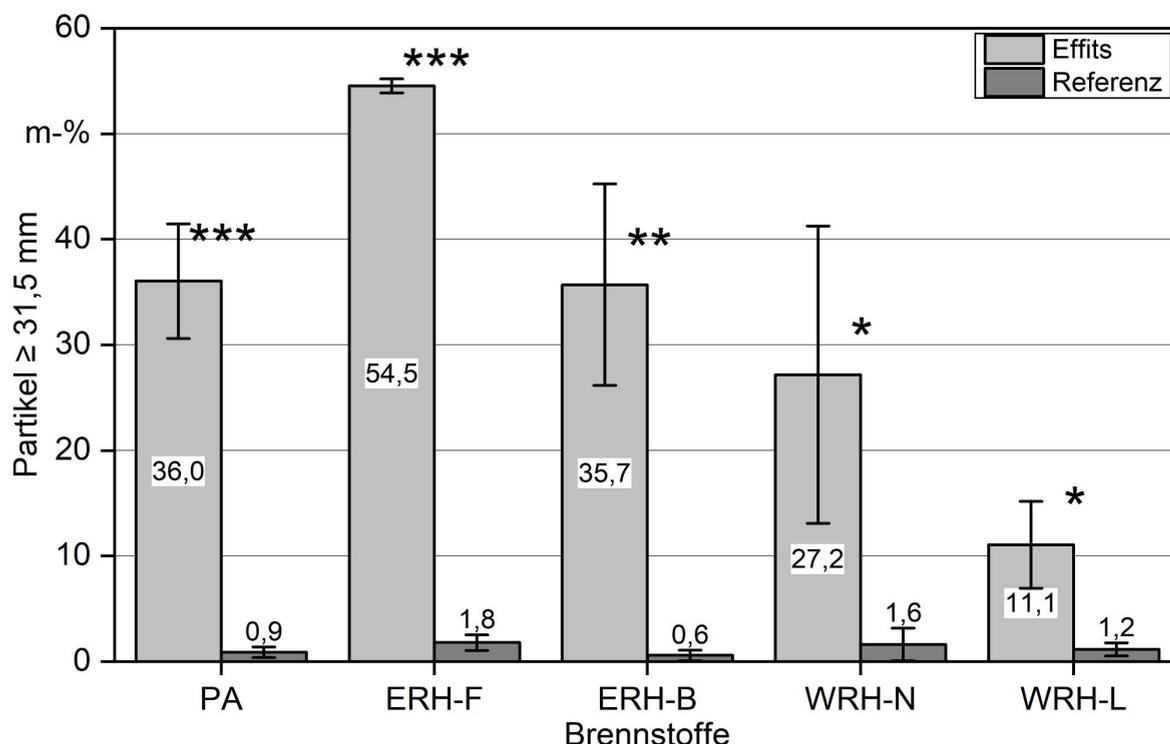


Abbildung 24: Anteil der Partikel mit einem Durchmesser $\geq 31,5$ mm in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 3$; * zeigt signifikante Unterschiede an; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; t-Test und Mann-Whitney-Test)

Bei der Einordnung der erzeugten Brennstoffchargen in die Partikelklassen der DIN EN ISO 17225-4 (Tabelle 7) zeigte sich, dass die Effits weder der Klasse P31s noch der Klasse P16s zuzuordnen waren. ERH-B sowie WRH-N und WRH-L konnten allerdings der Klasse P45s zugeordnet werden. Hingegen war bei allen Chargen des Referenzhackers eine Einordnung in die Partikelklasse P45s oder kleiner möglich. Bei der genauen Betrachtung der zugrunde gelegten Siebanalysedaten zeigte sich, dass allein aufgrund der maximalen Partikellängen in den Brennstoffen keine der Effits-Chargen in die Klasse P31s oder kleiner eingeordnet werden konnte. Hier liegt die maximal zulässige Partikellänge bei 120 mm. Neben der Überschreitung der maximalen Partikellänge war der zweite limitierende Faktor der zu große Anteil an Partikeln $> 31,5$ mm, > 45 mm und > 63 mm.

Die mangelnde Klassifizierbarkeit der Effits legt die Vermutung nahe, dass eine Nutzung dieser grobstückigen Brennstoffe vor allem in häuslichen Kleinf Feuerungsanlagen mit typischerweise gering dimensionierten Brennstoffzuführungen zu Blockaden bei der Brennstoffförderung führen könnte [41] [48]. Bei Versuchen zur Brennstoffförderung (Abschnitt 3.1.8) und im Feuerungsversuch (Abschnitt 3.1.9) erwies sich diese Befürchtung aber als unbegründet.

Tabelle 7: Einordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in die Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225-4:2021

| Brennstoffe | Partikelgrößenklasse nach DIN EN ISO 17225-4:2021 |
|-------------|---|
| PA-E | keine Klassenzuordnung möglich |
| PA-R | P31s |
| ERH-F-E | keine Klassenzuordnung möglich |
| ERH-F-R | P31s |
| ERH-B-E | P45s |
| ERH-B-R | P31s |
| WRH-N-E | P45s |
| WRH-N-R | P45s |
| WRH-L-E | P45s |
| WRH-L-R | P45s |

Bildanalyse. Zusätzlich zu Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung mittels Sieb-analyseverfahren wurde mithilfe eines fotooptischen Bildanalyseverfahrens eine Betrachtung der Partikelform, der längenbezogenen Partikelgrößenverteilung sowie ausgewählter Längenparameter durchgeführt. Hierbei bestätigte sich, dass sich sowohl die durchschnittliche Partikelgröße als auch die Partikelform teils deutlich zwischen Effits und Referenzbrennstoff unterschied. In allen Fällen waren der Medianwert, aber auch die 25%- und 75%-Quantile der Partikellängenverteilung bei den Effits höher als bei den Referenzbrennstoffen (siehe Tabelle 8). Auch die durchschnittliche maximale Partikellänge lag in allen Brennstoffpaaren bei den Effits höher als bei den Referenzbrennstoffen. Die größten Werte wiesen die Effits aus WRH-L auf. Neben den maximalen Längen zeigen sich klare Trends im Partikeldurchmesser, angegeben als minimaler Feret-Durchmesser. Diese Kennzahl war bei den Effits in etwa um den Faktor 2 höher als bei den Referenzbrennstoffen. Beide Werte (maximale Länge, minimaler Feret-Durchmesser) deuten darauf hin, dass die Effits eine deutlich größere Flächenausdehnung der Einzelpartikel aufwiesen als die Referenzbrennstoffe.

Interessanterweise war der Kornformfaktor (*KFF*, Abbildung 25) in allen Fällen, mit Ausnahme von WRH-L, bei den Effits geringer als bei den Referenzbrennstoffen. Der *KFF* beschreibt die „Rundheit“ eines Partikels, also den Quotienten aus Umfang eines Partikels und Umfang eines flächengleichen Kreises [43] [58]. Ein *KFF* mit dem Wert 1 würde somit ein kreisrundes Partikel bezeichnen. Die Ergebnisse bestätigen den optischen Eindruck (Abbildung 5 und Abbildung 6), dass durch die neuartige Zerkleinerungstechnik Brennstoffpartikel entstehen, die orthogonal vom Stamm abgeschert werden und dadurch eine grundsätzlich rundere Form aufweisen als konventionelle Holzhackschnitzel. Das Bildan-

alyseverfahren ermöglicht aufgrund seines Aufbaus nur eine Aussage über die zweidimensionale Ausprägung der betrachteten Partikel und damit der Partikelfläche, nicht jedoch über deren dreidimensionale Form.

Tabelle 8: Längenparameter der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (gemessen mittels Bildanalyseverfahren)

| Brennstoff | 25%-Quantil in mm | Median in mm | 75%-Quantil in mm | Maximale Länge in mm | Minimaler Feret- Durchmesser in mm |
|------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|--|
| PA-E | 30 | 43 | 63 | 52 | 24 |
| PA-R | 22 | 29 | 45 | 41 | 12 |
| ERH-F-E | 30 | 45 | 67 | 53 | 25 |
| ERH-F-R | 17 | 25 | 31 | 31 | 11 |
| ERH-B-E | 34 | 53 | 70 | 58 | 24 |
| ERH-B-R | 19 | 24 | 30 | 26 | 9 |
| WRH-N-E | 24 | 38 | 55 | 46 | 16 |
| WRH-N-R | 21 | 30 | 53 | 44 | 11 |
| WRH-L-E | 34 | 55 | 95 | 76 | 22 |
| WRH-L-R | 27 | 43 | 76 | 58 | 14 |

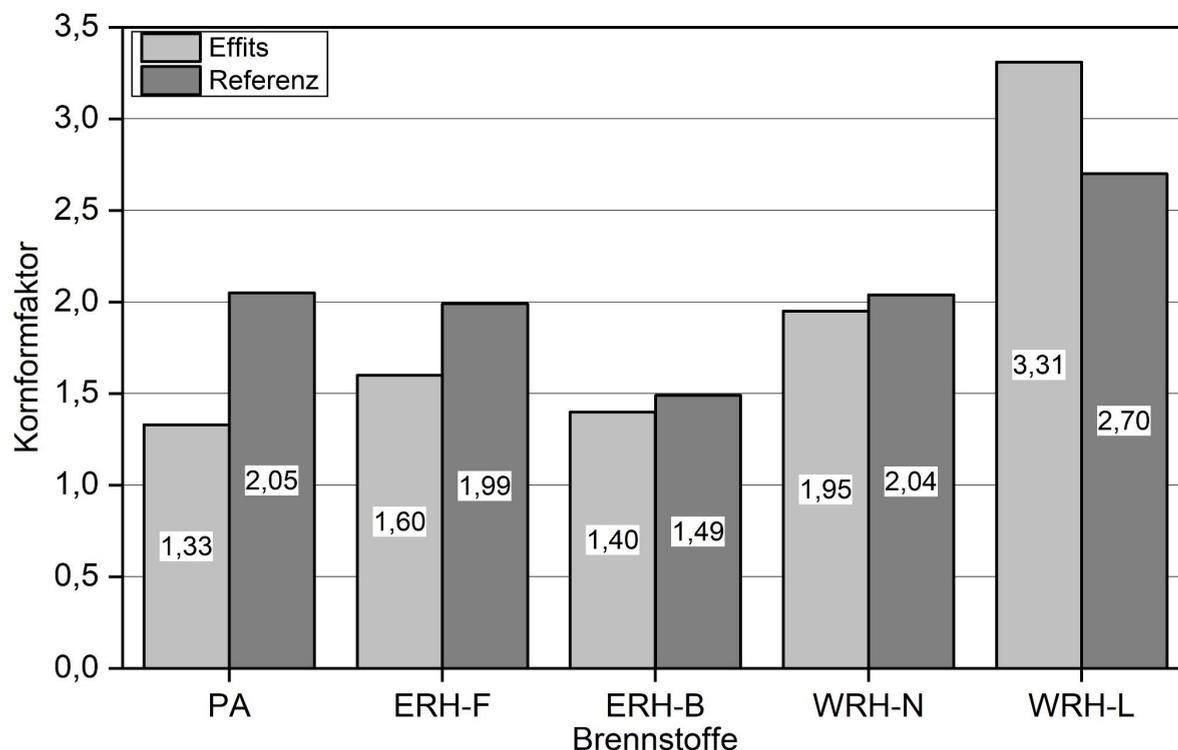


Abbildung 25: Kornformfaktoren der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (berechnet aus den Daten der Bildanalyse, n = 1)

Das Länge-zu-Breite-Verhältnis in den Effits war in allen Fällen kleiner als der Wert in den entsprechenden Referenzbrennstoffen (Abbildung 26). Analog zu den Ergebnissen des Kornformfaktors deutet auch dieser Parameter auf kreisförmigere Partikel im Gegensatz zu den eher länglichen Partikeln der Referenzbrennstoffe hin.

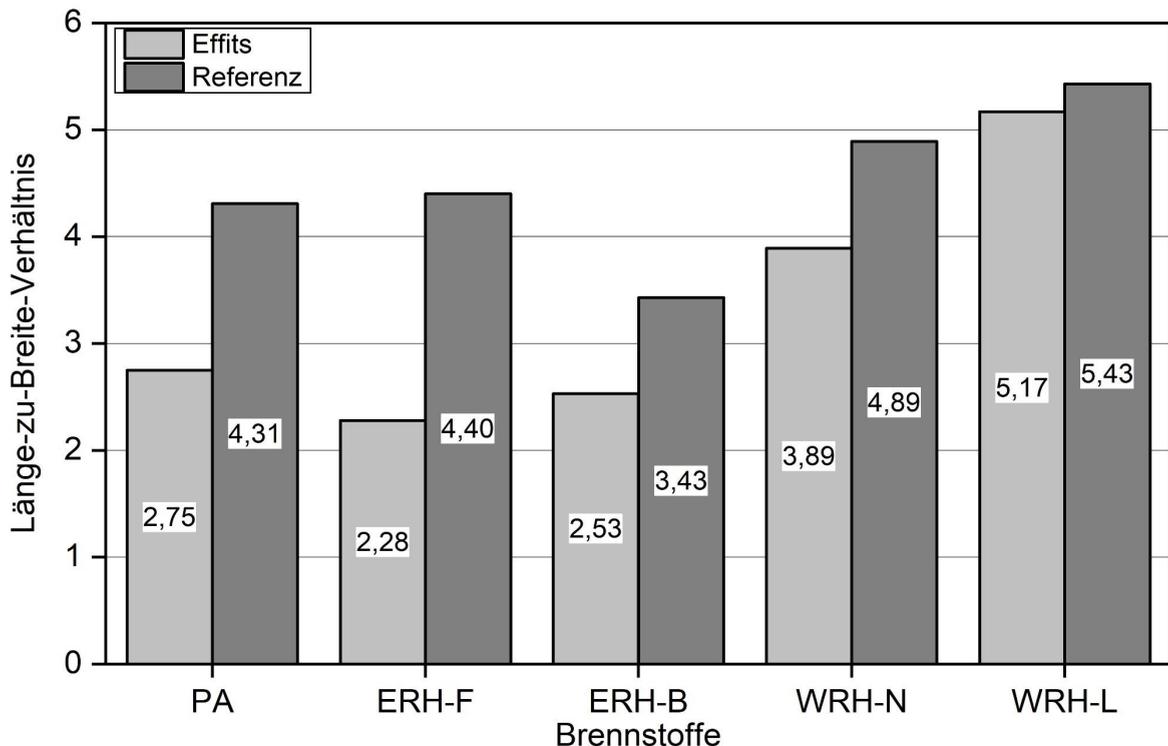


Abbildung 26: Länge-zu-Breite-Verhältnis der Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung (berechnet aus den Daten der Bildanalyse, $n = 1$)

Die Ergebnisse der Bildanalyse bestätigen, dass die Effits hinsichtlich ihrer Partikelform und ihrer Partikelgröße einen neuartigen Brennstoff darstellen. Sie sind durchschnittlich größer und tellerförmiger als die zugehörigen Referenzbrennstoffe aus demselben Rohmaterial.

Aschegehalt. Der (wasserfreie) Aschegehalt der Brennstoffe lag zwischen 0,68 m-% (ERH-B-E) und 1,95 m-% (WRH-L-R) (Abbildung 27). Die Werte der vier Brennstoffe aus Energierundholz (Fichte und Buche) lagen in einem typischen Bereich (< 1 m-%) [27] [48]. Vor allem die Brennstoffe aus WRH-N wiesen dagegen deutlich geringere Werte auf, als sie typischerweise für Waldrestholz angenommen werden [56]. Die Brennstoffe aus KUP-Pappel lagen wiederum im erwartbaren Bereich für Holz aus dem Kurzumtrieb [63] [71] [72] [87].

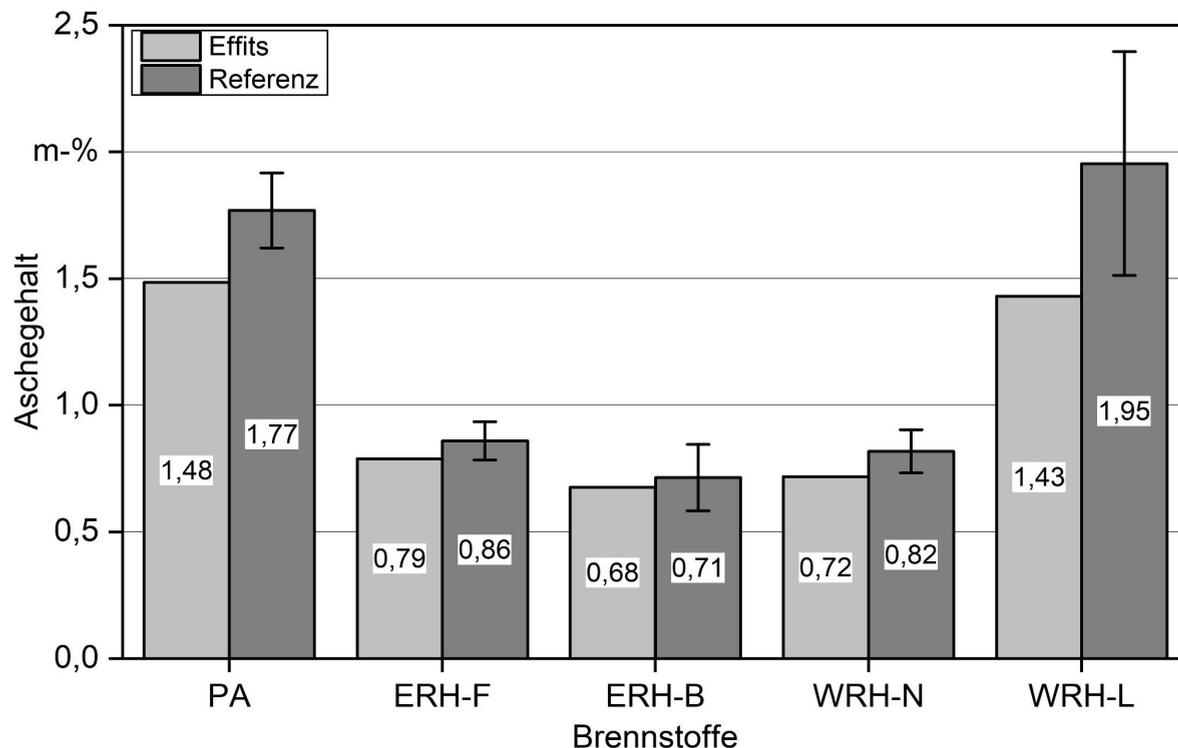


Abbildung 27: Aschegehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (wasserfreier Zustand; Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 5$). Der Aschegehalt der Effits wurde anhand einer Mischprobe aus fünf Einzelproben bestimmt, somit fehlt hier die Standardabweichung.

Auffällig ist, dass in allen Fällen die Effits einen geringeren Aschegehalt als die Referenzbrennstoffe aufwiesen. Da bei den Effits jedoch eine Mischprobe aus mehreren Einzelproben bestimmt wurde, ist es in diesem Fall nicht möglich, eine statistische Auswertung durchzuführen. Somit kann bei den betrachteten Unterschieden lediglich von einem Trend gesprochen werden. Mögliche Ursache für die Unterschiede im Aschegehalt sind nicht gänzlich geklärt, sind aber vermutlich verfahrenstechnischer Art. Durch das Langlochblech, das als Feinteilabscheider im Querförderer des Effiters 20.30 verbaut ist, werden sehr feine Partikel des zerkleinerten Brennstoffs während der Förderung abgeschieden (Abbildung 23). Dieser Anteil könnte einen sehr hohen Aschegehalt, beispielsweise durch mineralische Verschmutzung oder einen hohen Anteil an Rinde und Blättern beinhalten [48]. Folglich dürfte die Abtrennung von solchem Feinmaterial zu geringeren Aschegehalten führen. Dass eine gezielte Absiebung des Feinanteils zu einer Verringerung des Aschegehalts bei Holzhackschnitzeln führen kann, wurde bereits in verschiedenen Studien nachgewiesen [5] [61] [66] [73]. In der hier dargestellten Untersuchung wurde allerdings weder der Aschegehalt des abgesiebten Feinanteils untersucht, noch erfolgte eine Massebilanz.

Elementgehalte. Hinsichtlich ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung zeigten sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den Effits und den Referenzbrennstoffen (Tabelle 9, Tabelle 10).

Tabelle 9: Chemische Inhaltsstoffe (Nebenelemente) in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 nach der Zerkleinerung in m-% (N, Cl, S) und in mg/kg (Ca, K, Mg, Mn, Na) auf wasserfreier Bezugsbasis

| Brennstoffe | N | Cl | S | Ca | K | Mg | Mn | Na |
|-------------|------|------|------|-------|-------|-----|-----|-----|
| PA-E | 0,30 | 0,08 | 0,01 | 3.140 | 2.104 | 329 | 9 | 65 |
| PA-R | 0,41 | 0,07 | 0,02 | 3.623 | 2.377 | 358 | 13 | 57 |
| ERH-F-E | 0,14 | 0,09 | 0,01 | 1.880 | 978 | 152 | 106 | 54 |
| ERH-F-R | 0,17 | 0,07 | 0,01 | 1.975 | 988 | 158 | 93 | 54 |
| ERH-B-E | 0,18 | 0,10 | 0,01 | 1.571 | 1.300 | 389 | 144 | 50 |
| ERH-B-R | 0,16 | 0,07 | 0,01 | 1.432 | 1.239 | 273 | 133 | 88 |
| WRH-N-E | 0,31 | 0,11 | 0,01 | 1.111 | 1.292 | 412 | 275 | 55 |
| WRH-N-R | 0,29 | 0,10 | 0,01 | 1.251 | 1.199 | 425 | 345 | 92 |
| WRH-L-E | 0,50 | 0,08 | 0,01 | 2.770 | 2.309 | 376 | 454 | 58 |
| WRH-L-R | 0,41 | 0,19 | 0,03 | 3.801 | 2.444 | 400 | 446 | 101 |

Tabelle 10: Chemische Inhaltsstoffe (Schwermetalle) in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 nach der Zerkleinerung in mg/kg auf wasserfreier Bezugsbasis

| Brennstoffe | Al | As | Cd | Cr | Cu | Fe | Ni | Pb | Zn |
|-------------|------|--------|--------|-----|-----|------|--------|--------|----|
| PA-E | 41,0 | < 0,02 | 0,1 | 0,5 | 1,9 | 31,5 | < 0,02 | < 0,02 | 25 |
| PA-R | 16,1 | < 0,02 | 0,3 | 0,4 | 1,0 | 25,9 | 0,1 | < 0,02 | 28 |
| ERH-F-E | 4,8 | < 0,02 | < 0,02 | 0,1 | 0,7 | 6,1 | < 0,02 | < 0,02 | 18 |
| ERH-F-R | 2,1 | 0,03 | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 10,0 | 0,4 | 0,02 | 18 |
| ERH-B-E | 4,9 | < 0,02 | < 0,02 | 0,1 | 0,4 | 4,2 | < 0,02 | < 0,02 | 5 |
| ERH-B-R | 2,7 | 0,01 | < 0,02 | 0,3 | 0,7 | 6,0 | 0,9 | < 0,02 | 2 |
| WRH-N-E | 62,5 | < 0,02 | < 0,02 | 0,5 | 1,8 | 36,9 | < 0,02 | < 0,02 | 33 |
| WRH-N-R | 64,1 | < 0,02 | < 0,02 | 0,6 | 1,5 | 91,4 | 0,5 | < 0,02 | 32 |
| WRH-L-E | 25,0 | < 0,02 | 0,1 | 0,4 | 1,7 | 24,8 | < 0,02 | < 0,02 | 49 |
| WRH-L-R | 39,9 | 0,1 | < 0,02 | 0,5 | 1,8 | 27,1 | 0,6 | < 0,02 | 44 |

Die Unterschiede lagen vor allem zwischen den jeweiligen Rohmaterialien. Brennstoffe aus Energierundholz wiesen meist niedrigere Elementgehalte als Waldrestholz oder Pappel aus dem Kurzumtrieb auf. Dies war zu erwarten, da sich die inhaltsstoffliche Zusammensetzung von Holzbrennstoffen vor allem zwischen Baumarten und Sortimenten (Waldrestholz, Energierundholz oder Vollbäume) [9] [27] [85] und aufgrund möglicher Verschmutzung der jeweiligen Rohmaterialien, beispielsweise mit Mineralboden während der vorgelagerten Prozessschritte [30] [48], unterscheidet. Bei den hier betrachteten Brennstoffen lagen die Stickstoff- oder Schwefelgehalte jeweils in einem Bereich, den die DIN EN ISO 17225-1 für diese Sortimente vorhersagt. Auch die Elemente Al, Ca, Fe, K

Mg oder Na zeigten keine Auffälligkeiten. Lediglich die Chlorgehalte lagen in allen Fällen etwas oberhalb des in der Norm angegebenen typischen Bereichs. Der Gehalt an Schwermetallen lag häufig unter der Nachweisgrenze und meist unter den Werten, die die DIN EN ISO 17225-1 als typisch für Holzbrennstoffe angibt [27]. Es ist somit von naturbelassenem Holz ohne größere Verunreinigungen auszugehen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Aufteilung der jeweiligen Chargen am Betriebshof des TFZ auf die beiden Hackmaschinen nur zu wenig Varianz geführt hat und die Verteilung somit weitgehend als repräsentativ anzusehen ist.

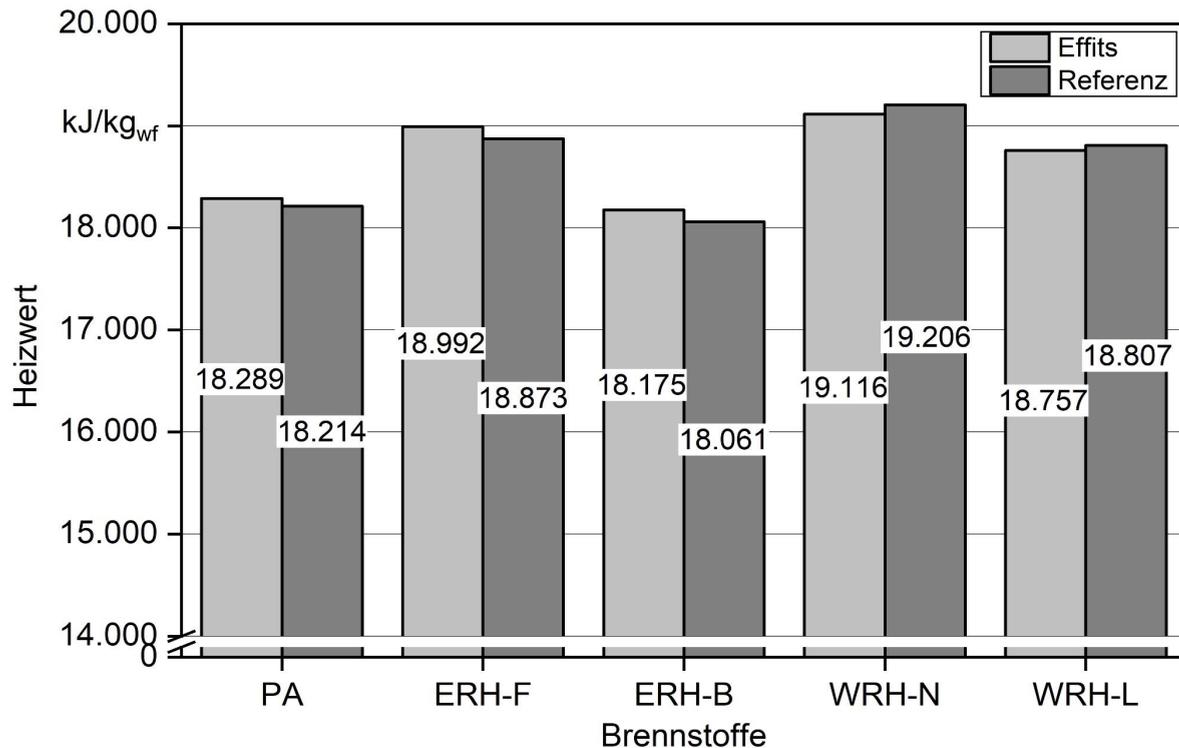


Abbildung 28: Heizwerte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 direkt nach der Zerkleinerung (auf wasserfreier Bezugsbasis, Doppelbestimmung einer Mischprobe aus fünf Einzelproben)

Heizwert. Analog den Elementgehalten zeigen die Heizwerte der Brennstoffe keine klaren Unterschiede oder Trends zwischen den beiden Zerkleinerungsmethoden (Abbildung 28). Eine statistische Auswertung war auch hier nicht möglich, da die Heizwerte jeweils aus einer Mischprobe aus fünf Einzelproben bestimmt wurden. Die Messwerte lagen in den meisten Fällen in Bereichen, die die DIN EN ISO 17225-1 für die Rohmaterialien angibt [27]. Erwartungsgemäß hatten die Brennstoffe aus Waldrestholz jeweils höhere Heizwerte als die entsprechenden Brennstoffe aus Energierundholz. Dies lässt sich auf einen höheren Anteil an extraktstoffreichen Bestandteilen (v. a. in Nadeln, Laub und Rinde) in den Waldrestholzsortimenten zurückführen [48]. Erneut deutet sich an, dass die Teilung der Chargen repräsentativ erfolgte.

3.2.2 Lagerungsversuche

3.2.2.1 Behälterlagerung

Alle zehn Brennstoffe (Effits und Referenz) wurden direkt im Anschluss an die Zerkleinerung für 23 Wochen in Lagerbehältern mit einem Füllvolumen von 600 l gelagert (vgl. Abschnitt 3.1.5). Ziel der Versuche war es, Trockenmasseverluste und Qualitätsveränderungen während der Lagerdauer zu ermitteln und zwischen den Varianten zu vergleichen. Hinsichtlich der Größe ähneln die am TFZ verwendeten Lagerbehälter den vom Hersteller des Effiters 20.30 vertriebenen „Trocknungs-Big-Bags“ (Abbildung 29). Hierbei handelt es sich um luftdurchlässige Kunststoffbeutel, mithilfe derer unter Ausnutzung der grobporigen Partikelstruktur der Effits eine sehr schnelle natürliche Trocknung in kurzer Zeit erreicht werden soll. Die Big Bags weisen ein Füllvolumen von etwa 500 l sowie perforierte Seiten- und Bodenelemente auf. Bei regengeschützter Lagerung soll laut Hersteller nach wenigen Monaten eine gute Trocknung erreicht werden, die eine emissionsarme Nutzung der Brennstoffe in Kleinf Feuerungsanlagen zulassen soll. Eine hohe Übertragbarkeit der hier dargestellten Ergebnisse (Lagerbehälter) auf Praxisbedingungen (Trocknungs-Big-Bags) ist somit zu erwarten.



Abbildung 29: Vom Hersteller des Effiters 20.30 angebotene, luftdurchlässige Trocknungs-Big-Bags zur Lagerung und natürlichen Trocknung der Effits

Temperaturverlauf. Die durchschnittlichen, aber auch die maximalen Temperaturen (Tagesmittelwerte), die in den Lagerbehältern auftraten, waren für die Effits stets geringer als bei den Referenzbrennstoffen (Abbildung 30).

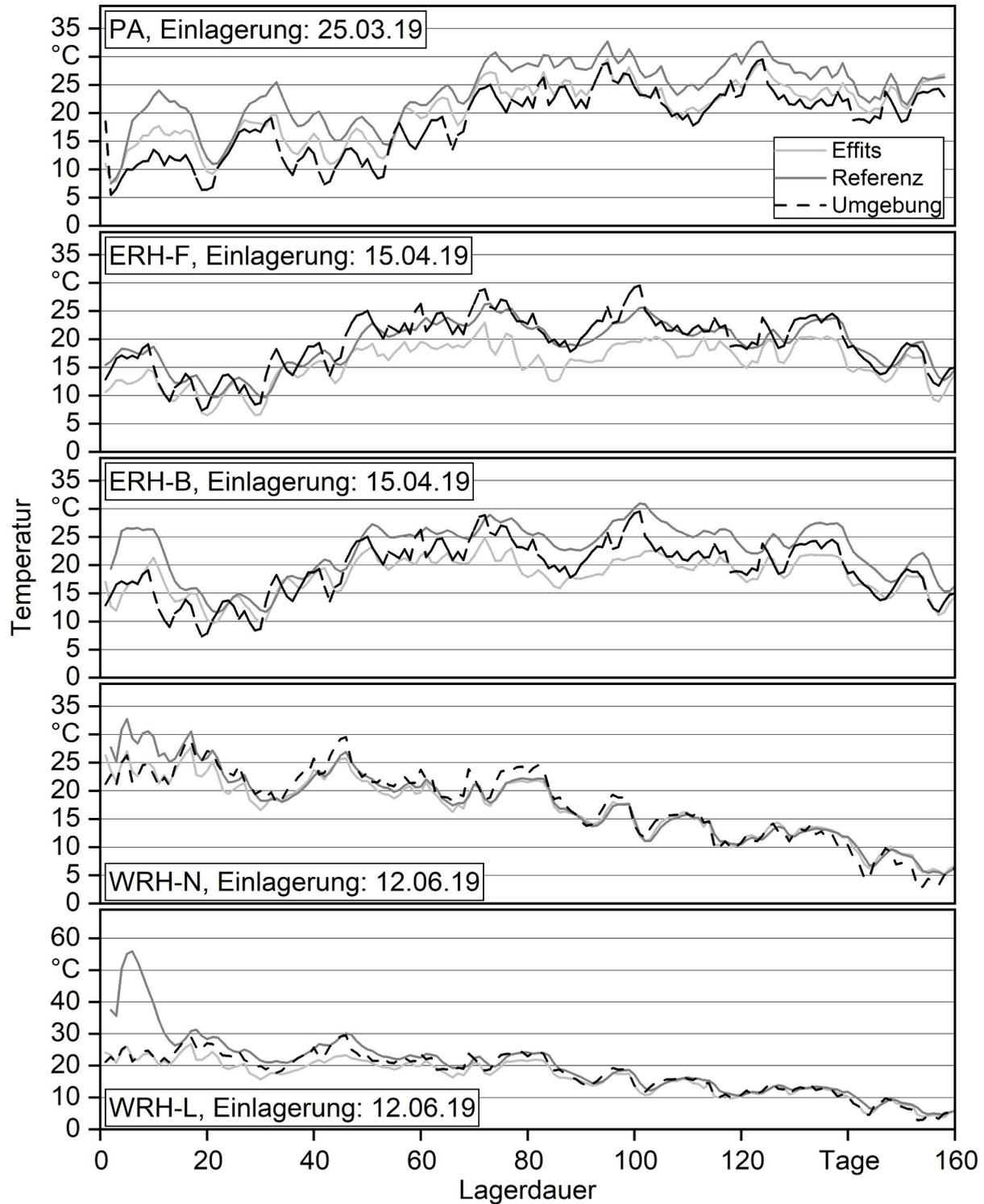


Abbildung 30: Tagesmittelwerte der Temperaturen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 und Umgebungslufttemperatur bei der Lagerung in Behältern über den gesamten Lagerzeitraum von 23 Wochen

Temperaturveränderungen von Schüttgütern während der Lagerung, vor allem im Vergleich zur Außenluft oder zwischen unterschiedlichen Brennstoffchargen, sind meist gute Indikatoren für die mikrobielle Aktivität in Holzhackschnitzeln sowie für den zu erwartenden

Trockenmasseabbau [1] [2] [45] [46] [47] [48] [63] [68] [71] [72]. Vor allem sehr hohe und rasche Temperaturanstiege deuten auf eine gesteigerte Zersetzung der Biomasse hin [37] [68]. Die Trockenmasse wird dabei von Bakterien und Pilzen verstoffwechselt und geht für die energetische Nutzung verloren. Gleichzeitig kann sich die Temperaturerhöhung positiv auf die natürliche Trocknung der Brennstoffe auswirken.

Gemittelt über die gesamte Lagerdauer lagen die Temperaturen bei den Referenzbrennstoffen im Vergleich zu den Effits um 1,3 K (WRH-N) bis 4,6 K (ERH-B) höher. Die höchste Durchschnittstemperatur wurde für PA-R mit 23,8 °C ermittelt. Die Temperatur der zugehörigen Effits betrug 20,4 °C (PA-E). Der insgesamt höchste Tagesmittelwert für Referenzbrennstoffe lag bei 56,7 °C (WRH-L). Der dazugehörige Effits-Brennstoff erreichte dagegen nur eine maximale Temperatur von 29,3 °C. Temperaturen über 20 °C deuten auf gute Wachstumsbedingungen für holzzersetzende Bakterien und Pilze hin [46]. Der optimale Temperaturbereich für mikrobielles Wachstum liegt zwischen 20 und 50 °C [48].

Mit Ausnahme von ERH-F wurde der größte Temperaturanstieg in den Behältern innerhalb der ersten 20 Tage beobachtet. Dies deckt sich mit Beobachtungen aus der Praxis, wobei vor allem für Brennstoffe aus Waldrestholz und KUP oft ein rascher Temperaturanstieg zu Beginn der Lagerung gemessen wird [45]. Nach den ersten 20 Tagen zeigte sich dagegen häufig eine große Abhängigkeit der Behältertemperaturen von der Temperatur der Umgebungsluft. Vor allem für WRH-N und WRH-L waren diese Werte ab Tag 20 nahezu identisch. Daraus lässt sich schließen, dass nach ca. 20 Tagen die biologische Aktivität in den WRH-Behältern bereits abnahm. Bei ERH-F und ERH-B lagen die Temperaturen in den Referenzbrennstoffen nahezu immer über der Umgebungstemperatur, während die Temperaturen in den Effits meist darunterlagen. Bei Pappelholz (PA) wiederum lagen die Temperaturen sowohl im Referenzbrennstoff als auch in den Effits etwas über den Umgebungswerten.

Die insgesamt geringeren Temperaturen der Effits im Vergleich zur jeweiligen Referenz können verschiedene Gründe haben. Zum einen ist aufgrund der grobkörnigen Partikelstruktur der neuartigen Brennstoffe von einer besseren natürlichen Durchlüftung der Schüttungen auszugehen [58] [60] [70] (vgl. auch Abschnitte 3.2.3 und 3.2.4). Dadurch werden die Wärme und die mit Wasserdampf gesättigte Luft leichter abgeführt. Weiterhin ist davon auszugehen, dass der niedrigere Feinanteil der Effits den mikrobiellen Abbau hemmt. Hohe Anteile an kleinen Partikeln begünstigen das Wachstum von Bakterien und Pilzen aufgrund ihrer großen Oberfläche im Verhältnis zum Partikelvolumen [48]. Besteht der Feinanteil zudem aus Nadeln, Blättern oder Rinde, bietet er ein höheres Nährstoffangebot für mikrobielles Wachstum [45]. Im Fall des hier dargestellten Versuchs könnte ein relevanter Anteil des Feinanteils zudem durch die Lochbleche in der Austragung des Effiters 20.30 entfernt worden sein und damit das Nährstoffangebot in den Brennstoffen ändern, während dies für die Referenzbrennstoffe nicht der Fall ist (vgl. Abschnitt 3.2.1.2).

Die Temperaturen in den Lagerbehältern waren i. d. R. niedriger als in realen Lagerhaufwerken mit ähnlicher Brennstoffqualität im Freiland [45] [60]. Sie decken sich jedoch mit Werten aus früheren Untersuchungen des TFZ, bei denen dieselben Behälter Anwendung fanden [45].

Massenveränderung. In Abbildung 31 sind die Verläufe der Behältergewichte der Brennstoffe aus Pappel und WRH-L beispielhaft für alle Behälter über die gesamte Lagerdauer abgebildet. Die Brennstoffmasse beinhaltet sowohl die Trockenmasse als auch den zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Wassergehalt. Die Wiegungen wurden alle 21 Tage durchgeführt.

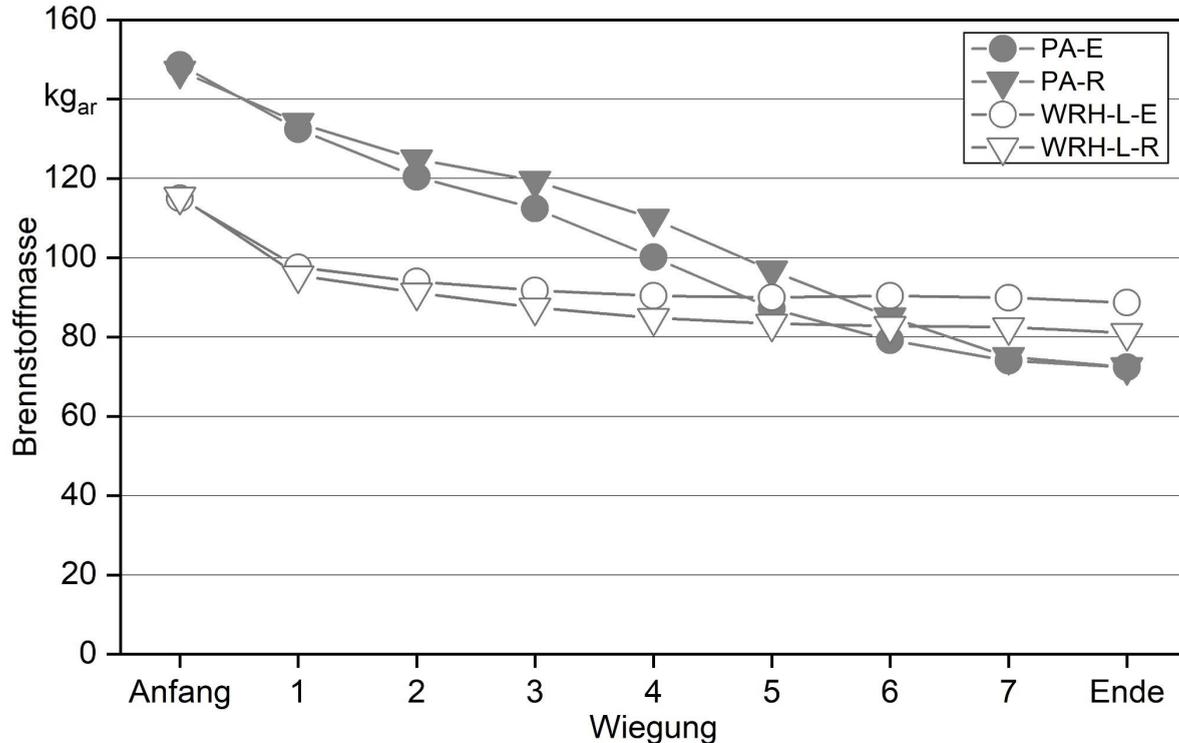


Abbildung 31: Beispiel für den Verlauf der Behältergewichte anhand der Sortimente PA und WRH-L über die wiederkehrenden Wiegeungen der Behälter im Abstand von 21 Tagen (angegeben ist jeweils die absolute Masse des feuchten Brennstoffs)

Die beiden Chargen aus Pappel zeigten von Beginn der Lagerung bis zu deren Ende eine kontinuierliche Abnahme der Brennstoffmassen. Lediglich zwischen der siebten Wiegeung und der Auslagerung fand keine bzw. nur noch eine sehr geringe Gewichtsreduktion statt. Bei den beiden Brennstoffen aus WRH-L fand die größte Gewichtsabnahme zu Beginn der Lagerung, also in den ersten drei Lagerungswochen, statt. Die Gewichtsverläufe decken sich gut mit den Temperaturverläufen in den Behältern. Hohe Temperaturen gehen dabei i. d. R. mit einer starken Gewichtsabnahme einher. Dies resultiert einerseits aus dem Trockenmasseverlust durch den Abbau der Biomasse, vor allem aber auch aus der natürlichen Trocknung der Brennstoffe aufgrund der Erwärmung des Schüttguts.

Wassergehalt. Abbildung 32 zeigt die Wassergehalte der Brennstoffe bei Ein- und Auslagerung. In allen Fällen wiesen die gelagerten Brennstoffe deutlich niedrigere Wassergehalte auf als bei Einlagerung, die Unterschiede waren in allen Fällen signifikant ($p \leq 0,001$). Betrachtet man die Differenzen im Wassergehalt zwischen Einlagerung und Auslagerung,

so zeigt sich, dass in vier von fünf Fällen die Effits eine deutlich höhere Wassergehaltsabnahme als die dazugehörigen Referenzbrennstoffe aufwiesen. Lediglich bei WRH-L war die absolute Änderung im Wassergehalt bei den Referenzbrennstoffen um einen Prozentpunkt höher als bei den Effits.

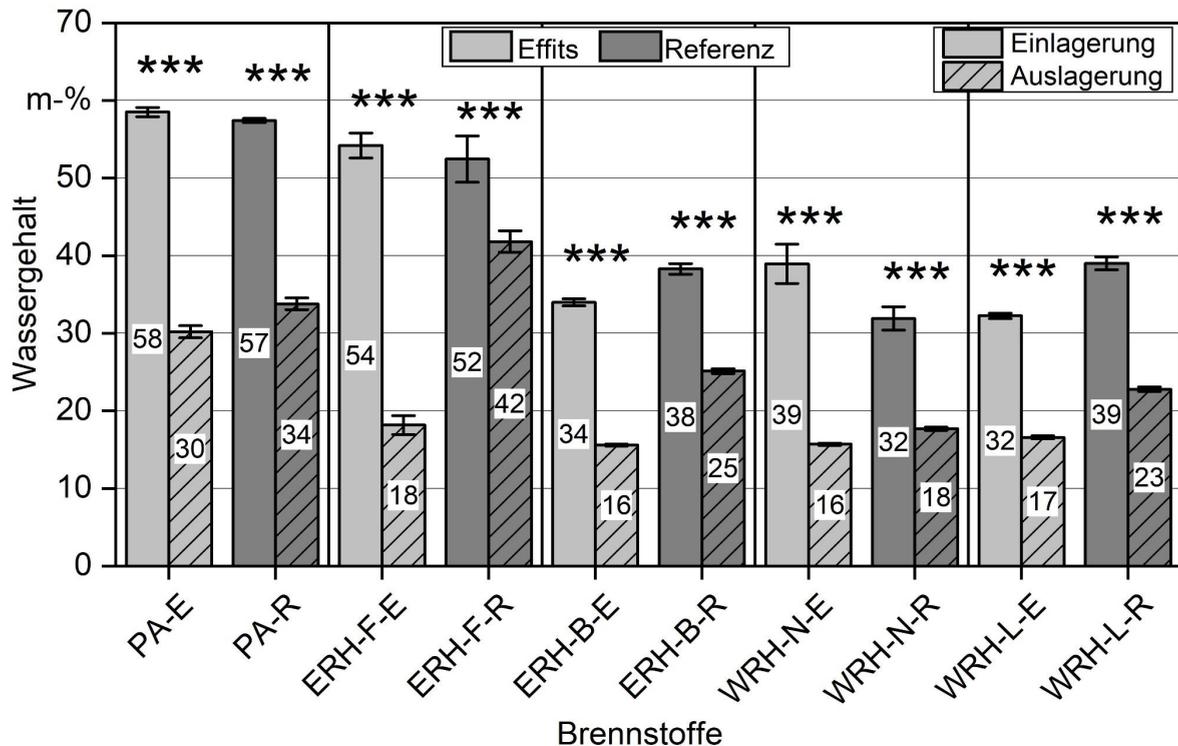


Abbildung 32: Wassergehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 5$; * zeigt signifikante Unterschiede an; *** $p \leq 0,001$, t-Test und Mann-Whitney-Test)

Die bessere Reduktion des Wassergehalts in den Effits ist vermutlich ebenfalls auf ihre neuartige Partikelstruktur zurückzuführen. Aufgrund der groben Partikel, des geringen Feinanteils und der vorgebrochenen Struktur sollte die Belüftbarkeit der Effits verbessert sein [58] [70] (siehe auch Abschnitt 3.2.4). Dies dürfte einen verbesserten Luftaustausch mit der Umgebungsluft und somit eine bessere Trocknung bewirken.

Alle Effits-Sortimente (mit Ausnahme der Pappel) wiesen nach der Lagerung einen Wassergehalt < 20 m-% auf. Dies war lediglich bei den Referenzbrennstoffen aus WRH-N der Fall. Bei Wassergehalten ≤ 20 m-% geht man von einem lagerstabilen Zustand aus, bei dem keine nennenswerten Trockenmasseverluste mehr zu erwarten sind [44] [48]. Zudem wird ein Wassergehalt von 20 m-% von vielen Kesselherstellern als der Wert angegeben, bei dem kleine Kessel < 100 kW besonders emissionsarm betrieben werden können. Eine mehrwöchige Lagerung in den vom Hersteller vertriebenen Trocknungs-Big-Bags sollte für die Effits-Brennstoffe ähnlich niedrige Wassergehalte bewirken, um für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet zu sein. Im Vergleich zu den hier verwendeten

Lagerbehältern sollten die perforierten Wände der Big Bags sogar eine noch schnellere Trocknung ermöglichen als in den Versuchsbehältern.

Schüttdichte. Die Schüttdichten der Brennstoffe (auf wasserfreier Bezugsbasis) unterschieden sich nach der Lagerung zum Teil signifikant vom Ausgangsmaterial (Abbildung 33). Während die Schüttdichte der Referenzbrennstoffe in fast allen Fällen abnahm, konnte bei den Effits häufig eine Zunahme beobachtet werden. Vor allem die Effits erreichten häufig Wassergehalte unterhalb des Fasersättigungspunkts, wodurch es vermutlich zu einer Schrumpfung der Partikel und damit zu einer Erhöhung des Trockenmassevolumens pro m^3 gekommen ist.

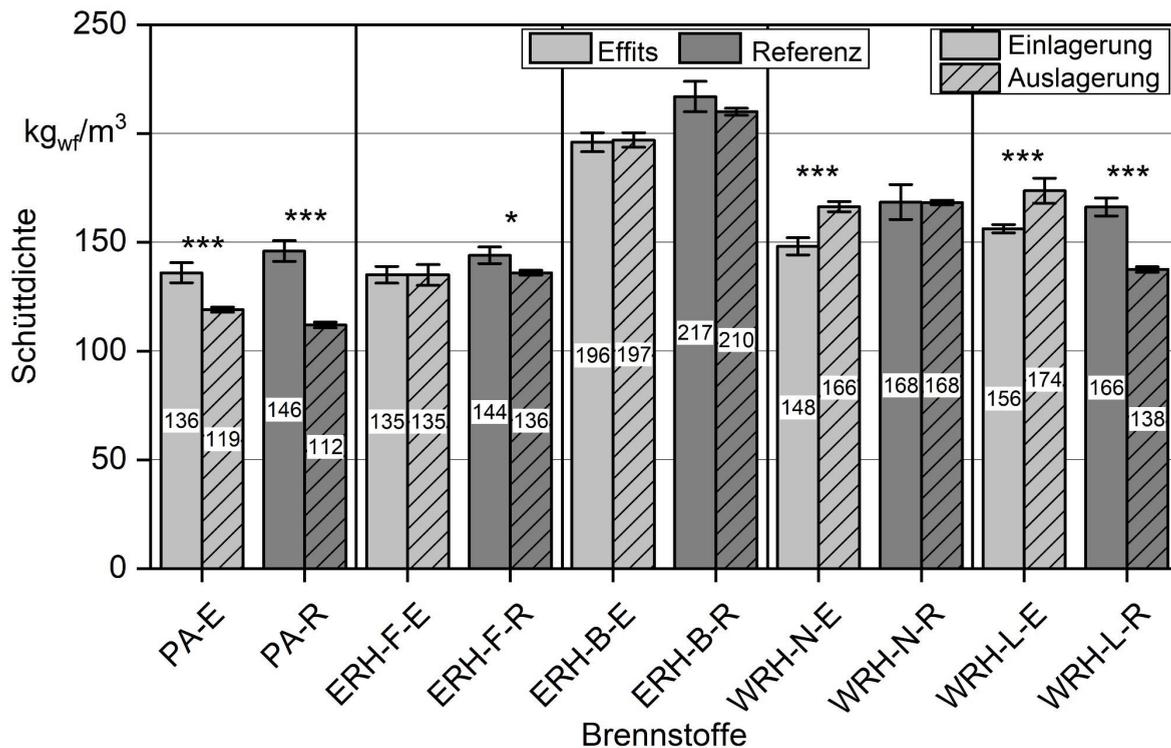


Abbildung 33: Schüttdichten der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 5$; wasserfreie Bezugsbasis; * zeigt signifikante Unterschiede an; * $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,001$)

Trockenmasseverluste. In allen betrachteten Fällen lagen die Trockenmasseverluste der Effits unter denen der Referenzbrennstoffe (siehe Abbildung 34). Eine statistische Betrachtung kann aufgrund der geringen Datenbasis mit $n = 1$ nicht durchgeführt werden. Die Verluste der Referenzbrennstoffe lagen in Bereichen, die in früheren Studien des TFZ für ähnliche Sortimente festgestellt wurden. So ermittelte das TFZ für die Lagerung frischer KUP-Hackschnitzel in Behältern einen Trockenmasseverlust von 21,7 m-% (Lagerdauer: 23 Wochen [45]). Energierundholz aus Fichte und Buche erreichten in derselben Versuchsreihe Werte von 8,7 m-% (Fichte) und 7,0 m-% (Buche). Bei der Lagerung von WRH-L bzw. WRH-N konnten 11,6 m-% (WLR-N) und 4,2 m-% (WRH-L) festgestellt werden.

Die vorliegenden und die genannten früheren Ergebnisse des TFZ zeigten bei den Pappelbrennstoffen die höchsten Trockenmasseverluste. Vor allem in dem Sortiment KUP-Pappel könnte der i. d. R. deutlich höhere Wassergehalt der Brennstoffe bei Einlagerung eine Ursache für die sehr hohen Abbauraten im Vergleich zu den anderen Sortimenten sein [55] [63] [71]. Auch nach der Lagerung lag der Wassergehalt der Pappelbrennstoffe mit ≥ 30 m-% noch in einem Bereich, in dem mikrobielle Aktivität zu erwarten wäre [44] [48]. Für alle anderen Brennstoffe sollte der Abbau aufgrund der Trocknung stark reduziert sein. Eine weitere Ursache für hohe Trockenmasseverluste könnte in einem erhöhten Nährstoffangebot für Mikroorganismen, vor allem in den Sortimenten aus Waldrestholz oder bei Brennstoffen aus dem Kurzumtrieb aufgrund hoher Nadel- und Blattanteile liegen.

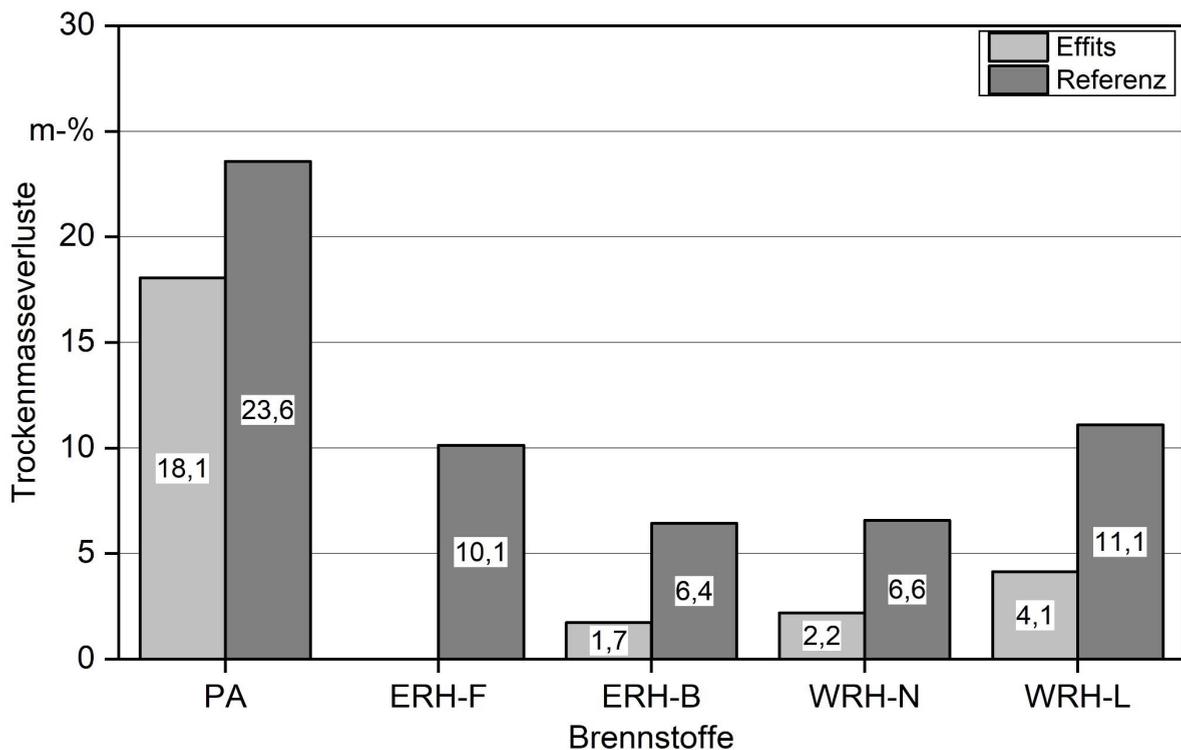


Abbildung 34: Trockenmasseverluste der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach der Lagerung in Behältern (Lagerdauer ca. 160 Tage, $n = 1$, berechneter negativer Trockenmasseverlust bei ERH-F-E fand keinen Eingang in die Grafik)

Die Trockenmasseverluste der Effits betragen teilweise nur Bruchteile im Vergleich zu den Werten der Referenzbrennstoffe. So lag der Wert von ERH-B-R (6,4 m-%) mehr als dreimal so hoch wie bei ERH-B-E (1,7 m-%). Einen ähnlich großen Unterschied zeigte WRH-N. Der in Abbildung 34 fehlende Balken von ERH-F-E geht dagegen auf einen rechnerisch negativen Trockenmasseverlust zurück (-4,3 m-%), der in der Abbildung nicht dargestellt ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Wassergehalt von ERH-F-E zum Ende der Lagerung nicht repräsentativ bestimmt wurde. Bereits geringe Abweichungen bei der Wassergehaltmessung führen zu großen Unsicherheiten bei der Berechnung der Trocken-

masseverluste [45]. Dies kann auch für die anderen Sortimente nicht vollständig ausgeschlossen werden. Durch die hohe Anzahl an Messwiederholungen bei der Wassergehaltsbestimmung ($n = 5$) im Vergleich zum geringen Behälterinnenvolumen von ca. 0,6 SRM wird die Wahrscheinlichkeit für einen Messfehler jedoch als gering bewertet.

Gründe für die durchweg geringeren Trockenmasseverluste der Effits können, wie bereits im Zusammenhang mit Behältertemperaturen oder Wassergehaltsänderungen diskutiert, der niedrige Feinanteil des Brennstoffs und die grobkörnige Partikelstruktur sein. Behälterversuche des TFZ aus einem vorherigen Projekt hatten gezeigt, dass Brennstoffe, in denen der Feinanteil durch Siebung mechanisch reduziert worden war, geringere Trockenmasseverluste aufweisen als ihre ungesiebten Kontrollvarianten [45]. Ursache war wiederum das bessere Verhältnis der Partikeloberfläche zu deren Volumen sowie das reduzierte Nährstoffangebot (v. a. bei Brennstoffen aus KUP oder WRH). Gleichzeitig führen geringere Mengen an Feinanteil zu einer schnelleren natürlichen Trocknung auf einen Wassergehalt, bei dem keine oder nur noch geringe Trockenmasseverluste zu erwarten sind [45]. In einem Freilandversuch des TFZ hatte die Siebung dagegen keinen wesentlichen Effekt auf die Trockenmasseverluste bei der Lagerung [60]. In den hier dargestellten Versuchen konnte keine eindeutige Korrelation zwischen dem Feinanteil und den Trockenmasseverlusten gefunden werden ($R^2 = 0,015$). Dies lag vermutlich an den sehr unterschiedlichen Sortimenten sowie den unterschiedlichen Einlagerungswassergehalten.

Aschegehalt. Die Aschegehalte der Brennstoffe waren nach der Lagerung in den meisten Fällen höher als bei Einlagerung (Abbildung 35). Die Zunahme der Werte liegt vermutlich an dem hohen Trockenmasseverlust an organischer Masse, während der mineralische Anteil im Brennstoff aber nicht durch respirative Prozesse beim Biomasseabbau verloren geht. Erwartungsgemäß zeigten die Sortimente aus Pappel und WRH-L neben den höchsten Trockenmasseverlusten auch die größten Änderungen im Aschegehalt [63] [71].

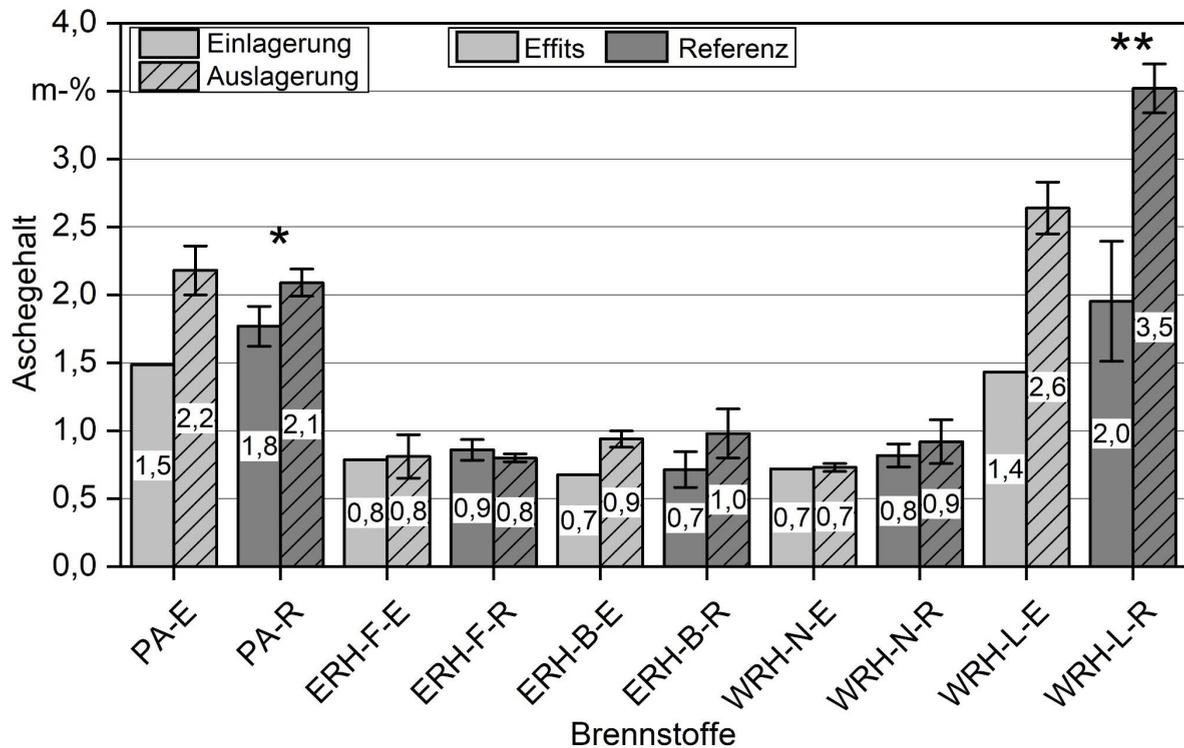


Abbildung 35: Aschegehalte der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern (wasserfreie Bezugsbasis, Mittelwert \pm Standardabweichung, Effits bei Einlagerung: $n = 1$; Referenz bei Einlagerung: $n = 5$; gelagertes Material: $n = 3$; * zeigt signifikante Unterschiede an; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; t-Test and Mann-Whitney-Test)

Energieinhalt. Der Energieinhalt der Brennstoffe nach der Lagerung ist in Abbildung 36 dargestellt. Er berechnet sich aus dem Heizwert, dem Wassergehalt und der Trockenmasse der Brennstoffe [45] [60]. Er wird prozentual ins Verhältnis zum Energieinhalt zu Beginn der Lagerung (100 %) gesetzt. Durch den Trockenmasseverlust geht Brennstoff verloren, sodass die potenziell bereitgestellte Energiemenge sinkt. Bei der Trocknung des Materials wiederum wird Wasser aus den Holzhackschnitzeln entfernt, sodass der Heizwert (im Anlieferungszustand) und folglich der Energieertrag in einer Feuerung steigen, da dort das Wasser nicht mehr verdampft werden muss. Mit Ausnahme von ERH-F-E lagen die Energieinhalte aller Brennstoffe nach der Lagerung unter denen der Einlagerung. Durch den rechnerisch ermittelten (unplausiblen) Trockenmassegewinn von ERH-F-E ergab sich dagegen eine Steigerung des Energieinhalts auf 101 % des Ausgangswerts. In allen Fällen war der Energieinhalt der Effits nach der Lagerung höher als bei den jeweiligen Referenzbrennstoffen. Die Unterschiede lassen sich durch den geringeren Trockenmasseverlust sowie durch die bessere natürliche Trocknung erklären.

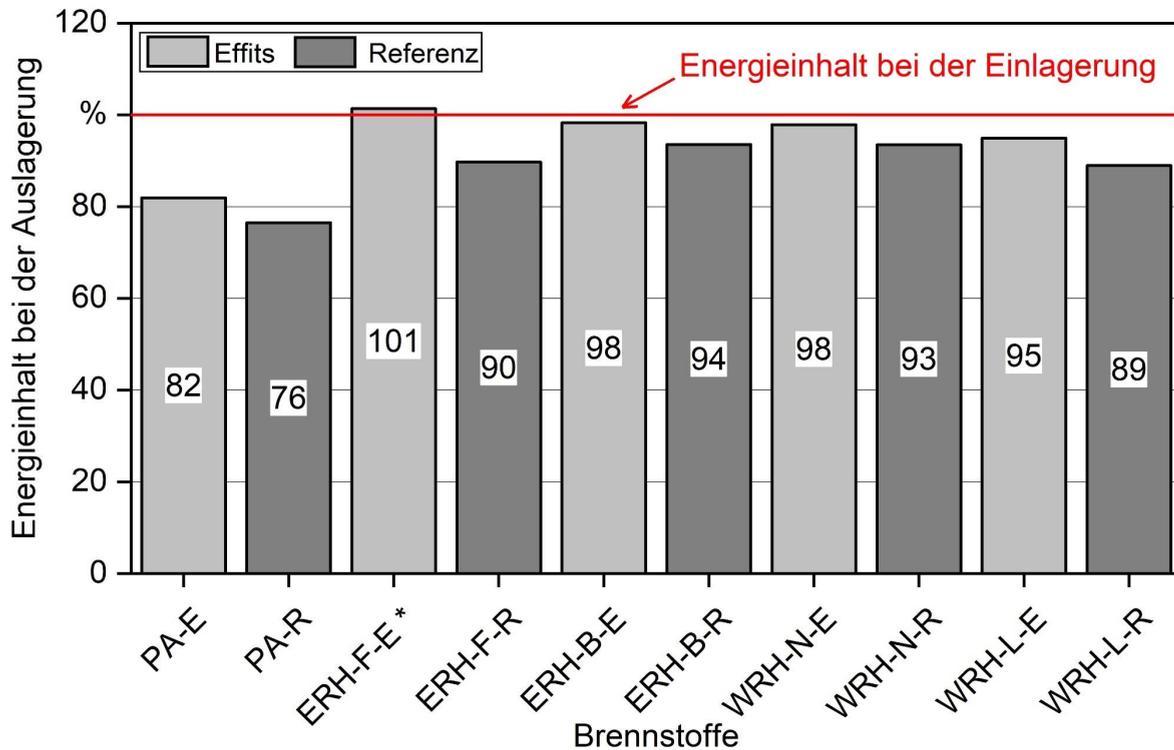


Abbildung 36: Energieinhalt (absolut) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach der Lagerung in Behältern ($n = 1$; * = errechneter „Trockenmassezugewinn“ bei ERH-F-E führt zu Werten $> 100\%$)

Partikelgrößenverteilung. Die Lagerung der Brennstoffe in Behältern führte teilweise zur Veränderung ihrer Partikelgrößenverteilung (Abbildung 37). Bei den Effits war in den Sortimenten PA, ERH-F und ERH-B eine Abnahme der durchschnittlichen Partikelgröße während der Lagerdauer zu erkennen, wohingegen die Effits aus WRH-N nur geringfügige Änderungen zeigten. Die Referenzbrennstoffe veränderten sich mit Ausnahme von PA und WRH-L wenig bis gar nicht.

Schrumpfungsprozesse während der Lagerung können hierbei nicht als Ursache herangezogen werden. Zwar lagen die Wassergehalte der Effits außer bei Pappel zum Zeitpunkt der Auslagerung unterhalb des Fasersättigungspunkts, die der Referenzbrennstoffe darüber; bei der Analyse der Partikelgrößenverteilung kommen jedoch Brennstoffe zum Einsatz, die auf einen nahezu einheitlichen Wassergehalt im Labor vorgetrocknet werden [18]. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die Effits aufgrund ihrer an den Jahrringen vorgebrochenen Partikelstruktur während des Auf- und Abbaus der Lagerbehälter einer stärkeren mechanischen Nachzerkleinerung ausgesetzt waren als die Referenzbrennstoffe, beispielsweise bei der Homogenisierung der Brennstoffe oder der Befüllung der Behälter mit Schaufel und Radlader.

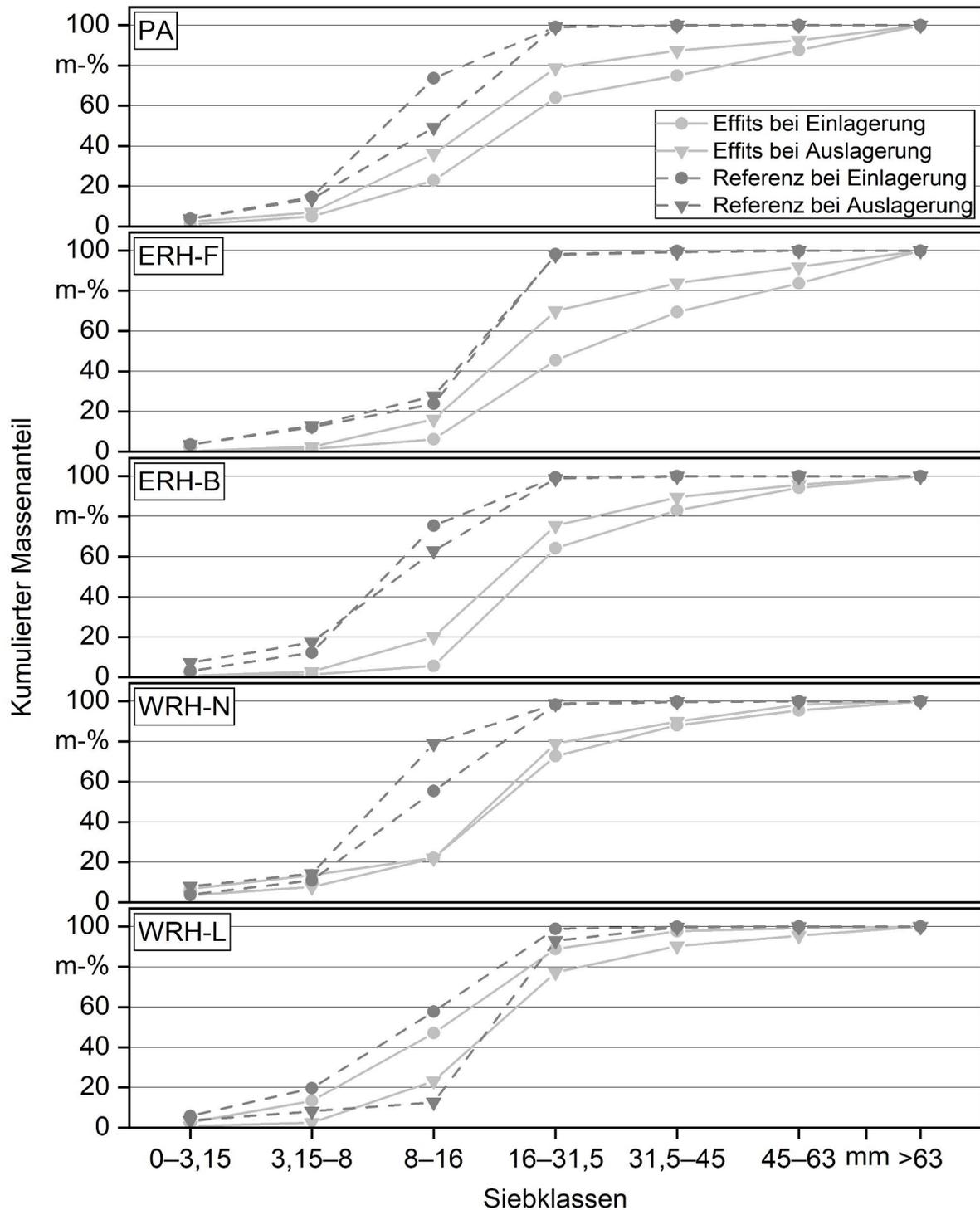


Abbildung 37: Kumulierter Massenanteil in den Partikelgrößenfraktionen der jeweiligen Brennstoffpaare aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Behältern ($n = 3$)

Bei dem Sortiment WRH-L wurde nach der Lagerung in beiden Brennstoffen (Effits und Referenz) eine gröbere Partikelstruktur nachgewiesen als bei Einlagerung. Da aber nicht von einer Agglomeration der Brennstoffpartikel auszugehen ist, wird hierfür eine hohe He-

terogenität im Rohmaterial als Ursache angesehen. So erfolgte die Beprobung der Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe vor der Lagerung an dem gesamten, frisch zerkleinerten Material (≥ 10 SRM; $n = 5$). Die Partikelgrößenverteilung nach der Lagerung wurde an dem Material aus den Lagerbehältern bestimmt ($0,6 \text{ m}^3$; $n = 3$). Ähnliche Effekte der Probennahme sind auch für die anderen Sortimente nicht auszuschließen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aus den Behälterversuchen, dass die neuartige Partikelstruktur der Effits positive Effekte auf das Lagerverhalten der Brennstoffe hat. Vor allem die Parameter Wassergehalt, Trockenmasseverlust und Energieinhalt wurden positiv beeinflusst. Eine Lagerung in kleinen Chargen, beispielsweise in den speziell für die Lagerung angepassten Big Bags mit einem Füllvolumen $\leq 1 \text{ m}^3$, sollte dabei unter Praxisbedingungen somit zu einer besseren Brennstoffqualität führen, die für viele Hackschnitzelheizungen im kleinen Leistungsbereich geeignet sein sollte. Je nach Rohmaterial (ERH-F, ERH-B) sollte es dabei nur zu sehr geringen Verlusten an Trockenmasse und bereitgestellter Energie kommen.

3.2.2.2 Lagerung im Haufwerk

Parallel zu der Lagerung in Behältern wurde 2019 die Lagerung in kleineren Haufwerken (ca. 15 SRM) in einem fünfmonatigen Praxisversuch analysiert (siehe Abschnitt 3.1.5). Hierzu kamen die beiden Brennstoffe aus ERH-F zum Einsatz.

Temperaturverlauf. Die Temperatur der Haufwerke lag die meiste Zeit über der Temperatur der Umgebungsluft (Abbildung 38). Sowohl die mittlere Haufwerkstemperatur der Effits als auch ihr höchster Tagesmittelwert lagen unter den Werten des Referenzbrennstoffs. Die Durchschnittstemperatur der Effits betrug $23,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Beim Referenzbrennstoff lag dieser Mittelwert um $2 \text{ }^\circ\text{C}$ höher, bei $25,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Der maximale Tagesmittelwert der Referenz lag mit $31,4 \text{ }^\circ\text{C}$ um $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ höher als der höchste Wert der Effits.

Aufgrund steigender Umgebungslufttemperaturen lag das Temperaturmaximum der Haufwerke im späteren Verlauf der Lagerung. Nichtsdestotrotz wurde zumindest für den Referenzbrennstoff ein starker Anstieg der Temperatur im Haufwerk zu Beginn der Lagerung festgestellt. Interessanterweise kam es bei fallenden Außentemperaturen gegen Ende der Lagerung in beiden Haufwerken zu keiner deutlichen Abnahme der Haufwerkstemperatur.

Sowohl der Temperaturanstieg zu Beginn der Lagerung als auch die insgesamt höhere Haufwerkstemperatur im Vergleich zur Umgebungsluft deuten, wie schon bei den Behälterversuchen, auf eine gesteigerte mikrobielle Aktivität und damit auf hohe Trockenmasseverluste, gleichzeitig aber auch auf eine erhöhte Brennstofftrocknung hin (siehe Abschnitt 3.2.2.1) [48] [68]. Der höhere Feinanteil des Referenzbrennstoffs könnte auch hier den mikrobiellen Abbau durch eine größere Oberfläche im Verhältnis zum jeweiligen Partikelvolumen, aber auch durch ein größeres Nährstoffangebot gefördert haben und damit die erhöhte Temperatur des Referenzbrennstoffs erklären. Gleichzeitig sollte die grobe Partikelstruktur der Effits eine bessere Durchlüftung der Schüttung ermöglichen, wodurch die warme und mit Wasserdampf gesättigte Luft leichter aus dem Haufwerk abgeführt wird (vgl. Abschnitte 3.2.2.1 sowie 3.2.3 und 3.2.4).

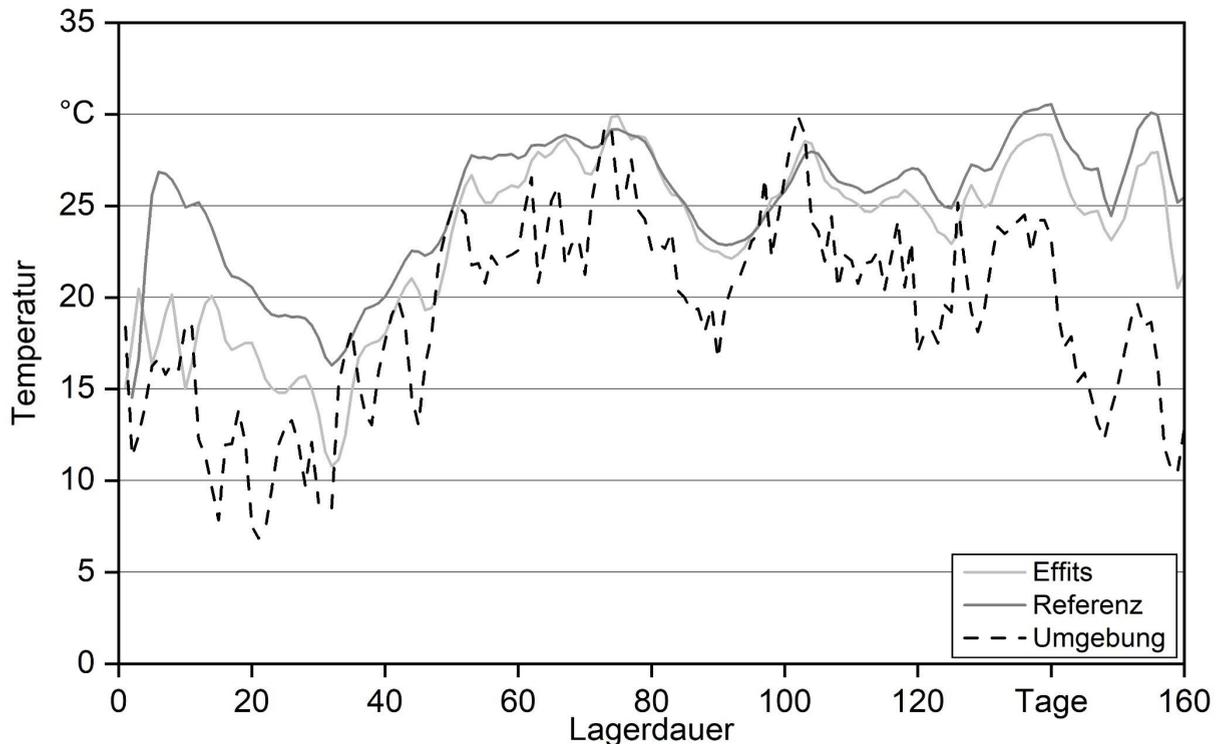


Abbildung 38: Tagesmitteltemperaturen der Haufwerke aus den Brennstoffen 2019, gemittelt über jeweils zwei Temperatursensoren aus dem Kern der Haufwerke, sowie Umgebungstemperatur über den gesamten Lagerungszeitraum vom 15.04.2019 bis 24.09.2019

Wassergehalt. Die Effits zeigten bei Auslagerung signifikant niedrigere Wassergehalte als der Referenzbrennstoff ($p < 0,001$, Abbildung 39). Sie erreichten einen durchschnittlichen Wert von 31,5 m-%, wohingegen die Referenz noch einen Endwassergehalt von 46,8 m-% aufwies. Die Wassergehalte beider Brennstoffe waren bei Auslagerung signifikant niedriger im Vergleich zur Einlagerung ($p < 0,001$), lagen in beiden Fällen jedoch noch nicht in einem Bereich, der als lagerstabil bewertet wird (d. h. ≤ 20 m-%) [44] [48]. Vor allem der Referenzbrennstoff war aufgrund des hohen Wassergehalts noch nicht für die Nutzung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet.

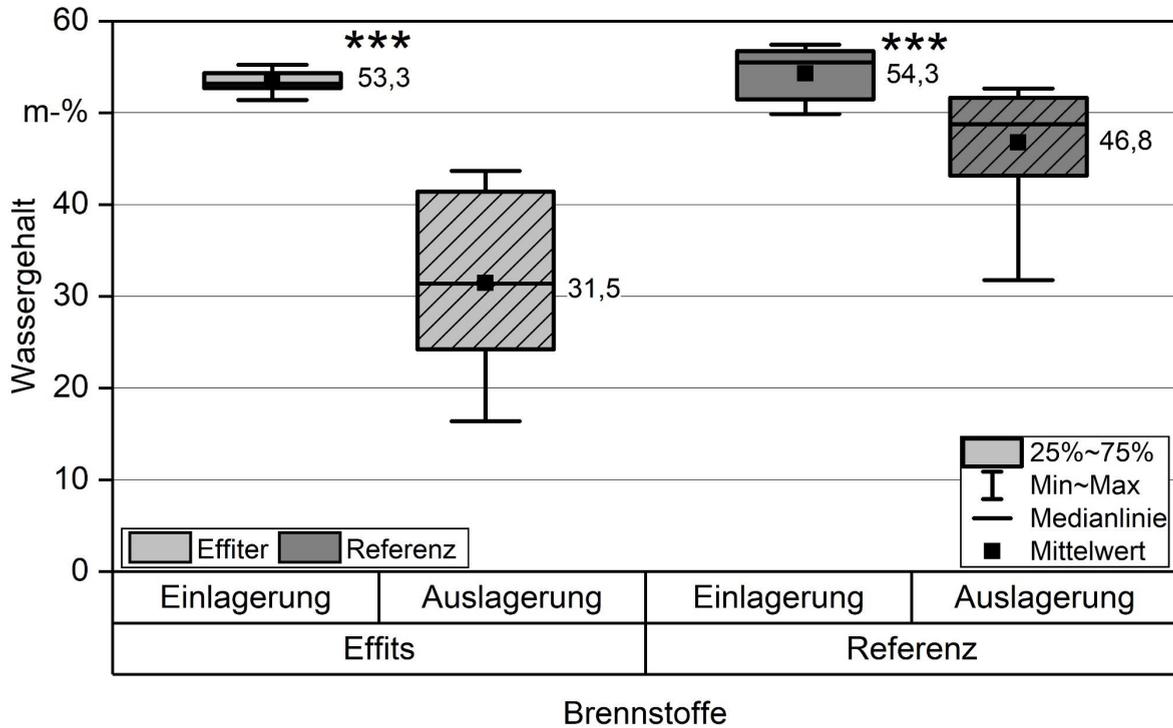


Abbildung 39: Mittlere Wassergehalte und Schwankungsbreite der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Haufwerken (n = 12; * zeigt signifikante Unterschiede an; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001)

Die Schwankungsbreite beim Wassergehalt der Effits war insgesamt höher als beim Wassergehalt des Referenzbrennstoffs. Während die Effits in den Randbereichen des Haufwerks Wassergehalte von teilweise unter 25 m-% aufwiesen und damit deutlich unter den Werten der Referenz lagen, zeigten sich im Kern des Haufwerks Wassergehalte von über 40 m-% (siehe Abbildung 40).

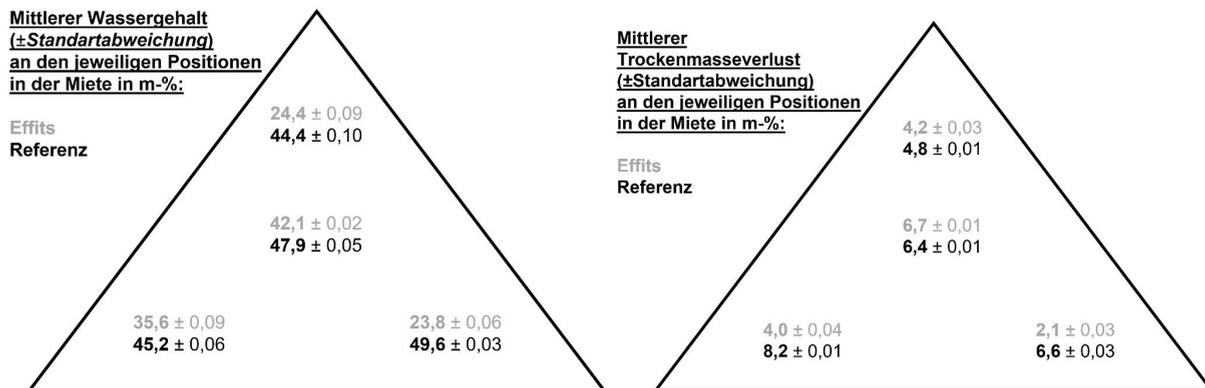


Abbildung 40: Mittlere Wassergehalte (links) und mittlere Trockenmasseverluste (rechts) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in m-% an den jeweiligen Positionen im Haufwerk zum Zeitpunkt der Auslagerung (Mittelwert aus drei Querschnitten ± Standardabweichung, n = 3)

Als mögliche Erklärung für die bessere Trocknung der Effits sind dieselben Mechanismen wie bei der Diskussion der Behälterversuche anzuführen. Durch ihre gröbere Partikelstruktur sollte die Belüftung der Effits verbessert und damit ein guter Abtransport der mit Wasserdampf gesättigten, warmen Luft gegeben sein. Vor allem in den Randbereichen der Haufwerke könnte die neuartige Partikelstruktur die Durchlüftung besonders gut fördern, wenn diese Schicht sich durch die Sonneneinstrahlung zusätzlich erwärmt. Die verwendete Vliesabdeckung wiederum verhinderte die Wiederbefeuchtung der Brennstoffe durch Niederschlag. Die Niederschlagsmenge im Sommer 2019 betrug 190,3 l. Dies entspricht ca. 83 % des langjährigen Mittels für Straubing [86]. Ein Effekt des Niederschlags auf die Deckschicht der Haufwerke wäre somit ohne Vliesabdeckung zu erwarten gewesen. Die bei der Lagerung in Haufwerken häufig auftretenden Kondensationsschichten mit hohem Wassergehalten, beispielsweise zwischen Vlies und Haufwerksoberfläche [45] [60], konnten im Versuch 2019 nicht nachgewiesen werden. Dies lag vermutlich an der insgesamt geringen Dimensionierung der Haufwerke, wohingegen bei den Versuchen 2020 im industriellen Maßstab (siehe Abschnitt 4.2.2) eine Kondensationsschicht im Randbereich der Haufwerke festgestellt wurde.

Trockenmasseverluste. Die Trockenmasseverluste der Effits waren niedriger als die der Referenzbrennstoffe (Abbildung 41). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nicht nachgewiesen werden. Dies lag vermutlich an der geringen Anzahl an Messpunkten ($n = 12$ je Haufwerk) sowie an den starken Schwankungen der Ergebnisse. Im Vergleich zu den Versuchen mit den Lagerbehältern (Abschnitt 3.2.2.1) wiesen die Referenzbrennstoffe im Haufwerk niedrigere Trockenmasseverluste auf (Haufwerk: 6,4 m-%, Behälter: 10,1 m-%). Für die Effits wurde im Haufwerk ein Trockenmasseverlust von 4,49 m-% gemessen. Im Lagerbehälter zeigten die Effits dagegen einen unplausiblen, negativen Trockenmasseverlust, weshalb die Ergebnisse nicht direkt verglichen werden können.

Analog zu den Wassergehalten waren die Trockenmasseverluste der Effits heterogen im Haufwerk verteilt (Abbildung 40). Die geringsten Verluste wurden für sie in den äußeren Schichten des Haufwerks gemessen, wo auch die stärkste Trocknung der Brennstoffe stattfand, während die Bilanzbeutel im Zentrum der Schüttung die höchsten Trockenmasseverluste aufwiesen. Bei den Referenzbrennstoffen waren die Verluste in der oberen Region des Haufwerks am geringsten und stiegen zum Inneren hin an.

Auch die Ergebnisse der Trockenmasseverluste deuten an, dass aufgrund der neuartigen Partikelstruktur der Effits eine bessere Durchlüftung des Materials im Vergleich zur Referenz stattfand. Das führte vermutlich zu einer schnellen natürlichen Trocknung und damit zu einem gehemmten mikrobiellen Abbau. Daneben erklärt sich die geringere mikrobielle Aktivität erneut durch die geringeren Feinanteile der Effits (geringere Oberfläche, ggf. vermindertes Nährstoffangebot durch mechanische Abtrennung des Feinanteils beim Brennstoffaustrag). Allerdings dürfte sich die nährstoffliche Zusammensetzung im Fall von Energierundholz, das keine wesentlichen Anteile an Nadeln oder Blätter besitzt, durch die bei den Effits stattfindende maschinelle Teilabtrennung von Feinanteil nur wenig geändert haben.

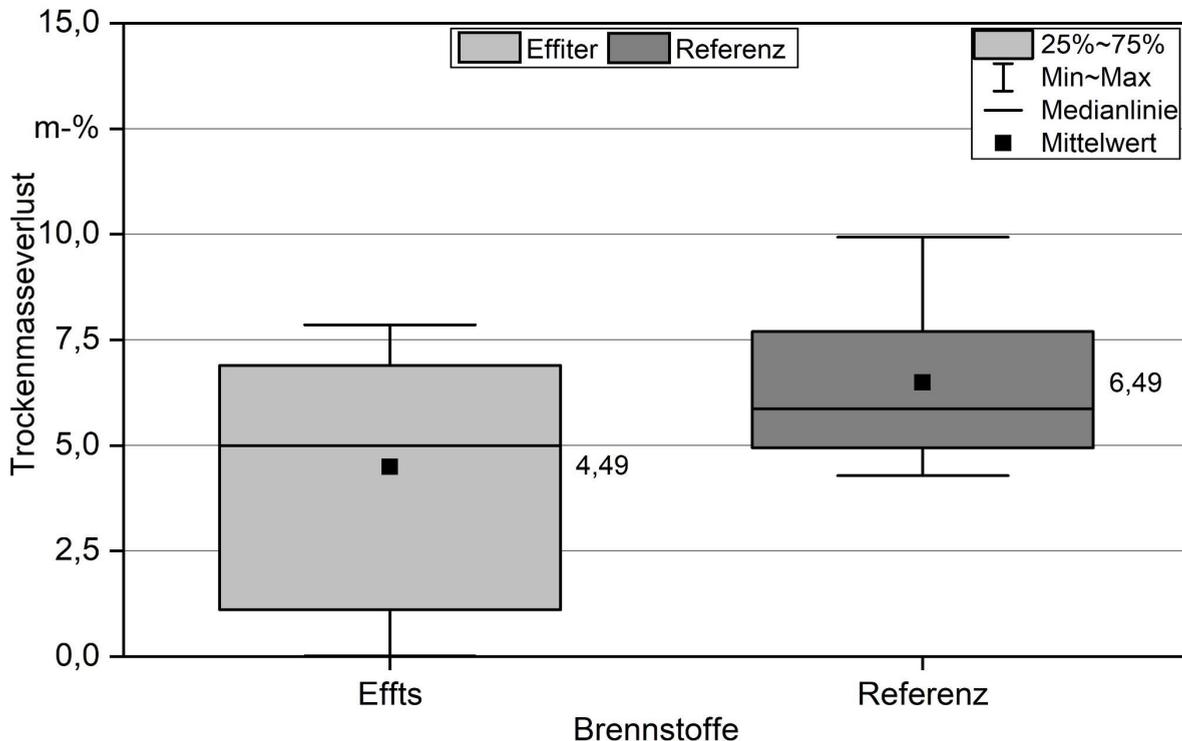


Abbildung 41: Mittlere Trockenmasseverluste der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in den Haufwerken über die gesamte Lagerdauer ($n = 12$, rechnerisch negative Werte für Trockenmasseverluste fanden keinen Eingang in die Darstellung)

Energieinhalt. Auch nach der Lagerung in den Haufwerken zeigte sich eine Reduktion des verfügbaren Energieinhalts. Unter Einbeziehung der Wassergehaltsänderung und des Trockenmasseverlusts zeigten die Effits nach fünfmonatiger Lagerung einen Energieinhalt von 96 % im Vergleich zum frisch eingelagerten Brennstoff (100 %). Der Referenzbrennstoff erreichte einen Energieinhalt von 94 %. Der höhere Wert der Effits entspricht somit dem bereits bei den Behälterversuchen beobachteten Trend.

Partikelgrößenverteilung. Analog zu den Versuchen in den Lagerbehältern nahm die Partikelgröße der Brennstoffe nach der Lagerung ab (Abbildung 42). Bei den Effits war dieser Effekt stärker ausgeprägt als bei den Referenzbrennstoffen. Sie wiesen nach der Lagerung eine Partikelstruktur auf, die der des Referenzbrennstoffs vor der Lagerung sehr ähnlich war. Es ist davon auszugehen, dass es analog zu den Versuchen in den Behältern zu einer zusätzlichen Zerkleinerung durch die mechanische Beanspruchung der Brennstoffe gekommen ist. Der höhere Grad der Nachzerkleinerung in den Effits aus dem Haufwerk im Vergleich zu den Lagerbehältern lässt sich durch die stärkere Beanspruchung der Brennstoffe beim Auf- und Abbau der Haufwerke, vornehmlich mit einem Radlader, erklären. Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung legt nahe, dass eine mechanische Belastung der Brennstoffe eine wesentliche Nachzerkleinerung zur Folge haben kann. Sollen positive Effekte der neuartigen Partikelstruktur der Effits genutzt werden, ist eine mechanische Belastung der Brennstoffe, wenn möglich, auf ein Minimum zu reduzieren.

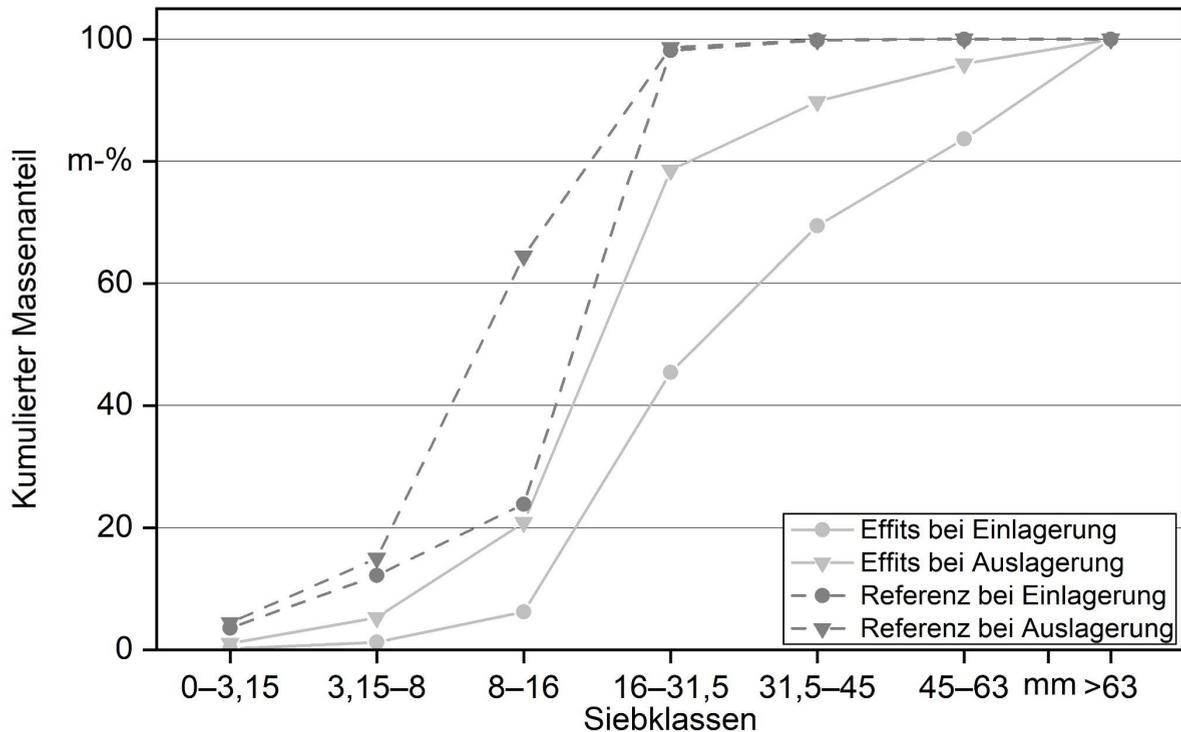


Abbildung 42: Kumulierter Massenanteil der Partikelfractionen der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 vor und nach der Lagerung in Haufwerken (Mittelwert, $n = 9$)

3.2.3 Technische Brennstofftrocknung

Die Trocknerwirkungsgrade bei der technischen Trocknung der Brennstoffe aus 2019 im Satz Trockner des TFZ sind in Abbildung 43 dargestellt. Bei dem Referenzbrennstoff aus Pappel sind aufgrund eines Ausfalls der Messtechnik keine Messdaten und somit keine Auswertung der Trocknung vorhanden. In allen anderen Fällen zeigten die Effits einen höheren bzw. im Fall von ERH-F gleichwertigen Trocknerwirkungsgrad verglichen mit der jeweiligen Referenz. Bei ERH-B war der Unterschied mit fünf Prozentpunkten am größten.

In die Berechnung des Wirkungsgrads fließen zwei wesentliche Parameter ein: Die Energie des Heizregisters für die Erwärmung der Trocknungsluft und die Energie für den Betrieb des Gebläses. Dabei können brennstoffseitig zwei Faktoren die Effektivität der Trocknung besonders stark beeinflussen: der Belüftungswiderstand, den die Brennstoffe der durchströmenden Luft bieten, sowie das Wasserabgabevermögen der Brennstoffe, das hier aber nicht bestimmt wurde. Die Messungen zum Belüftungswiderstand werden separat in Abschnitt 3.2.4 dargestellt. Dort zeigte sich, dass die Effits der durchströmenden Luft weniger Widerstand bieten als die Referenzbrennstoffe.

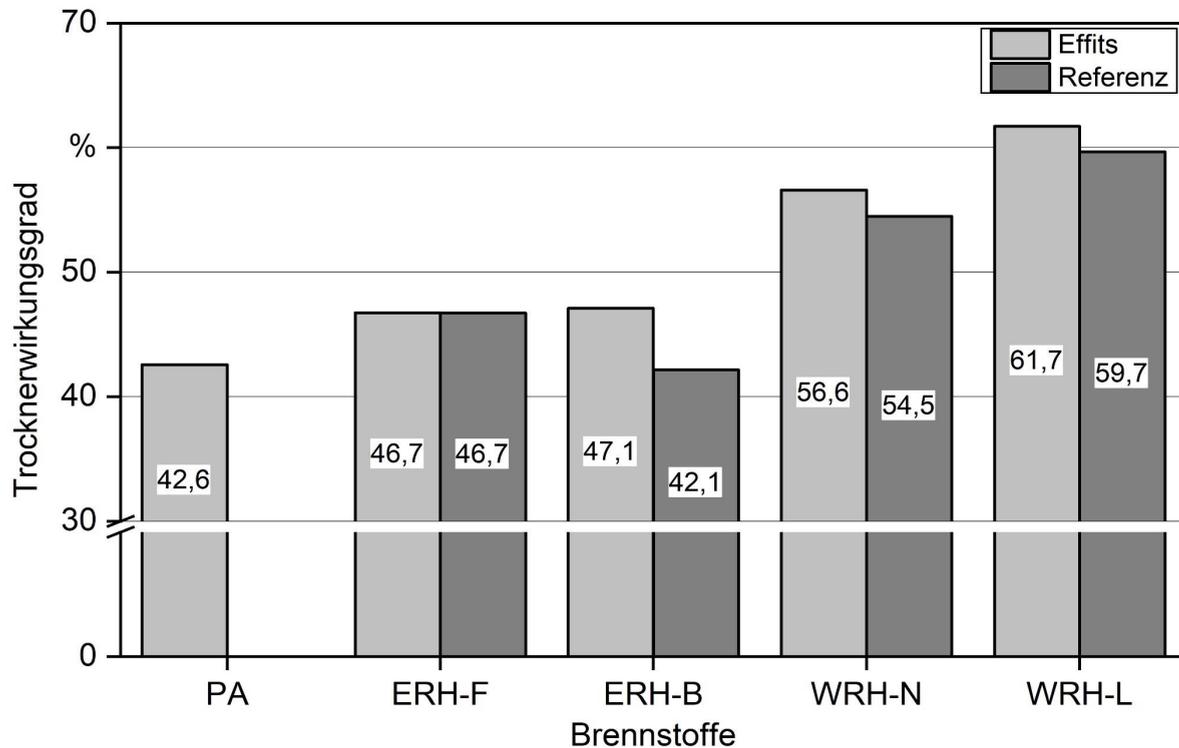


Abbildung 43: Wirkungsgrade der Trocknungsversuche mit den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 an der Satz Trocknungsanlage des TFZ (unter Berücksichtigung des Energieaufwands für Heizregister und Gebläse; Betrachtungsbereich von 30 m-% auf 20 m-% Wassergehalt; $n = 1$; Ausfall der Messtechnik bei PA-Referenz)

Der Effekt, der sich dadurch auf das Gebläse ergibt, war in dem hier dargestellten Versuch jedoch zu klein, um die bei der technischen Trocknung gemessenen Wirkungsgradunterschiede erklären zu können. Die Analyse der Daten hat gezeigt, dass das Aufheizen der Trocknungsluft den Hauptanteil der für die Trocknung aufgewandten Energie ausmacht. Die Dauer der Trocknung hat den größten Einfluss auf den Energieverbrauch des Heizregisters (aufgewendete Energie = Leistung \times Zeit). Sollte statt einer Warmlufttrocknung jedoch eine Trocknung mit Außenluft erfolgen, wäre der Effekt auf das Gebläse deutlicher sichtbar gewesen.

Die Effits zeigten in allen Fällen eine jeweils kürzere Trocknungsdauer als die Referenzbrennstoffe, bezogen jeweils auf die untersuchte einheitliche Wassergehaltsänderung von 30 m-% auf 20 m-% (siehe Tabelle 11). Der geringste Unterschied in der Trocknungsdauer zwischen Effits und Referenz zeigte sich bei WRH-N mit zehn Minuten, während bei WRH-L ein Unterschied von 160 Minuten vorlag. Im Mittel wiesen die Effits eine um 75 Minuten kürzere Trocknungsdauer auf als die Referenzbrennstoffe.

Es wird davon ausgegangen, dass neben der günstigen Partikelgrößenverteilung, die die Belüftung der Effits fördert, auch deren vorgebrochene Partikelform die Abgabe von Wasser an die Umgebungsluft verbessert. Dies könnte zum einen an der Oberflächenvergrößerung, zum anderen an den teils luftdurchlässigen Partikeln liegen.

Tabelle 11: Trocknungsdauer der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in den Satz-trocknerboxen des TFZ von 30 m-% auf 20 m-% in Stunden (Ausfall der Messtechnik bei PA-R)

| Brennstoffe | Effits in Stunden | Referenz in Stunden | Zeitunterschied in Minuten |
|-------------|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| PA | 18:00 | – | – |
| ERH-F | 16:00 | 16:50 | 50 |
| ERH-B | 22:10 | 23:30 | 80 |
| WRH-N | 16:50 | 17:00 | 10 |
| WRH-L | 17:00 | 19:40 | 160 |

Sollten weitere Trocknungsversuche mit den Brennstoffen durchgeführt werden, so könnten der Volumenstrom und die Temperatur der Trocknungsluft an den jeweiligen Brennstoff angepasst werden, um eine größtmögliche Optimierung des Prozesses zu erreichen. Bei beiden Brennstoffarten (Effits, Referenz) wäre es von Vorteil, wenn beide Parameter dynamisch angepasst würden, sodass die austretende Luft nach der Trocknungsbox stets gesättigt ist [60]. Hierdurch dürfte sich der Wirkungsgrad des Prozesses noch weiter steigern lassen. Um dies zu beantworten, sind jedoch weitere Versuche mit einer kontinuierlichen Messung der relativen Luftfeuchtigkeit am Trocknerausgang notwendig.

3.2.4 Belüftungswiderstand

Die Untersuchungen zum spezifischen Belüftungswiderstand der Brennstoffe erfolgten experimentell am TFZ. Ausgehend von diesen Daten soll der Belüftungswiderstand langfristig anhand physikalischer Brennstoffparameter abgeschätzt werden. Hierzu wird auf bestehende, am TFZ entwickelte Berechnungsmodelle zurückgegriffen [58].

3.2.4.1 Experimentelle Messung des spezifischen Belüftungswiderstands

In Abbildung 44 sind die Belüftungswiderstände der Brennstoffe in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten traten bei den Effits aus ERH-B mit 0,9 m/s bei einer Gebläseleistung von 100 % auf. Die geringste Strömungsgeschwindigkeit bei derselben Gebläseleistung erreichte WRH-L mit maximal 0,5 m/s. Der insgesamt höchste Belüftungswiderstand (bei 100 % Gebläseleistung) trat bei WRH-N-R mit 907 Pa/m auf. Der niedrigste Wert bei 100 % Gebläseleistung wurde bei den Effits aus ERH-B mit 728 Pa/m gemessen.

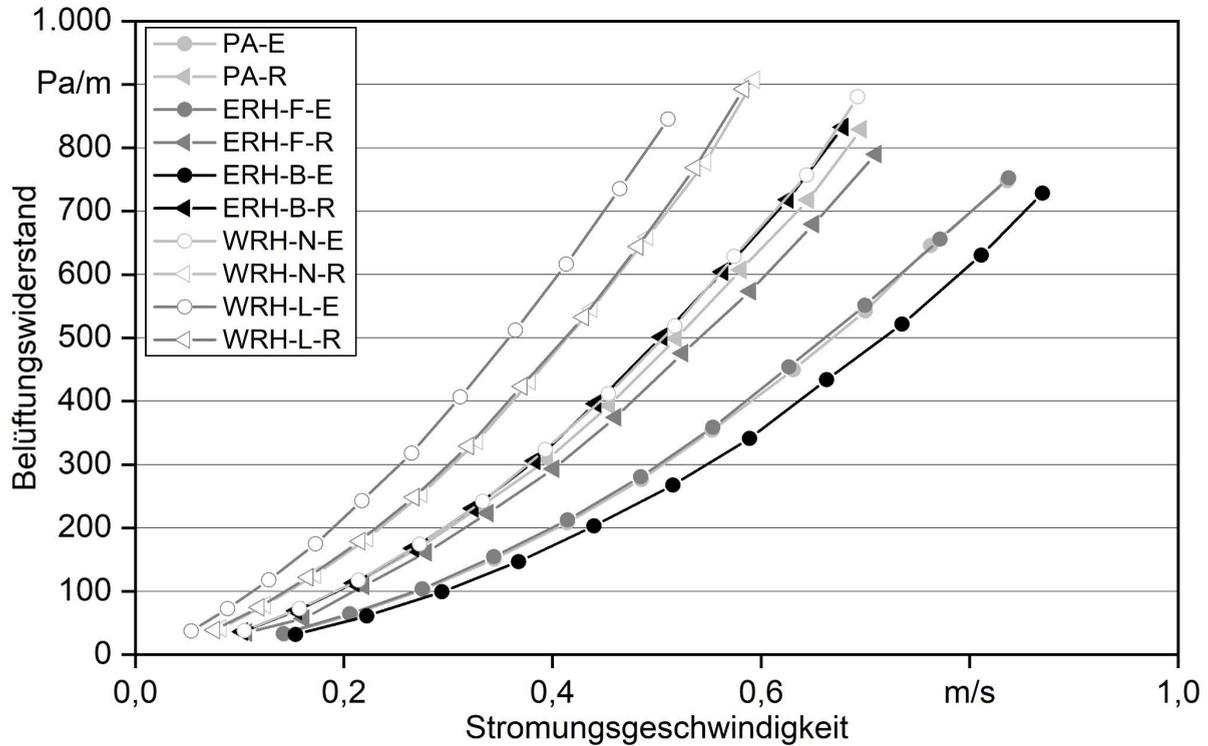


Abbildung 44: Belüftungswiderstände der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in Pa/m bezogen auf die Strömungsgeschwindigkeit der durchströmenden Luft ($n = 2$)

Mit Ausnahme von WRH-L lagen die Belüftungswiderstände der Effits bei identischer Strömungsgeschwindigkeit in allen Fällen teils deutlich unter denen der Referenzbrennstoffe. Nur bei WRH-L lagen die Belüftungswiderstände der Effits über denen der Referenz, wenn auch in einem sehr ähnlichen Bereich.

Die im Versuch gemessenen Werte zeigen, dass Brennstoffe mit einem hohen Anteil großer Partikel und einem niedrigen Feinanteil (z. B. Effits aus Energierundholz oder Pappel) deutlich luftdurchlässiger sind als Materialien mit hohem Feinanteil. Vor allem der Anteil kleiner Partikel verschließt die freien Luftporen in einer Schüttung und erhöht somit den Luftwiderstand im Material. Überlängen und große Partikel hingegen neigen stärker zum Verkanten und bilden große Luftzwischenräume. In der Folge sinkt der Belüftungswiderstand, während die Luftgeschwindigkeit durch die Schüttung bei gleichbleibender Gebläseleistung steigt. Ähnliche Effekte der Partikelgröße auf den Belüftungswiderstand wurde für zahlreiche Materialien, beispielsweise Holz hackschnitzel, Holzpellets oder landwirtschaftliche Produkte dargestellt [40] [49] [50] [54] [58] [88].

Die Messungen zur Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe hatten gezeigt, dass die Effits i. d. R. einen höheren Anteil an groben Partikeln sowie einen geringeren Feinanteil als das Referenzmaterial besitzen (siehe Abschnitt 3.2.1.2). Dadurch lassen sich die insgesamt niedrigeren Belüftungswiderstände gut erklären. Einzige Ausnahme bildeten die Effits aus WRH-L, die einen geringfügig höheren Belüftungswiderstand aufwiesen als

WRH-L-R. Hierfür sind höchstwahrscheinlich sehr hohe Laubanteile im Material verantwortlich. Gleichzeitig zeigten sowohl die Effits als auch die Referenzbrennstoffe aus WRH-L nur einen sehr geringen Anteil an Partikeln $> 31,5$ mm.

3.2.4.2 Modellierung des Belüftungswiderstands

Die im Versuch ermittelten spezifischen Belüftungswiderstände und die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit der vereinfachten Formel nach ERGUN [34] gefittet (siehe Formel (3.7) in Abschnitt 3.1.7). Dabei ermittelt das Programm OriginLab die zwei wahrscheinlichsten Wertepaare für die materialspezifischen Parameter a und b . Mit Bestimmtheitsmaßen von jeweils $> 99,9$ % erwiesen sich die gefitteten Gleichungen als äußerst präzise. Die Parameter der Fits sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Aus den sich hieraus ergebenden Regressionen nach Ergun wurden die Belüftungswiderstände bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0 bis 1,0 m/s berechnet. Diese sind in Tabelle 13 aufgeführt.

In einem nächsten Schritt wurden ausgewählte physikalischen Brennstoffparameter jedes Brennstoffs, darunter die Schüttdichte, und relevante Form- und Längenparameter der Bildanalyse in die Formeln nach KUPTZ et al. (2021) [58] eingesetzt (siehe Abschnitt 3.1.7). Auf diese Weise sollten die Parameter a und b des Modells nach Ergun anhand der physikalischen Brennstoffqualität rechnerisch ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 wiedergegeben.

Die nach dem Modell von Kuptz et al. (2021) [58] berechneten Werte für den spezifischen Belüftungswiderstand wurden mit den gemessenen Werten verglichen. Je nach Brennstoff stimmen die anhand der physikalischen Brennstoffqualität berechneten Werte gut mit den gemessenen Werten überein (Tabelle 15). Teilweise kam es aber auch zu erheblichen Abweichungen.

Bei den beiden Referenzbrennstoffen aus Energierundholz (ERH-F, ERH-B) wurden sehr genaue Werte durch das Modell von KUPTZ et al. (2021) berechnet. Sie wiesen die geringsten Abweichungen von den realen Messwerten von -1 % (ERH-F-R) und 5 % (ERH-B-R) auf. Im Allgemeinen ist auffällig, dass die Modellierung der Referenzbrennstoffe fast durchgehend näher an den gemessenen Werten liegt als bei den Effits. Besonders auffällig sind die Effits aus ERH-B, WRH-L und PA, die um mindestens 35 % unterhalb der realen Messwerte lagen. Vor allem die berechneten Werte für WRH-L-E betragen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten weniger als die Hälfte der gefitteten Werte. Mit einer Abweichung von -21 % erwies sich WRH-N-E als einzige Effits-Probe, die etwas genauer als die Referenz und zusammen mit ERH-F-E die genaueste Prognose des Belüftungswiderstands für Effits-Brennstoffe nach dem Modell nach KUPTZ et al. (2021) ermöglichte.

Tabelle 12: *Regressionsparameter a und b, gefittet nach der Formel nach ERGUN für den spezifischen Belüftungswiderstand der Effits und der Referenzbrennstoffe aus den Versuchen 2019 inklusive zugehörigen Bestimmtheitsmaßes*

| Brennstoffe | Ergun _a | Ergun _b | Bestimmtheitsmaß |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------|
| PA-E | 113 | 947 | 99,97 % |
| PA-R | 255 | 1.346 | 99,97 % |
| ERH-F-E | 133 | 925 | 99,97 % |
| ERH-F-R | 228 | 1.258 | 99,99 % |
| ERH-B-E | 75 | 870 | 99,99 % |
| ERH-B-R | 247 | 1.453 | 99,97 % |
| WRH-N-E | 231 | 1.492 | 99,98 % |
| WRH-N-R | 418 | 1.869 | 99,96 % |
| WRH-L-E | 706 | 1.881 | 99,98 % |
| WRH-L-R | 427 | 1.890 | 99,98 % |

Tabelle 13: *Spezifischer Belüftungswiderstand (in Pa/m) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019, berechnet anhand der gefitteten Parameter a und b nach ERGUN in Abhängigkeit der Belüftungsgeschwindigkeit (in m/s)*

| Brennstoffe | Strömungsgeschwindigkeit in m/s | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| PA-E | 21 | 60 | 119 | 197 | 293 | 409 | 543 | 696 | 868 | 1.060 |
| PA-R | 39 | 105 | 198 | 317 | 464 | 637 | 838 | 1.065 | 1.320 | 1.601 |
| ERH-F-E | 23 | 64 | 123 | 201 | 298 | 413 | 547 | 699 | 870 | 1.059 |
| ERH-F-R | 35 | 96 | 182 | 293 | 429 | 590 | 776 | 988 | 1.224 | 1.486 |
| ERH-B-E | 16 | 50 | 101 | 169 | 255 | 358 | 479 | 617 | 772 | 945 |
| ERH-B-R | 39 | 107 | 205 | 331 | 487 | 671 | 885 | 1.127 | 1.399 | 1.700 |
| WRH-N-E | 38 | 106 | 204 | 331 | 488 | 676 | 893 | 1.140 | 1.416 | 1.723 |
| WRH-N-R | 60 | 158 | 293 | 466 | 676 | 923 | 1.208 | 1.530 | 1.890 | 2.286 |
| WRH-L-E | 89 | 217 | 381 | 584 | 824 | 1.101 | 1.416 | 1.769 | 2.160 | 2.588 |
| WRH-L-R | 62 | 161 | 298 | 473 | 686 | 936 | 1.225 | 1.551 | 1.915 | 2.317 |

Tabelle 14: Berechnete Werte der Parameter a und b nach dem Modell von KUPTZ et al. (2021) [58] für die Brennstoffe aus den Versuchen 2019 anhand physikalischer Brennstoffparameter

| Brennstoffe | Parameter a | Parameter b |
|-------------|-------------|-------------|
| PA-E | 55 | 661 |
| PA-R | 186 | 1.208 |
| ERH-F-E | 80 | 797 |
| ERH-F-R | 220 | 1.289 |
| ERH-B-E | 48 | 571 |
| ERH-B-R | 227 | 1.404 |
| WRH-N-E | 172 | 1.211 |
| WRH-N-R | 249 | 1.483 |
| WRH-L-E | 223 | 1.526 |
| WRH-L-R | 282 | 1.578 |

Tabelle 15: Spezifischer Belüftungswiderstand (in Pa/m), berechnet anhand der physikalischen Brennstoffparameter der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach dem Modell von KUPTZ et al. (2021) in Abhängigkeit der Belüftungsgeschwindigkeit (in m/s) inklusive der mittleren Abweichung zwischen den berechneten und den tatsächlich gemessenen Werten

| Brennstoffe | Strömungsgeschwindigkeit in m/s | | | | | | | | | | Mittlere Abweichung |
|-------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|---------------------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | |
| PA-E | 12 | 38 | 76 | 128 | 193 | 271 | 363 | 468 | 586 | 717 | 35 % |
| PA-R | 31 | 86 | 165 | 268 | 395 | 547 | 722 | 922 | 1.146 | 1.395 | 15 % |
| ERH-F-E | 16 | 48 | 96 | 159 | 239 | 335 | 446 | 574 | 718 | 877 | 21 % |
| ERH-F-R | 35 | 96 | 182 | 294 | 433 | 596 | 786 | 1.001 | 1.243 | 1.510 | -1 % |
| ERH-B-E | 11 | 33 | 66 | 111 | 167 | 235 | 314 | 404 | 506 | 619 | 35 % |
| ERH-B-R | 37 | 102 | 194 | 315 | 465 | 642 | 847 | 1.080 | 1.341 | 1.631 | 5 % |
| WRH-N-E | 29 | 83 | 161 | 263 | 389 | 539 | 714 | 912 | 1.135 | 1.383 | 21 % |
| WRH-N-R | 40 | 109 | 208 | 337 | 495 | 683 | 901 | 1.149 | 1.426 | 1.732 | 27 % |
| WRH-L-E | 38 | 106 | 204 | 333 | 493 | 683 | 904 | 1.155 | 1.437 | 1.749 | 41 % |
| WRH-L-R | 44 | 120 | 227 | 365 | 535 | 737 | 970 | 1.235 | 1.532 | 1.860 | 23 % |

Das von KUPTZ et al. (2021) entwickelte Modell kann folglich gut auf Holzhackschnitzel aus herkömmlichen Hackerverfahren, weniger aber auf die neuartigen Effits angewendet werden. Dies ist naheliegend, da für die Modellentwicklung größtenteils typische Waldhack-

schnitzel aus realen Brennstoffbereitstellungsketten in bayerischen Wäldern sowie Brennstoffe aus stationären Hackversuchen mit konventionellen Trommel-, Scheibenrad- und Schneckenhackern verwendet worden waren. Für Effits müsste ein neues Modell über eine multiple lineare Regressionsanalyse erstellt werden. In diesem Versuch kamen fünf unterschiedliche Effits-Chargen zum Einsatz. Das Modell nach KUPTZ et al. (2021) berechnet die Parameter a und b anhand von maximal zehn Variablen (inklusive Kreuzprodukten der Parameter). Für eine sinnvolle Modellierung ähnlicher Güte müssten daher deutlich mehr Effits-Brennstoffe analysiert werden.

Anhand der in Abschnitt 3.1.7 dargestellten Formel (3.10) kann mithilfe des spezifischen Belüftungswiderstands von Schüttgütern die notwendige Gebläseleistung für eine technische Brennstofftrocknung berechnet werden [48]. Als Beispiel für die nachfolgende Beispielrechnung dient ein Eurocontainer mit Abmessungen von 6 m Länge, 2,4 m Breite und einer Höhe von 2,3 m. Dabei wurden durchschnittliche Wirkungsgrade des Gebläses und des dazugehörigen Motors von 88 % bzw. 95 % angesetzt.

Als Berechnungsgrundlage wurden alle gefitteten Belüftungswiderstände der Effits und der Referenzbrennstoffe bei einer in der Praxis angewandten Strömungsgeschwindigkeit von 0,1 bis 0,5 m/s verwendet (siehe Tabelle 13). In Tabelle 16 sind die benötigten Leistungen des Gebläses in kW dargestellt. Deutliche Einsparpotenziale aufgrund der veränderten Partikelstruktur der Effits sind insbesondere bei den Sortimenten PA, ERH-F und ERH-B zu erkennen. Bei Letzteren betrug die notwendige Leistung des Gebläses im Durchschnitt 50 % im Vergleich zur Referenz. Auch bei den Effits aus WRH-N kann die Gebläseleistung um ca. 30 % reduziert werden, um den gleichen Volumenstrom wie bei der Referenz zu erreichen. Nur bei WRH-L ist mit Effits ein energetischer Mehrverbrauch des Gebläses von ca. 20 % gegenüber der Referenz zu erwarten.

Tabelle 17 gibt die Stromkosten wieder, die bei 500 Volllaststunden und einem Strompreis von 0,25 ct/kWh allein für das Gebläse der Trocknung zu erwarten sind. Die Kosten für den Stromverbrauch nehmen bei höheren Luftgeschwindigkeiten und der damit höheren benötigten Gebläseleistung in einer quadratischen Funktion zu. Am höchsten waren die Kosten bei einem konstanten Betrieb bei 0,5 m/s mit 2.039 €/a bei Effits aus WRH-L. Am geringsten waren die Kosten bei Effits aus ERH-B mit 631 €/a. Im Vergleich zu den Referenzhackschnitzeln sind die Stromkosten für die Trocknungsluftzufuhr bei den Effits überwiegend deutlich geringer.

Bei den hier dargestellten Berechnungen handelt sich um eine rein theoretische Betrachtung, bei der die Luftgeschwindigkeit bzw. der Volumenstrom der Effits mit der bzw. dem der Referenzbrennstoffe gleichgesetzt wird. In der Praxis entscheidet allerdings der Sättigungsgrad der Luft über den tatsächlichen notwendigen Volumenstrom durch einen Trockner, um diesen möglichst effizient betreiben zu können. Dabei wird oft eine Sättigung der Luft von etwa 80 % Wasser als Kenngröße für eine effiziente Trocknung verwendet [48].

Tabelle 16: *Benötigte Gebläseleistung in kW für die Trocknungsluftzufuhr der Brennstoffe aus den Versuchen 2019, berechnet für ein Praxisbeispiel mit einem Trocknungscontainer (Maße: 6,0 m × 2,4 m × 2,3 m) bei variierenden Strömungsgeschwindigkeiten in m/s*

| Brennstoffe | Strömungsgeschwindigkeit in m/s | | | | |
|-------------|---------------------------------|------|------|------|-------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| PA-E | 0,08 | 0,48 | 1,42 | 3,12 | 5,81 |
| PA-R | 0,15 | 0,83 | 2,35 | 5,03 | 9,19 |
| ERH-F-E | 0,09 | 0,50 | 1,47 | 3,19 | 5,90 |
| ERH-F-R | 0,14 | 0,76 | 2,16 | 4,64 | 8,49 |
| ERH-B-E | 0,06 | 0,39 | 1,20 | 2,68 | 5,05 |
| ERH-B-R | 0,16 | 0,85 | 2,43 | 5,25 | 9,64 |
| WRH-N-E | 0,15 | 0,84 | 2,42 | 5,25 | 9,67 |
| WRH-N-R | 0,24 | 1,25 | 3,49 | 7,39 | 13,39 |
| WRH-L-E | 0,35 | 1,72 | 4,53 | 9,25 | 16,31 |
| WRH-L-R | 0,24 | 1,27 | 3,54 | 7,50 | 13,58 |

Tabelle 17: *Jährliche Kosten für die Belüftung bei der technischen Trocknung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in Euro bei 500 Volllaststunden im Jahr und einem Strompreis von 0,25 €/kWh bei variierenden Strömungsgeschwindigkeiten in m/s, ausgehend von der in Tabelle 16 berechneten benötigten Gebläseleistung*

| Brennstoffe | Strömungsgeschwindigkeit in m/s | | | | |
|-------------|---------------------------------|-----|-----|-------|-------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| PA-E | 10 | 60 | 177 | 390 | 726 |
| PA-R | 19 | 104 | 294 | 628 | 1.149 |
| ERH-F-E | 11 | 63 | 183 | 399 | 738 |
| ERH-F-R | 18 | 95 | 270 | 579 | 1.061 |
| ERH-B-E | 8 | 49 | 150 | 335 | 631 |
| ERH-B-R | 19 | 106 | 304 | 656 | 1.205 |
| WRH-N-E | 19 | 105 | 302 | 656 | 1.209 |
| WRH-N-R | 30 | 157 | 436 | 923 | 1.674 |
| WRH-L-E | 44 | 214 | 566 | 1.156 | 2.039 |
| WRH-L-R | 30 | 159 | 443 | 937 | 1.698 |

3.2.5 Förderbarkeit der Brennstoffe

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die Förderbarkeit der untersuchten Brennstoffe in konventionellen Förderscheiben von Hackschnitzelkesseln eingegangen. Im Anschluss daran werden die Auswirkungen der Förderung auf die physikalische Brennstoffqualität betrachtet, wobei auch die mögliche Nachzerkleinerung in den Förderschnecken oder durch die Zellradschleuse quantifiziert wird.

3.2.5.1 Förderbarkeit

Die Förderleistung der Brennstoffe, gemessen am Förderungsprüfstand des TFZ (siehe Abschnitt 3.1.8), unterschied sich teils deutlich zwischen den einzelnen Schüttgütern. Im Folgenden werden die Ergebnisse zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit auf wasserfreier Bezugsbasis angegeben. In Abbildung 45 sind die kumulierten Fördermengen in den Versuchen über die Förderdauer dargestellt.

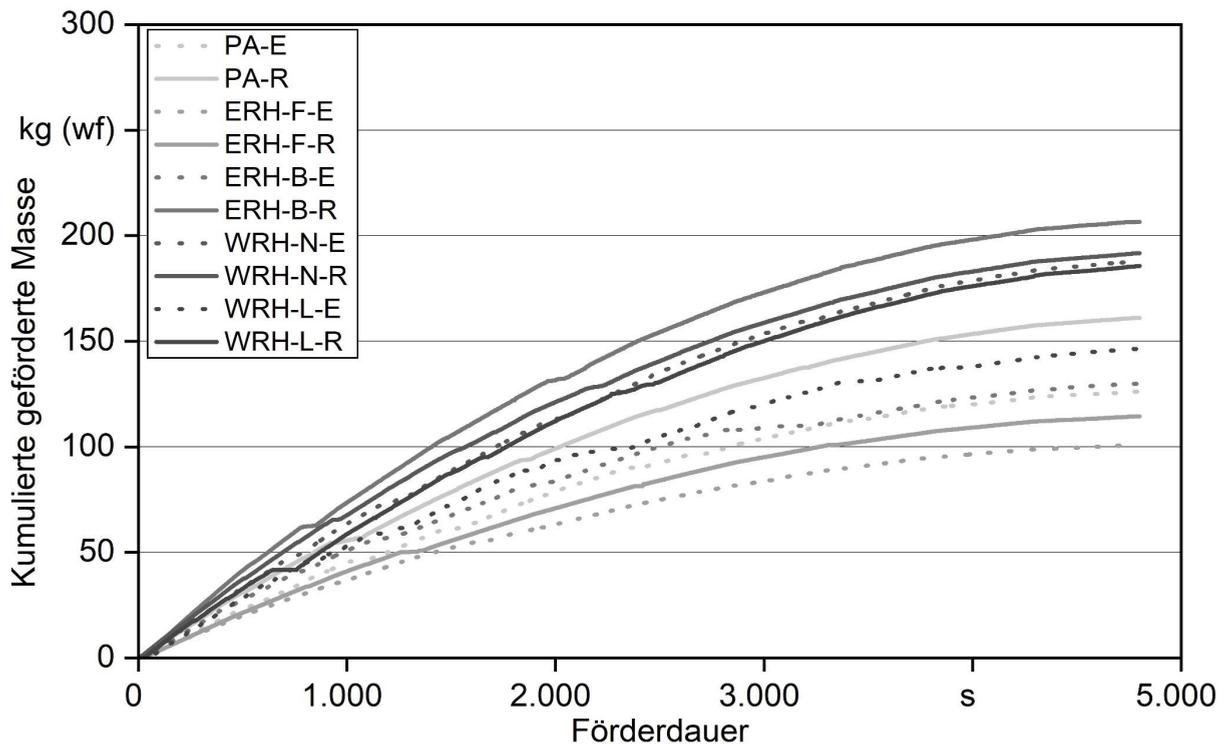


Abbildung 45: Kumulierte geförderte Masse (wasserfreie Bezugsbasis) der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 im Förderungsprüfstand des TFZ über den gesamten Zeitraum eines Förderzyklus von 100 % bis 10 % der maximalen Förderleistung ($n = 1$)

Die Massenströme sanken über die Versuchsdauer aufgrund der sich automatisch reduzierenden, voreingestellten Förderleistung. Die Kurven stiegen zu Beginn der Versuche

bei 100 % Förderleistung steil an und flachten bis zur letzten Förderrate von 10 % zunehmend ab. Es zeigte sich, dass für die Effits in allen Fällen eine geringere Masse bei gleicher Zeiteinheit gefördert wurde als für die Referenzbrennstoffe.

In Abbildung 46 sind beispielhaft die Förderraten für die Leistungseinstellungen 50 % und 100 % dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Effits in fast allen Fällen um 6 bis 42 % geringere Förderraten als die dazugehörigen Referenzbrennstoffe erzielten. Die höchsten Förderraten wurden bei 100 % Förderleistung gemessen. Der Referenzbrennstoff aus ERH-B erreichte Förderraten bis zu 300 kg/h (wf). Die geringste Förderrate bei voller Leistung zeigten die Effits aus ERH-F mit 145 kg/h (wf). Analog zu den Förderraten bei 100 % Leistung zeigten sich bei einer Förderleistung von 50 % ähnliche Relationen zwischen den Effits und den Referenzbrennstoffen. Nur bei WRH-N wurde eine um 3 % geringfügig niedrigere Förderrate als bei den Effits festgestellt. Der Unterschied betrug jedoch lediglich 5 kg/h (wf).

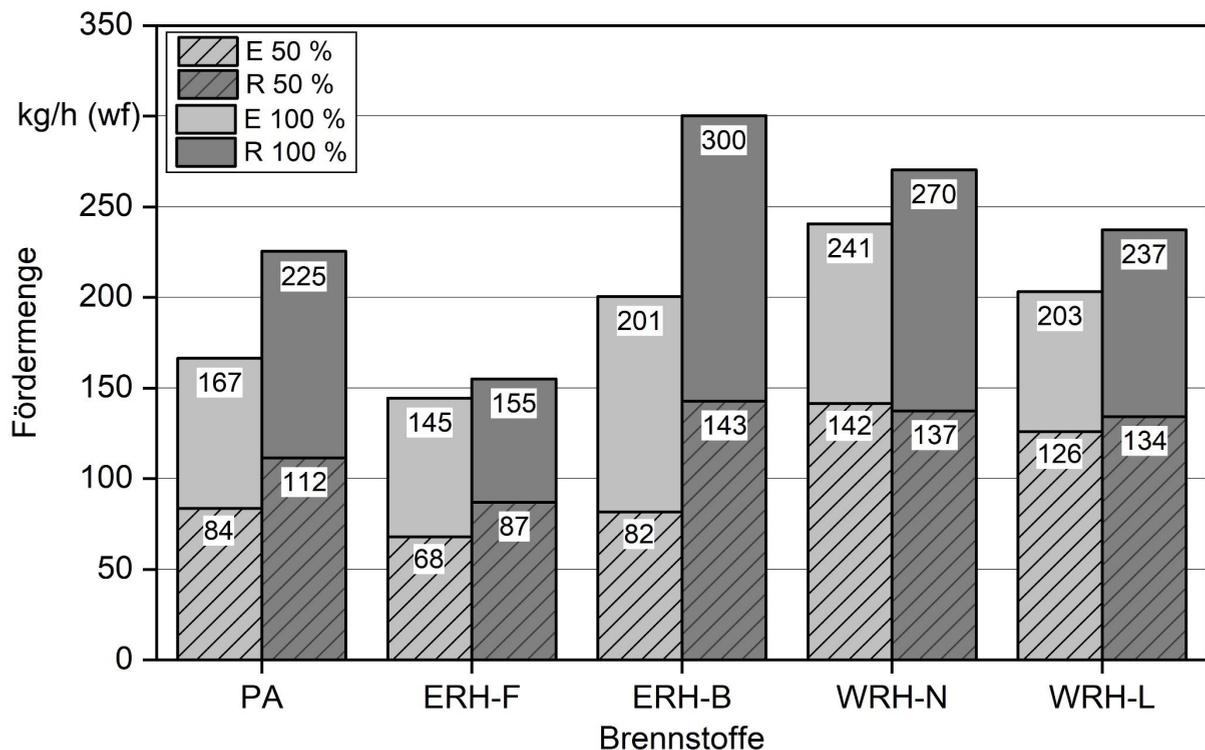


Abbildung 46: Fördermengen in kg/h (wasserfreie Bezugsbasis) der jeweiligen Brennstoffe aus den Versuchen 2019 für Förderraten von 100 % und 50 % der maximalen Förderleistung ($n = 1$)

Hinsichtlich der geförderten Masse lagen die Effits somit fast immer unter den Referenzbrennstoffen. Dies wird auf die geringere Schüttdichte, den hohen Anteil grober Partikel und den geringen Feinanteil der Effits im Vergleich zur Referenz zurückgeführt. Hierdurch entsteht ein höherer Anteil freier Luftzwischenräume in der Förderschnecke. Vor allem die sehr großen Partikeldurchmesser der Effits sollten sich negativ auf die Förderleistung in

dem hier dargestellten Versuchsaufbau auswirken, da diese Holzstücke teilweise nicht direkt in den 100 mm großen Durchmesser der Förderschnecke passen und somit zuerst am Boden des Austragsbunkers durch die Schnecke mechanisch nachzerkleinert werden müssen.

Trotz ihrer groben Partikelstruktur zeigten die Effits keine mechanischen Probleme in den hier dargestellten Versuchen. Beispielsweise kam es nicht zur Verstopfung der Förderschnecken. Auch bei den Feuerungsversuchen an den Prüfständen des TFZ und der HFR (siehe Abschnitt 3.2.7) zeigte sich kein negativer Effekt auf die Brennstoffförderung und selbst der verringerte Massenstrom der Effits stellte kein Hindernis für die Verbrennung dar, da dieser über den Brennstoffbedarf der Feuerung automatisch angepasst wird. Der maximal mögliche Massenstrom der verwendeten Austragung überschreitet die maximal benötigte Brennstoffzufuhr der Feuerungen deutlich. Eine direkte Aufnahme der Förderleistung erfolgte im Rahmen der Feuerungsversuche jedoch nicht.

Eine mögliche Herausforderung bei der Verwendung grobkörniger Brennstoffe in kleinen Austragsbunkern ist die Neigung der Materialien zur Brückenbildung. Hierunter versteht man den Effekt, dass ein Brennstoff nicht in die Zuführung rieseln kann, falls er sich im Bunker verhakt und es so zu Hohlräumen über der Austragsöffnung kommt [10] [43] [48] [60]. Eine mögliche Analyseverfahren zur Bestimmung der Brückenbildungsneigung biogener Festbrennstoffe wurde von HINTERREITER et al. (2012) [43] beschrieben. Dabei werden Holzhackschnitzel in einen 1,5 m³ großen Bunker gefüllt. Dieser besitzt einen verstellbaren Boden, der stufenlos geöffnet werden kann. Die Öffnungsweite, bei der die Brücke einstürzt, wird aufgezeichnet. Je größer die Öffnung ist, desto stärker ist die Neigung der Brennstoffe zur Brückenbildung. Versuche hierzu wurden in der hier dargestellten Studie nicht durchgeführt, die Brückenbildungsneigung sollte aber bei zukünftigen Anwendungen von Effits-Brennstoffen berücksichtigt werden.

Neben den Förderraten der Brennstoffe wurden verschiedene Leistungs- und Energiedaten des Förderungsprüfstands aufgezeichnet. In Tabelle 18 sind neben der absolut geförderten Masse die mittlere elektrische Leistung der Anlagentechnik, die Anzahl der Überschreitungen der Nennlast, die maximale elektrische Leistung und die insgesamt aufgewendete elektrische Energie aufgeführt.

Bei der mittleren elektrischen Leistung wurden Werte zwischen 205 W (WRH-L-E) und 282 W (ERH-B) gemessen. Die höchsten Werte wurden allgemein beim Energierundholz erreicht. Bis auf WRH-L-E lag die mittlere elektrische Leistung des Motors bei den Effits stets über der Referenz (Pa: +13 %; ERH-F: +11 %; ERH-B: +4,2 %; WRH-N: +2,1 %; WRH-L: -15 %). Auffällig war, dass vor allem der harte Brennstoff aus ERH-B bei den Effits den elektrischen Antrieb über eine Dauer von 415 Sekunden stärker belastete, als es der Nennleistung von 550 W entspricht. Dies entspricht einem Anteil von 8,6 % über die gesamte Versuchsdauer. Auch die Effits aus ERH-F und die Referenz aus ERH-B erreichten mit 315 s (6,5 % der Gesamtdauer) beziehungsweise 242 s (5 %) sehr hohe Werte. Brennstoffe, die keine oder kaum erhöhte Belastungen für den Motor darstellten, waren PA-R, ERH-F-R, WRH-N-E, WRH-N-R und WRH-L-E.

Tabelle 18: *Leistungs- und Energiedaten der Förderversuche mit den Brennstoffen aus den Versuchen 2019*

| Brennstoffe | Geförderte Masse | Mittlere elektrische Leistung | Überschreitungen der elektrischen Nennlast | Maximale elektrische Leistung | Elektrische Energie |
|-------------|------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|---------------------|
| | in kg (wf) | in W | in s | in W | in Wh |
| PA-E | 126 | 246 | 22 | 595 | 334 |
| PA-R | 161 | 214 | 0 | 455 | 294 |
| ERH-F-E | 101 | 283 | 315 | 844 | 362 |
| ERH-F-R | 114 | 252 | 4 | 595 | 342 |
| ERH-B-E | 130 | 283 | 415 | 878 | 370 |
| ERH-B-R | 206 | 271 | 242 | 812 | 360 |
| WRH-N-E | 188 | 237 | 13 | 680 | 322 |
| WRH-N-R | 192 | 232 | 1 | 560 | 316 |
| WRH-L-E | 147 | 206 | 8 | 743 | 281 |
| WRH-L-R | 186 | 237 | 161 | 716 | 296 |

Die maximale elektrische Leistung sowie die elektrische Energie folgten denselben Trends wie die Überschreitungen der Nennlast. Wiederum wiesen die Effits aus ERH-B mit 878 W die höchste maximale Leistungsaufnahme und mit 370 Wh den höchsten Energiebedarf auf. PA-R zeigte mit 455 W die geringste maximalen Leistungsaufnahme sowie mit 294 Wh den geringsten Energiebedarf.

Der Grund für die allgemein höheren Anforderungen der Effits an die Austragstechnik ist in der gröberen Struktur des Brennstoffs zu sehen, der in der Förderschnecke in den meisten Fällen erst noch weiter aufgebrochen werden musste, was dem Schneckenmotor kurzzeitig mehr Leistung abverlangte. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass umso weniger Energie durchschnittlich bei der Förderung verbraucht und umso weniger Überschreitungen der Nennlast festgestellt wurden, je weicher ein Brennstoff ist.

3.2.5.2 Veränderung der Brennstoffqualität durch die Förderung

Die Förderung durch den Bunker, die Zellradschleuse und den Einschub in den Kessel hatte Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform der Brennstoffe. In allen Fällen wurde eine Nachzerkleinerung der Brennstoffe (sowohl Effits als auch Referenz) festgestellt. Die Analysen erfolgten gravimetrisch mittels Siebanalyseverfahren, aber auch fotooptisch mittels Bildanalyse.

Der Einfluss der Förderung auf die physikalischen Eigenschaften der Holzhackschnitzel ist vor allem an der starken Abnahme der Partikelfraktion > 31,5 mm zu erkennen (Abbildung 47). Besonders deutlich zeigt sich dies für die Effits-Brennstoffe, wohingegen in den

Referenzhackschnitzeln der Anteil der Fraktion $> 31,5$ mm bereits vor der Förderung sehr niedrig war. Die Fraktion 45–63 mm trat nur noch bei einigen Brennstoffen auf. Der Fraktion > 63 mm war, abgesehen von einer einzelnen Überlänge bei PA-E, nach der Förderung kein Material mehr zuzuordnen. Aus den Daten lässt sich schließen, dass die groben Bestandteile der Effits bei der Förderung leicht aufbrechen und somit als kleinere Partikel in der Brennkammer der Feuerung vorliegen.

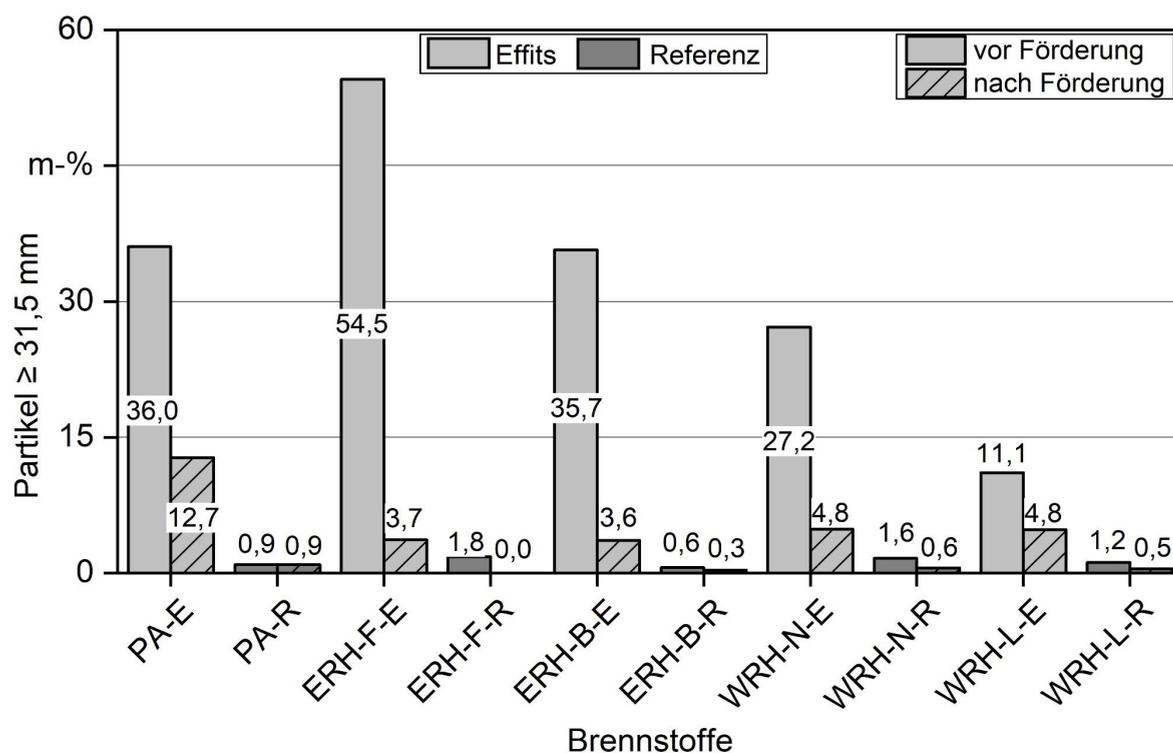


Abbildung 47: Massenanteil der Partikel $> 31,5$ mm, die vor und nach den Förderungsversuchen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 enthalten sind ($n = 1$)

Der Massenanteil der Partikel ≤ 8 mm (Abbildung 48) erhöhte sich bei allen Brennstoffen mit Ausnahme von ERH-F. Eine Tendenz, ob die Effits oder die Referenzbrennstoffe einer stärkeren Nachzerkleinerung in den kleinen Partikelfractionen unterliegen, ist aus den Daten nicht erkennbar.

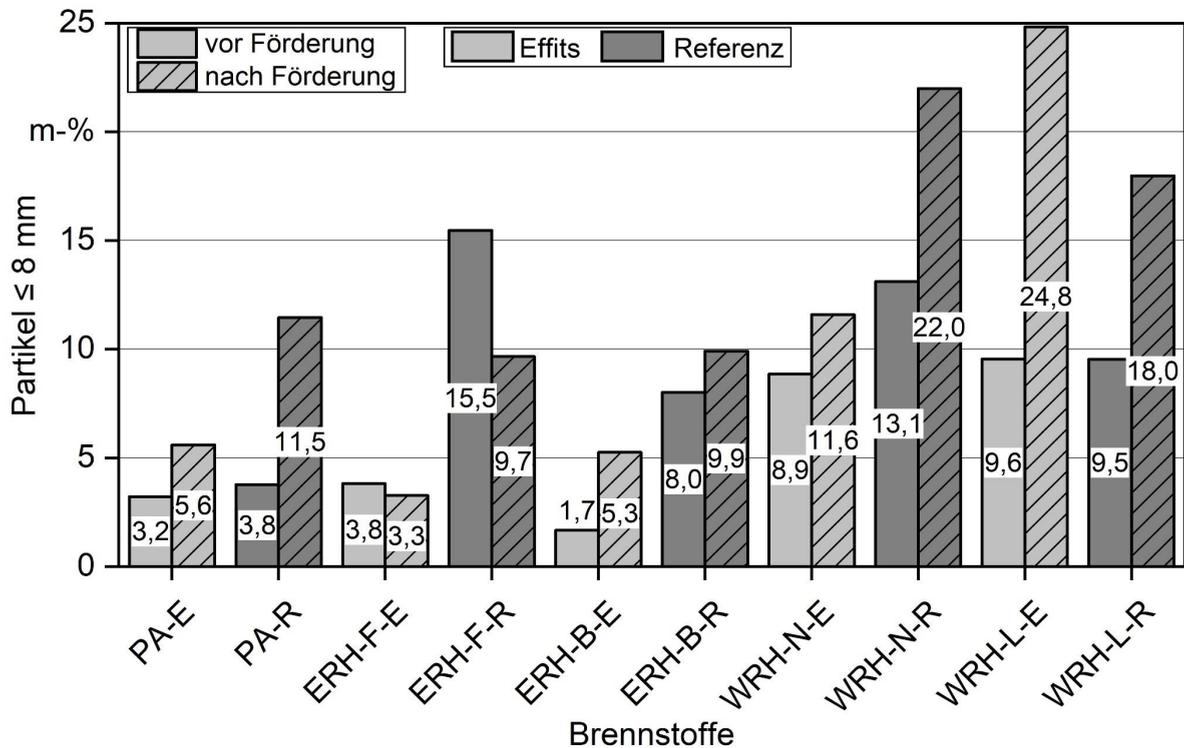


Abbildung 48: Massenanteil der Partikel ≤ 8 mm, die vor und nach den Förderungsversuchen in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 enthalten sind ($n = 1$)

Die Betrachtung der gesamten kumulierten Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 49 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass mechanische Einwirkungen auf den Brennstoff zu einer starken Nachzerkleinerung der Materialien führten. Die Partikelgrößenverteilung der Effits entsprach nach der Förderung häufig dem Referenzbrennstoff vor der Förderung.

Analog zur Siebanalyse zeigen auch die Ergebnisse der Bildanalyse eine deutliche Nachzerkleinerung der Brennstoffe durch die Förderung. Diese offenbart sich vor allem in der Veränderung der Partikelform, während sich die Kornformfaktoren nur geringfügig und ohne klare Tendenzen änderten (Abbildung 50). Die Länge-zu-Breite-Verhältnisse nahmen in allen Brennstoffen (mit Ausnahme von ERH-F-R) nach der Förderung zu (Abbildung 51).

Da die absolute Partikellänge der Brennstoffe sich nicht stark veränderte (nicht gezeigt), lässt sich schließen, dass die Partikel größtenteils in Längsrichtung aufbrachen, wodurch nicht die Länge, sondern die Breite abnahm. Da bei der gravimetrischen Analyse mittels Siebung die Klassen vornehmlich nach der Breite und weniger nach der Länge abgetrennt werden, kommt es so auch zu der gemessenen Verschiebung der Partikelgrößenverteilung. Da die Veränderung des Länge-zu-Breite-Verhältnisses bei den Effits über die Förderversuche deutlicher ausgeprägt war als bei den Referenzbrennstoffen, ist davon auszugehen, dass sich die bei der Herstellung ohnehin schon vorgebrochenen Effits leichter nachzerkleinern ließen.

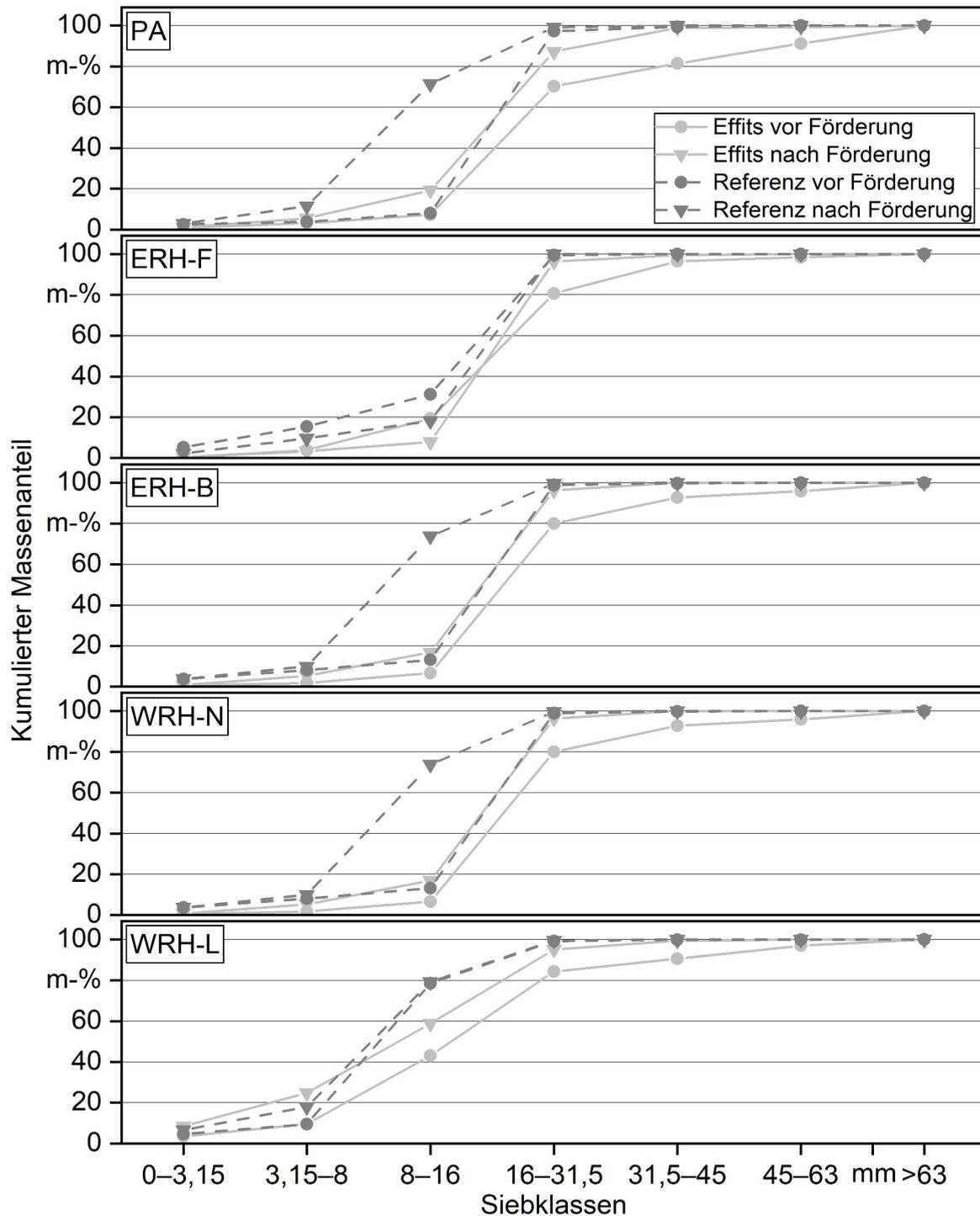


Abbildung 49: Kumulierte Massenanteile der Partikelgrößenverteilung in den Brennstoffen aus den Versuchen 2019 vor und nach der Förderung (n = 1)

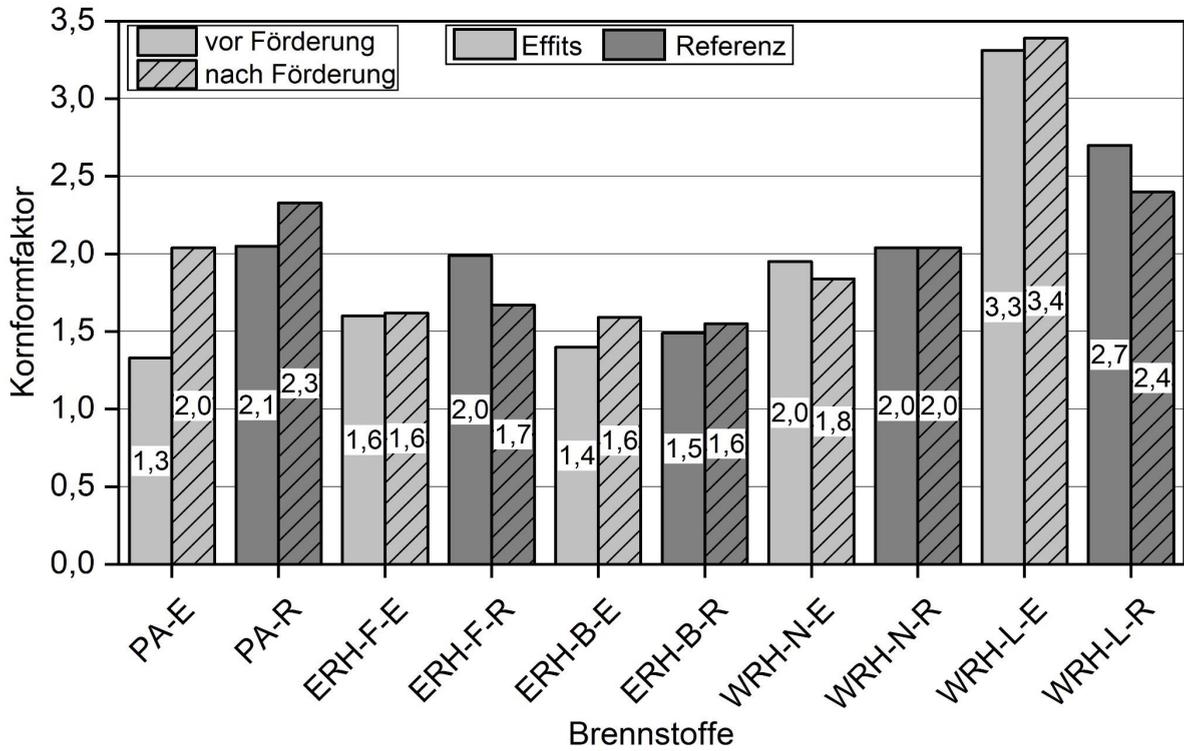


Abbildung 50: Kornformfaktoren der jeweiligen Brennstoffe vor und nach der Förderung, berechnet anhand von Daten der Bildanalyse (n = 1)

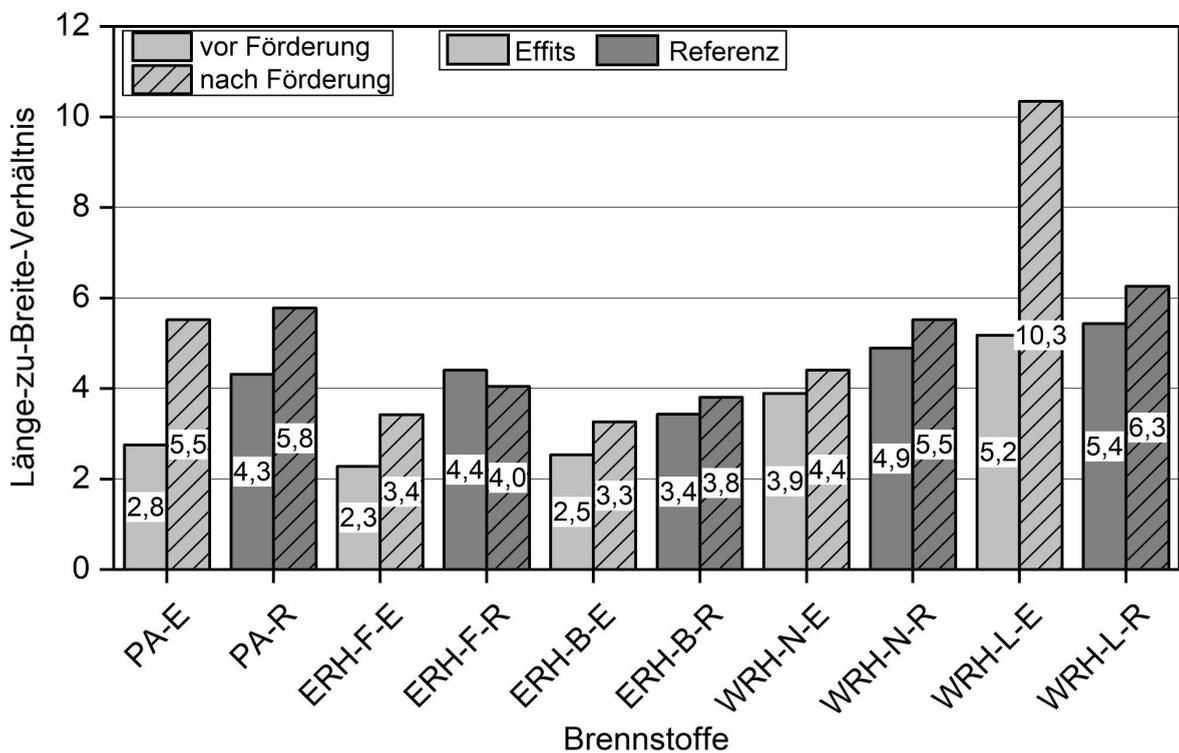


Abbildung 51: Länge-zu-Breite-Verhältnis der jeweiligen Brennstoffe vor und nach der Förderung, berechnet anhand von Daten der Bildanalyse (n = 1)

Sollte ein besonderes Augenmerk darauf liegen, die innovative Partikelstruktur zu erhalten, beispielsweise zur Optimierung des Verbrennungsverhaltens, ist eine möglichst schonende Brennstoffförderung zu empfehlen. Beispielsweise könnten hierfür Förderschnecken mit größeren Durchmessern oder Schubbodeneinrichtungen infrage kommen. Trotzdem ist davon auszugehen, dass es beim Einsatz von Effits unabhängig von der Förder-technik zu einer mehr oder weniger starken Nachzerkleinerung der Brennstoffe kommt.

3.2.6 Beurteilung der Brennstoffe nach DIN EN ISO 17225-4 und nach ENplus

Die am TFZ erzeugten Brennstoffe wurden hinsichtlich ihrer Brennstoffparameter verschieden klassifiziert. Die Zuordnung erfolgte einerseits hinsichtlich der DIN EN ISO 17225-4:2021 [28] in eine der Klassen A1, A2, B1 oder B2. Zudem erfolgte eine Einsortierung nach den Anforderungen der ENplus-Zertifizierung für Holzhackschnitzeln [29]. In Tabelle 19 bis Tabelle 21 sind die Spezifikationen beider Systeme aufgeführt.

Tabelle 19: Partikelgröße klassifizierter Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2021 (Auszug)

| Klasse | Hauptanteil (≥ 60 m-%) in mm | Feinanteil ($< 3,15$ mm) in m-% | Grobanteil in m-% (Länge der Partikel in mm) | Maximale Partikellänge in mm |
|--------|---------------------------------------|---|--|---------------------------------|
| P16s | 3,15–16 mm | ≤ 15 m-% | ≤ 6 m-% ($> 31,5$ mm) | ≤ 45 mm |
| P31s | 3,15–31,5 mm | ≤ 10 m-% | ≤ 6 m-% (> 45 mm) | ≤ 120 mm |
| P45s | 3,15–45 mm | ≤ 10 m-% | ≤ 10 m-% (> 63 mm) | ≤ 200 mm |
| P16 | 3,15–16 mm | anhand der F- Klassen zu de- finieren | ≤ 6 m-% ($> 31,5$ mm) | anzugebender Wert |
| P31 | 3,15–31,5 mm | | ≤ 6 m-% (> 45 mm) | |
| P45 | 3,15–45 mm | | ≤ 10 m-% (> 63 mm) | |

Hauptziel der beiden Systeme ist die Definition hochwertiger Brennstoffklassen für die Nutzung von Holzhackschnitzeln in kleinen bis mittleren Feuerungsanlagen. Hierfür werden neben der Herkunft des Ausgangsmaterials unter anderem die Partikelgrößenverteilung, der Wassergehalt, der Aschegehalt, die Schüttdichte und ausgewählte chemische Inhaltsstoffe betrachtet.

Tabelle 20: Spezifikation klassifizierter Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2022 (wf = wasserfreie Bezugsbasis, ar = im Anlieferungszustand; Auszug)

| 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 Waldrestholz 1.2.1 Chemisch un- behandelte Holz- rückstände | 1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.2.1 Chemisch un- behandelte Holz- rückstände | 1.1 Wald- und Plantagenholz so- wie anderes natur- belassenes Holz 1.2.1 Chemisch un- behandelte Holz- rückstände | 1.1 Wald- und Plantagenholz so- wie anderes natur- belassenes Holz 1.2 Industrierest- holz 1.3.1 Chemisch un- behandeltes Ge- brauchtholz |
| Partikelgröße <i>P</i> (mm) | Siehe DIN EN ISO 17225-4 „Partikelgrößenklassen“ (Tabelle 19) | | | |
| Wassergehalt <i>M</i> (m-%) | ≤ 25 Werte unter 10 m-% sind anzu- geben | > 25 ≤ 55 anzugebender Wertebereich | ≤ 35 Werte unter 10 m-% sind anzu- geben | > 15 ≤ 55 anzugebender Wertebereich |
| Aschegehalt <i>A</i> (m-%, wf) | A1.5 ≤ 1,5 | A1.5 ≤ 1,5 | A3.0 ≤ 3,0 | |
| Schüttdichte <i>BD</i> (kg m ⁻³ , ar) | BD150 ≤ 150 BD200 ≤ 200 BD250 ≤ 250 | BD150 ≤ 150 BD200 ≤ 200 BD250 ≤ 250 BD300 ≤ 300 | Kleinster Wert ist anzugeben | |
| Heizwert <i>Q</i> (MJ kg ⁻¹ oder kWh kg ⁻¹ , ar) | Kleinster Wert ist anzugeben | | Kleinster Wert ist anzugeben | |

Zu beachten ist, dass die Zertifizierung nach ENplus bei den Partikelgrößenklassen noch Bezug auf die veraltete DIN EN ISO 17225-4 aus dem Jahr 2014 nimmt. Dadurch ergeben sich bei den Partikelklassen, die für die Einsortierung nach ENplus herangezogen werden, andere Klassen als bei der Beurteilung nach DIN EN ISO 17225-4:2021.

Tabelle 21: Anforderungen der ENplus-Zertifizierung an die Eigenschaften von Holzhackschnitzeln (die Partikelgrößenklassen werden nach DIN EN ISO 17225-4:2014 bestimmt)

| Parameter | ENplus A1 | ENplus A2 | ENplus B |
|--------------------------|---|--------------------------|--|
| Rohmaterialien | 1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände | | 1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes naturbelassenes Holz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände |
| Wassergehalt (m-%) | ≥ 8 bis ≤ 25 | ≤ 35 | Ist anzugeben |
| Aschegehalt (m-%) | ≤ 1,0 | ≤ 1,5 | ≤ 3,0 |
| Heizwert (kWh/kg) | Ist anzugeben | | |
| Partikelgröße | P31S / P45S | | |
| Grobanteil (mm) | ≤ 6 in P31S ≤ 10 in P45S | | |
| Feinanteil <3,15mm (m-%) | ≤ 5 | ≤ 8 | ≤ 10 |
| Maximale Länge (mm) | 120 (P31S) 150 (P45S) | 150 (P31S) 200 (P45S) | 150 (P31S) 200 (P45S) |

In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die Holzhackschnitzel einerseits hinsichtlich der erreichbaren Klassen nach DIN EN ISO 17225-4:2021 sowie der ENplus-Zertifizierung eingeordnet. Die Wassergehalte, auf die in diesem Abschnitt Bezug genommen wird, wurden nach der technischen Trocknung gemessen. Für die Schüttdichte wird der Wert des Wassergehalts nach der Trocknung angegeben.

Fast alle im Versuchsjahr 2019 am TFZ erzeugten Hackschnitzelchargen konnten in eine der Klassifikationen nach DIN EN ISO 17225-4:2021 eingeordnet werden (Tabelle 22). PA-E sowie ERH-F-E wären mit Ausnahme der Partikelgröße der Klasse A1 zuzuordnen. Durch die nicht gegebene Partikelklasse erreichten sie jedoch keine Einordnung als A1, A2, B1 oder B2. ERH-B-R musste der Kategorie A2 zugeordnet werden, da dieser Brennstoff die maximale Schüttdichte von $250 \text{ kg m}^{-3} \text{ (ar)}$ um $1,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ (ar)}$ überschritt. Die beiden verbleibenden Effits-Brennstoffe ERH-B-E und WRH-N-E konnten A1 zugeordnet werden. Die beiden Referenzbrennstoffe aus PA und WRH-L wiesen zu hohe Aschegehalte auf, um in A1 oder A2 eingruppiert zu werden, weswegen hier eine Einordnung als B1 erfolgen musste.

Tabelle 22: Zuordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 in die Klassifikationen nach DIN EN ISO 17225-4:2021 (Grün: A1; Gelb: A2; Rot: B1; Grau für nicht klassifizierbare Brennstoffe)

| Brennstoff | Wassergehalt in m-% | Aschegehalt in m-% | Schüttdichte in kg m ⁻³ , ar | Partikelklasse | Einordnung |
|------------|------------------------|-----------------------|--|----------------|------------|
| PA-E | 22,8 | 1,48 | 176 | – | – |
| PA-R | 18,0 | 1,77 | 178 | P31s | B1 |
| ERH-F-E | 14,6 | 0,79 | 158 | – | – |
| ERH-F-R | 19,9 | 0,86 | 180 | P31s | A1 |
| ERH-B-E | 11,2 | 0,68 | 221 | P45s | A1 |
| ERH-B-R | 13,4 | 0,71 | 251 | P31s | A2 |
| WRH-N-E | 13,7 | 0,72 | 172 | P45s | A1 |
| WRH-N-R | 11,8 | 0,82 | 191 | P45s | A1 |
| WRH-L-E | 14,6 | 1,43 | 183 | P45s | A1 |
| WRH-L-R | 12,0 | 1,95 | 189 | P45s | B1 |

Tabelle 23: Zuordnung der Brennstoffe aus den Versuchen 2019 nach ENplus (Grün: A1; Gelb: A2; Rot: B; Grau für nicht klassifizierbare Brennstoffe)

| Brennstoff | Wassergehalt in m-% | Aschegehalt in m-% | Grobanteil in m-% | Feinanteil in m-% | Maximale Länge in mm | Partikel- klasse | Einordnung |
|------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|------------|
| PA-E | 22,8 | 1,48 | 12,3 | 0,9 | 135 | – | – |
| PA-R | 18,0 | 1,77 | 0,1 | 3,8 | 113 | P31s | B |
| ERH-F-E | 14,6 | 0,79 | 16,3 | 0,1 | 135 | – | – |
| ERH-F-R | 19,9 | 0,86 | 0,1 | 3,6 | 90 | P31s | A1 |
| ERH-B-E | 11,2 | 0,68 | 16,9 | 0,3 | 162 | – | – |
| ERH-B-R | 13,4 | 0,71 | 0,0 | 3,1 | 110 | P45s | A1 |
| WRH-N-E | 13,7 | 0,72 | 4,6 | 6,7 | 137 | – | – |
| WRH-N-R | 11,8 | 0,82 | 0,3 | 3,8 | 121 | P31s | A2 |
| WRH-L-E | 14,6 | 1,43 | 0,7 | 2,7 | 194 | – | – |
| WRH-L-R | 12,0 | 1,95 | 0,0 | 5,8 | 181 | P45s | B |

Die Zertifizierung für ENplus nimmt Bezug auf die inzwischen abgelöste DIN EN ISO 17225-4:2014. Nach den dort definierten Spezifikationen kann keine der Effits-Chargen eine Partikelgrößenklasse P45s oder kleiner erreichen (Tabelle 23). Folglich konnte keine der Effits-Chargen die Vorgaben nach ENplus erfüllen. Unter den Referenzbrennstoffen erreichen ERH-F und ERH-B die Anforderungen für A1, WRH-N A2 und PA sowie WRH-L die Klasse B.

3.2.7 Feuerungsversuche

Feuerungsversuche wurden mit den auf einen Wassergehalt von ca. 15 m-% technisch getrockneten Brennstoffen an den Feuerungsprüfständen des TFZ und der HFR durchgeführt. Dabei wurden die gas- und partikelförmigen Emissionen sowie, im Fall des TFZ, der Wirkungsgrad der Anlagen gemessen. Am TFZ kam ein 20-kW-Kessel aus dem Jahr 2019 mit einem Stufenrost und einer seitlichen Brennstoffzufuhr zum Einsatz. An der HFR wurde ein 50-kW-Kessel mit seitlichem Einschub und Raupenbrenner verwendet. Beide Anlagen hatten bei der Typenprüfung den Nachweis erbracht, dass die Emissionsgrenzwerte der Stufe 2 nach 1. BImSchV [7] eingehalten werden.

Nach jedem Feuerungsversuch wurde der jeweilige Kessel komplett gereinigt, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen zu gewährleisten. Durch die Reinigung der Ascheaustragung und die damit verbundene Leerung der Ascheschnecke kann es jedoch je nach Feuerung zu geringfügigen Undichtigkeiten mit Falschlufzutritt zum Kessel kommen. Diese leichten Undichtigkeiten können eine Erhöhung der Emissionen zur Folge haben. Vor allem der Kessel, der am TFZ verwendet wurde, ist für den emissionsarmen Betrieb bei teilweise gefülltem Aschebehälter ausgelegt und wäre somit höchstwahrscheinlich imstande, noch geringere Emissionen zu erreichen, hätte man auf eine Reinigung der Ascheaustragung zwischen den Versuchen verzichtet.

CO-Emissionen. Die mittleren CO-Emissionen zeigten keine eindeutigen Trends zwischen den Brennstoffen aus dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker (Abbildung 52, Abbildung 53). Innerhalb der Brennstoffpaare unterschied sich lediglich WRH-L-E bei beiden Kesseln signifikant von dem entsprechenden Referenzbrennstoff ($p \leq 0,001$). Vielmehr zeigten sich Unterschiede zwischen den Rohmaterialien. So waren beispielsweise die CO-Emissionen von PA-E und WRH-L-E bei beiden Feuerungen signifikant höher als die von ERH-F-E, ERH-B-E und WRH-N-E.

Hohe CO-Emissionen deuten auf eine unvollständige Verbrennung hin [48]. Häufig ist hierfür ein zu hoher Wassergehalt die Ursache, der zu einer Abkühlung in der Brennkammer führt [64] [78]. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Brennstoffs und den CO-Emissionen bei der Verbrennung konnte für die Versuchsreihe des TFZ jedoch nicht bestätigt werden. Die dazugehörige lineare Regression ergab lediglich ein R^2 von 0,4 und somit keine gute Korrelation (nicht dargestellt). Dies war zu erwarten gewesen, da die Wassergehalte nur in einem sehr engen Bereich zwischen 10 m-% und 20 m-% lagen. Bei den Messungen der HFR wurde der Brennstoffwassergehalt nicht bestimmt, was eine Analyse dieses Zusammenhangs nicht erlaubt.

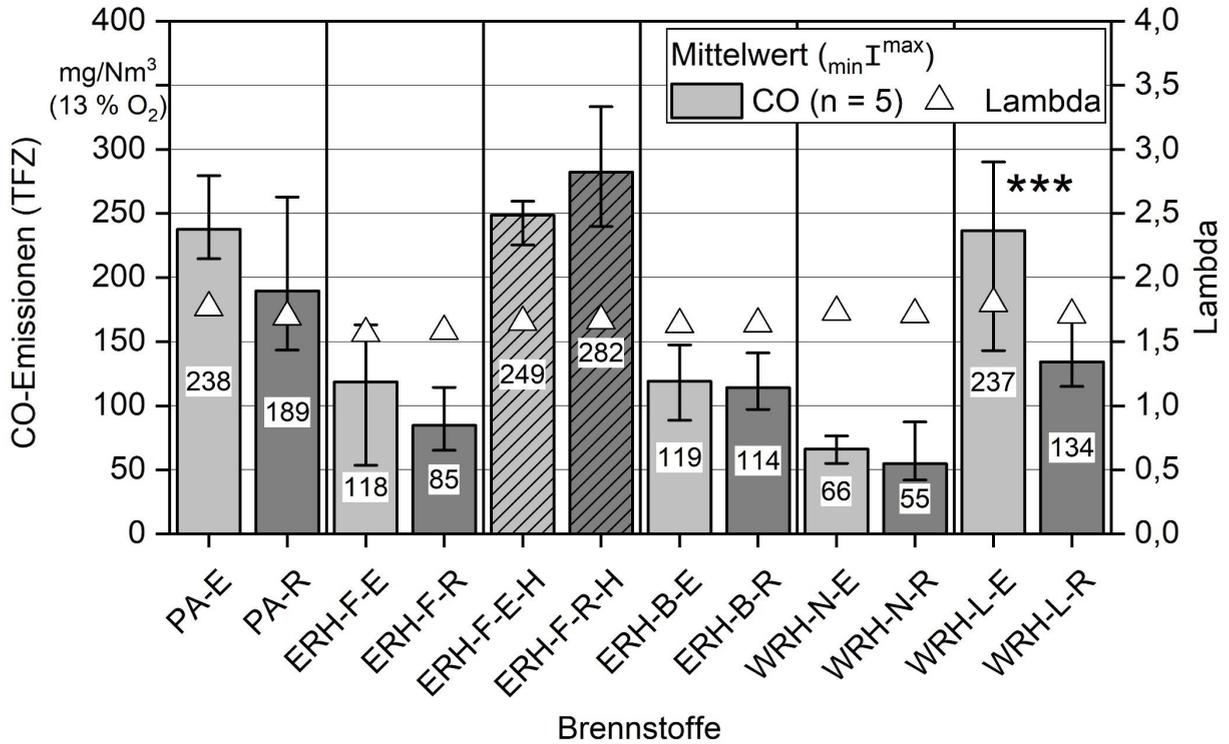


Abbildung 52: Mittlere CO-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an: *** $p \leq 0,001$; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

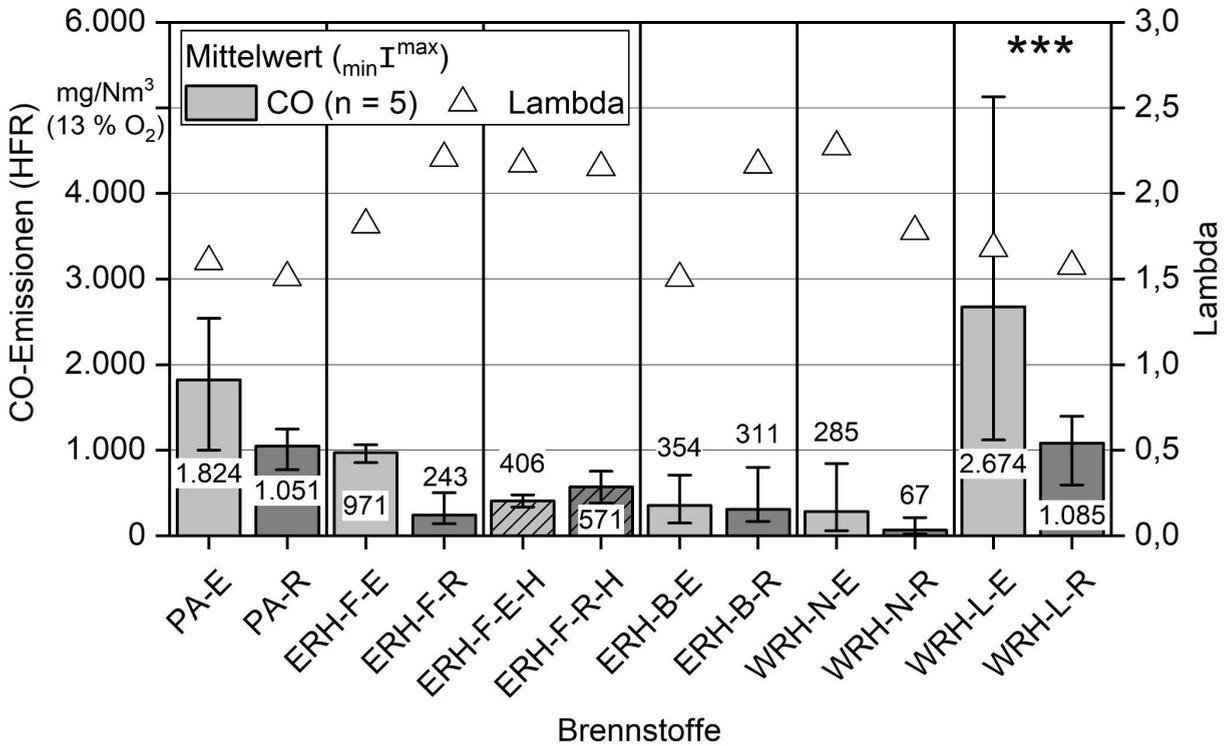


Abbildung 53: Mittlere CO-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** $p \leq 0,001$; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

Alle am TFZ gemessenen CO-Emissionen lagen unter den Stufe-2-Grenzwerten der 1. BImSchV von 400 mg/Nm^3 (bezogen auf 13 % O_2). Bei den Messungen der CO-Emissionen an der HFR traten teilweise um ein Vielfaches höhere CO-Emissionen auf. In sieben von zwölf Fällen wurde der für den Kessel geltende Stufe-2-Grenzwert überschritten. Der Grund hierfür könnte an einem unzureichenden O_2 -Angebot für eine vollständige Oxidation, aber auch an unzureichenden Verbrennungstemperaturen liegen. Der Lambda-Wert bei den Versuchen an der HFR lag zwischen 1,5 und 2,3 und schwankte daher deutlich stärker als bei den Messungen am TFZ (1,6 bis 1,8). Dies deutet auf sehr unterschiedliche Verbrennungsbedingungen im Kessel der HFR hin.

Org.-C-Emissionen. Die mittleren organischen Kohlenwasserstoffemissionen (org. C) lagen am TFZ allgemein in einem sehr niedrigen Bereich (Abbildung 54). Sie unterschritten in allen Fällen die „Raumheizungs-Jahresemissions-Grenzwerte“ der europäischen Ökodesign-Richtlinie (15 mg/Nm^3 bei 13 % O_2 , Wichtung aus 15 % Nennlast und 85 % Teillast). Zu beachten ist, dass für den Vergleich mit den Grenzwerten der Ökodesign-Richtlinie Ergebnisse aus Nennlast- und Teillastmessungen vorliegen müssen, denn die Messungen im Teillastbetrieb wurden nicht durchgeführt.

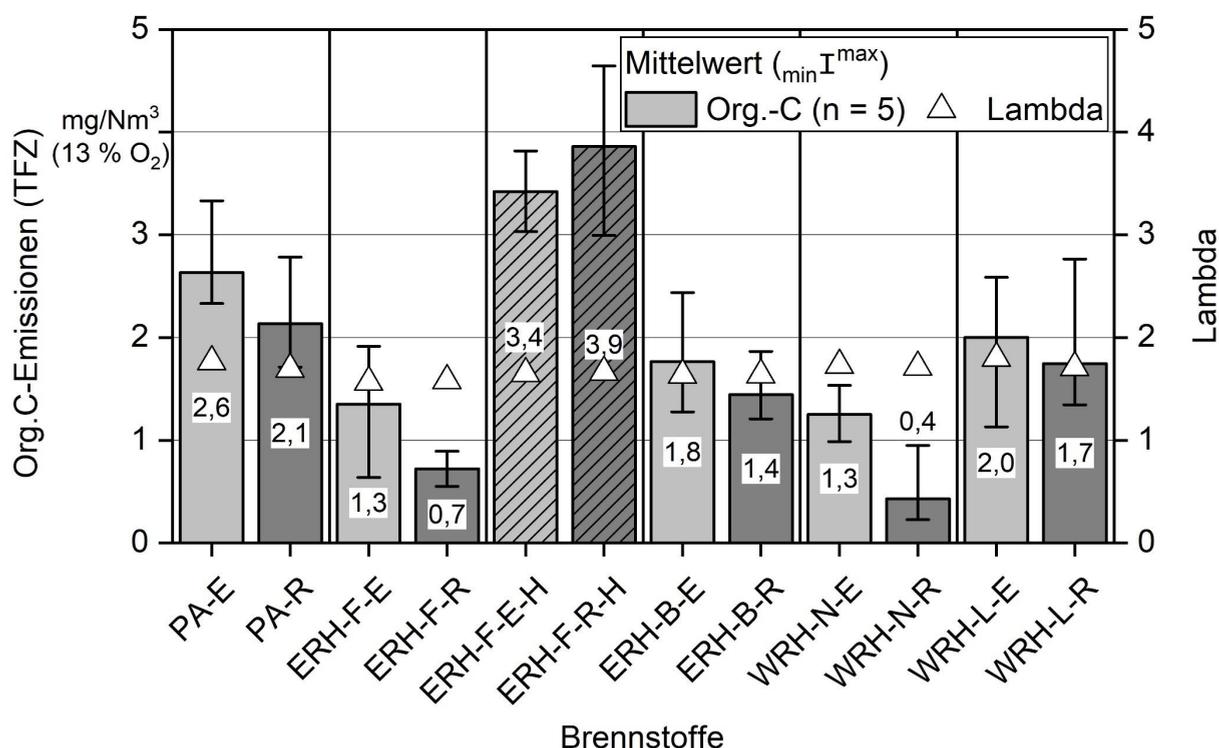


Abbildung 54: Mittlere Org.-C-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

Die höchsten Org.-C-Emissionen wiesen die beiden Materialien aus ERH-F nach der Lagerung in Haufwerken (H) auf (ERF-F-E-H: $3,4 \text{ mg/Nm}^3$, ERF-F-R-H: $3,9 \text{ mg/Nm}^3$). Die geringsten Emissionen traten bei WRH-N-R mit $0,4 \text{ mg/Nm}^3$ auf. In keinem Fall lagen sig-

nifikante Unterschiede zwischen Effits und Referenzmaterial vor. Es ist davon auszugehen, dass die Art und Weise der Zerkleinerung somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Org.-C-Emissionen in den hier untersuchten Feuerungen nimmt. Unterschiede zwischen den jeweiligen Rohmaterialien waren dagegen wie bei den CO-Emissionen teilweise signifikant. Am Feuerungsprüfstand der HFR wurden keine Org.-C-Emissionen gemessen.

Analog zu den CO-Emissionen treten hohe Org.-C-Emissionen bei einer unvollständigen Verbrennung, beispielsweise bei geringen Brennraumtemperaturen auf. Ein Auslöser hierfür können auch für org. C erhöhte Brennstoffwassergehalte sein [64] [78]. Eine lineare Regression zwischen den Wassergehalten der Brennstoffe und den Org.-C-Emissionen am TFZ zeigte mit $R^2 = 0,55$ einen etwas höheren Zusammenhang als bei den CO-Emissionen (Abbildung 55).

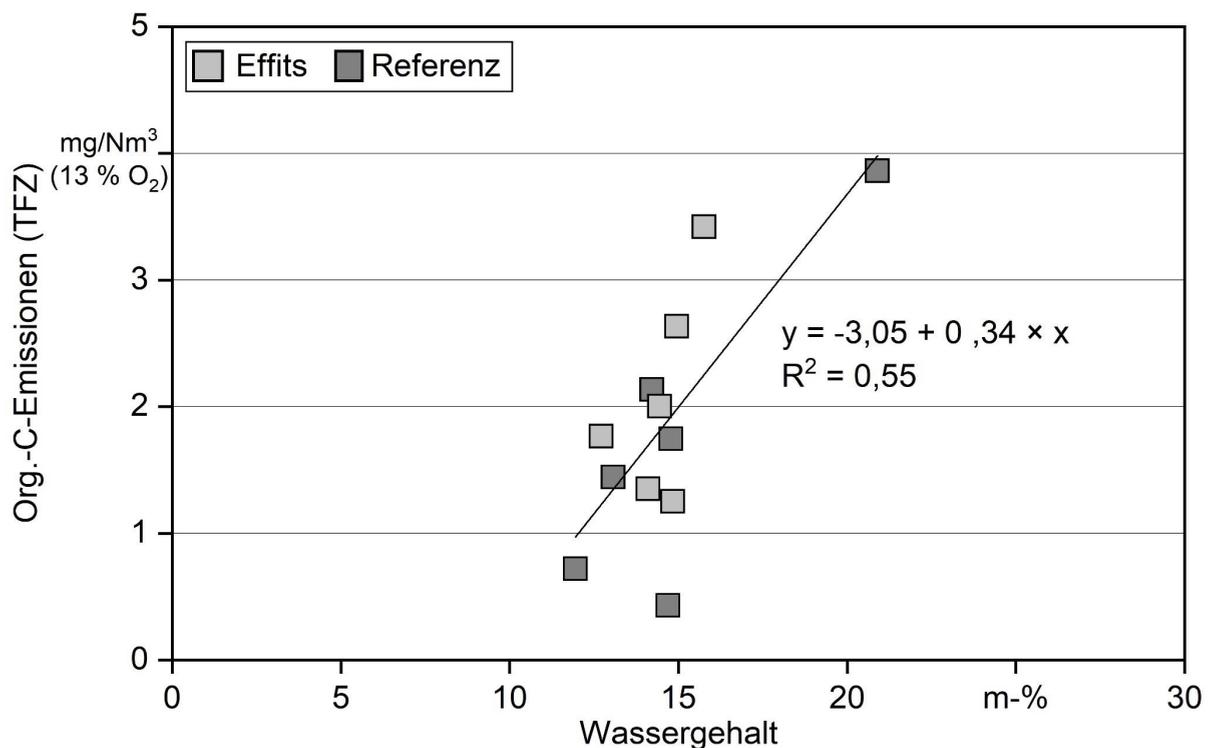


Abbildung 55: Lineare Regression zwischen den Org.-C-Emissionen und dem Wassergehalt der Brennstoffe am TFZ-Kessel ($n = 12$)

NO_x-Emissionen. Auch die mittleren NO_x-Emissionen zeigten keine eindeutigen Trends zwischen Effits und Referenz (Abbildung 56, Abbildung 57). Bei den Versuchen am TFZ verhielten sich die Brennstoffpaare aus Pappel ($p \leq 0,05$), ERH-F aus den Haufwerken ($p \leq 0,01$) und WRH-L ($p \leq 0,001$) signifikant unterschiedlich. Bei den Versuchen an der HFR unterschied sich lediglich ERH-F signifikant ($p \leq 0,001$) voneinander. Aufgrund der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Art der Zerkleinerung kaum Einfluss auf die NO_x-Emissionen hat, sondern vielmehr der Stickstoffgehalt im Brennstoff ausschlaggebend ist.

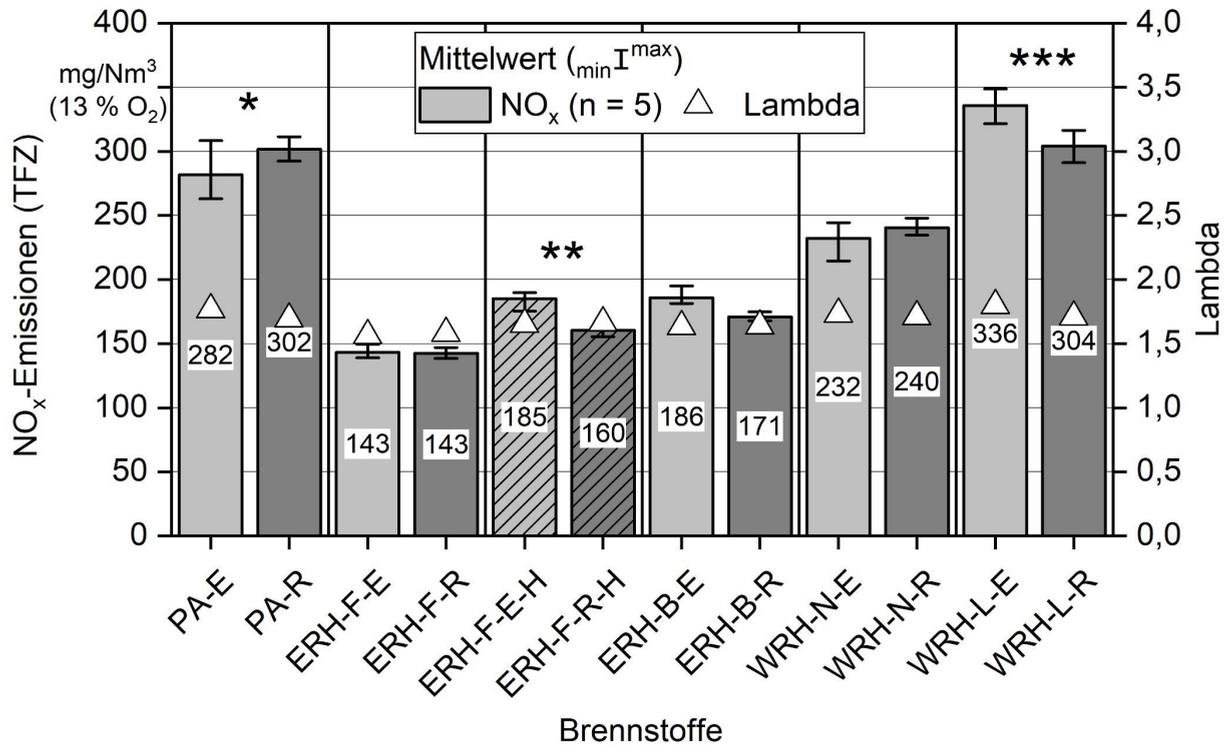


Abbildung 56: Mittlere NO_x-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

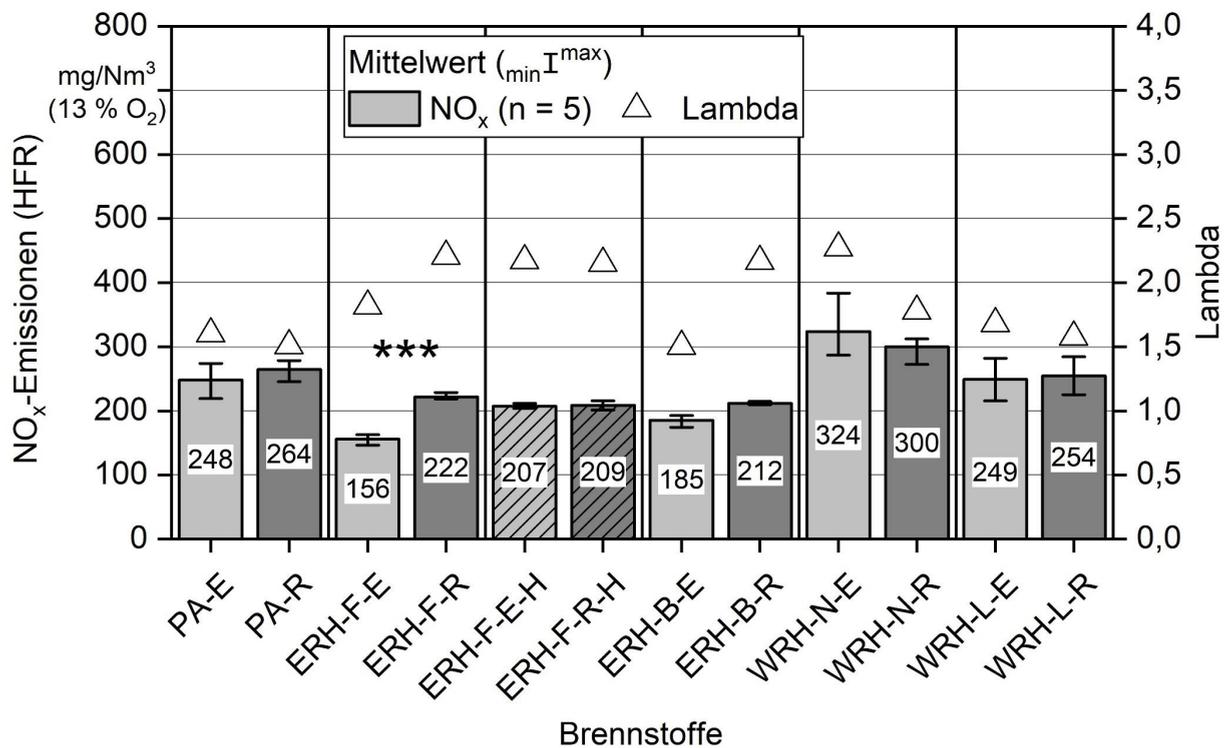


Abbildung 57: Mittlere NO_x-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** p ≤ 0,001; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

In den meisten Fällen unterscheiden sich die NO_x -Emissionen der Sortimente signifikant untereinander. Ausnahme bildeten lediglich die Brennstoffe aus Energierundholz. NO_x -Emissionen sind dabei stark vom Stickstoffgehalt in den Brennstoffen abhängig [48] [80], weshalb diese Unterschiede zu erwarten waren. In Abbildung 58 und Abbildung 59 ist der lineare Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt im Brennstoff und den dazugehörigen NO_x -Emissionen dargestellt.

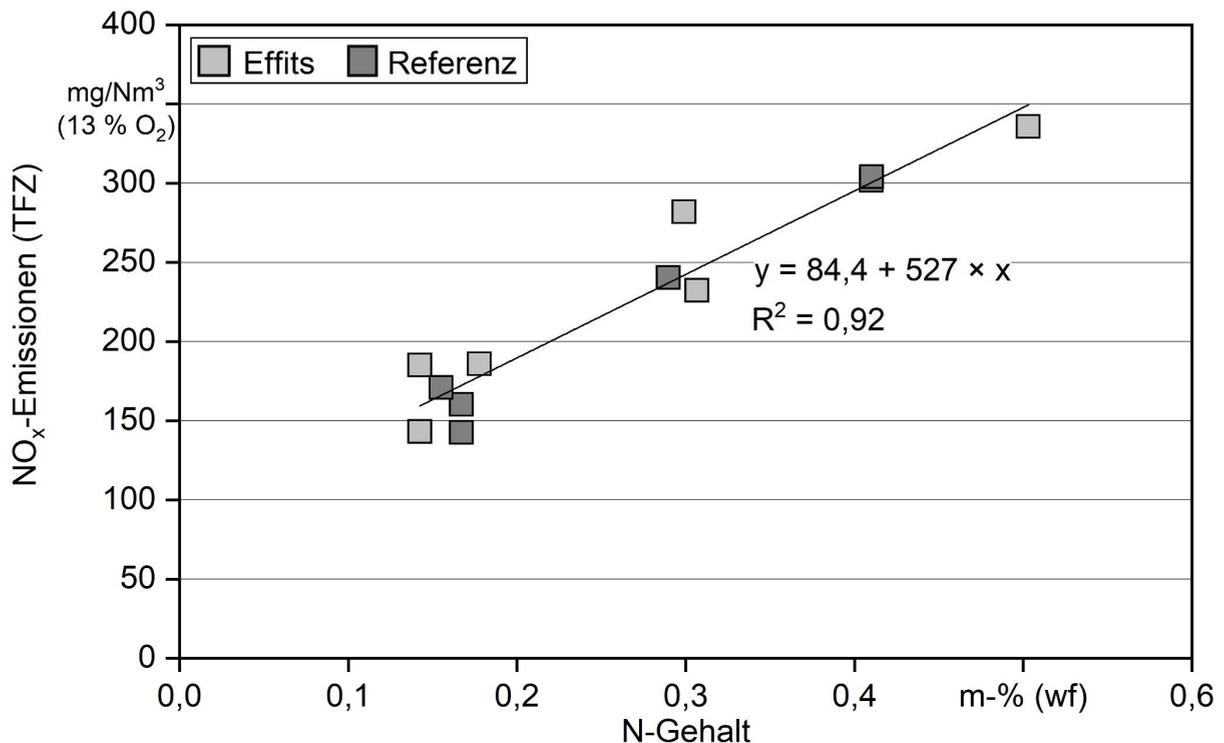


Abbildung 58: Lineare Regression zwischen den NO_x -Emissionen und dem Stickstoffgehalt der Brennstoffe bei den Versuchen am TFZ ($n = 12$)

Bei den Versuchen am TFZ zeigte sich ein stark linearer Zusammenhang ($R^2 = 0,92$). Der höhere Stickstoffgehalt bei den Pappelbrennstoffen und den beiden Waldrestholzsortimenten lässt sich u. a. durch die höheren Anteile an Rinde, kleinen Ästen und Nadeln bzw. Laub erklären. Bei den Versuchen an der HFR wurde dagegen mit $R^2 = 0,38$ kein eindeutiger Zusammenhang nachgewiesen. Möglicherweise haben hier die starken Schwankungen der CO-Emissionen und der Lambda-Werte einen wesentlichen Einfluss.

Aktuell existiert kein Grenzwert in der 1. BImSchV für NO_x -Emissionen. Ein entsprechender Wert aus der europäischen Ökodesign-Richtlinie bezieht sich, wie bereits bei org. C auf „Raumheizungs-Jahresemissionen“ und somit auf eine Mischung aus 15 % Nenn- und 85 % Teillast. Dieser liegt für Holzbrennstoffe bei 145 mg/Nm^3 (bei 13 % O_2). Er ist wie bei org. C auf die hier dargestellten Versuche mangels durchgeführter Teillastmessungen nicht unmittelbar anwendbar.

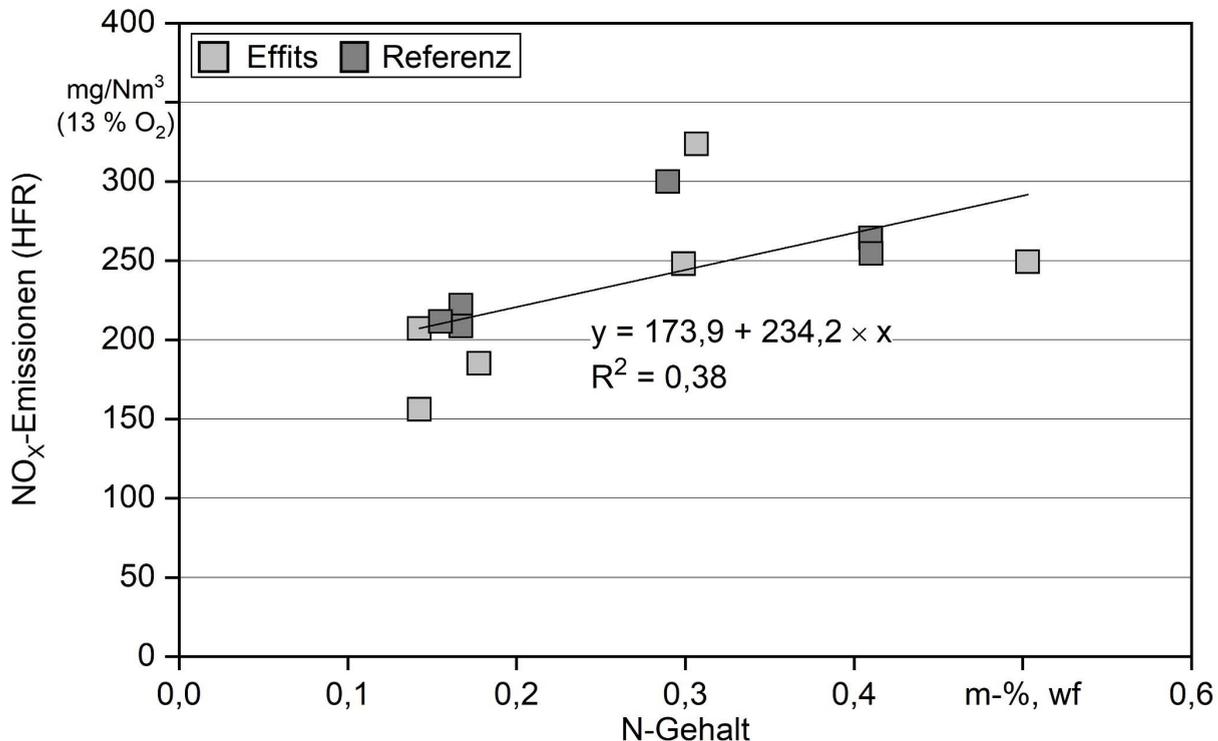


Abbildung 59: Lineare Regression zwischen den NO_x-Emissionen und dem Stickstoffgehalt der Brennstoffe bei den Versuchen an der HFR (n = 12)

Gesamtstaubemissionen. Die mittleren Gesamtstaubemissionen lagen in den meisten Fällen bei den Versuchen am TFZ unter dem Stufe-2-Grenzwert der 1. BImSchV von 20 mg/Nm³ (Abbildung 60) [7]. Lediglich die Brennstoffe aus Pappel und WRH-L überschritten den Grenzwert. Bei den Feuerungsversuchen an der HFR konnte keiner der getesteten Brennstoffe den für den Kessel geltenden Grenzwert einhalten (Abbildung 61).

Unter den Rohmaterialien traten sowohl bei den Versuchen an der HFR als auch bei den Versuchen am TFZ signifikante Unterschiede auf. So waren in beiden Kesseln die Emissionen bei der Verbrennung von Pappel bzw. WRH-L signifikant höher als bei den restlichen Brennstoffen. Im Fall der Pappel waren die Gesamtstaubemissionen im Kessel des TFZ annähernd dreimal so hoch wie die Werte der beiden Brennstoffe aus ERH-B.

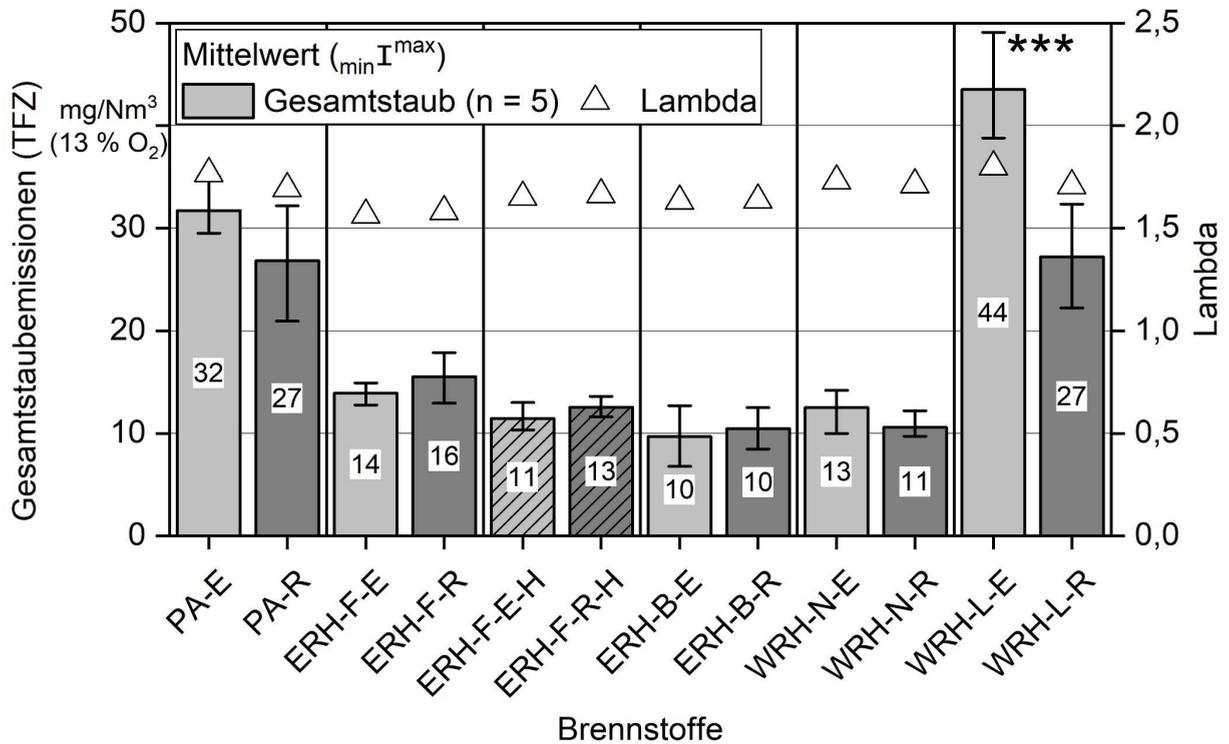


Abbildung 60: Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; *** $p \leq 0,001$; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

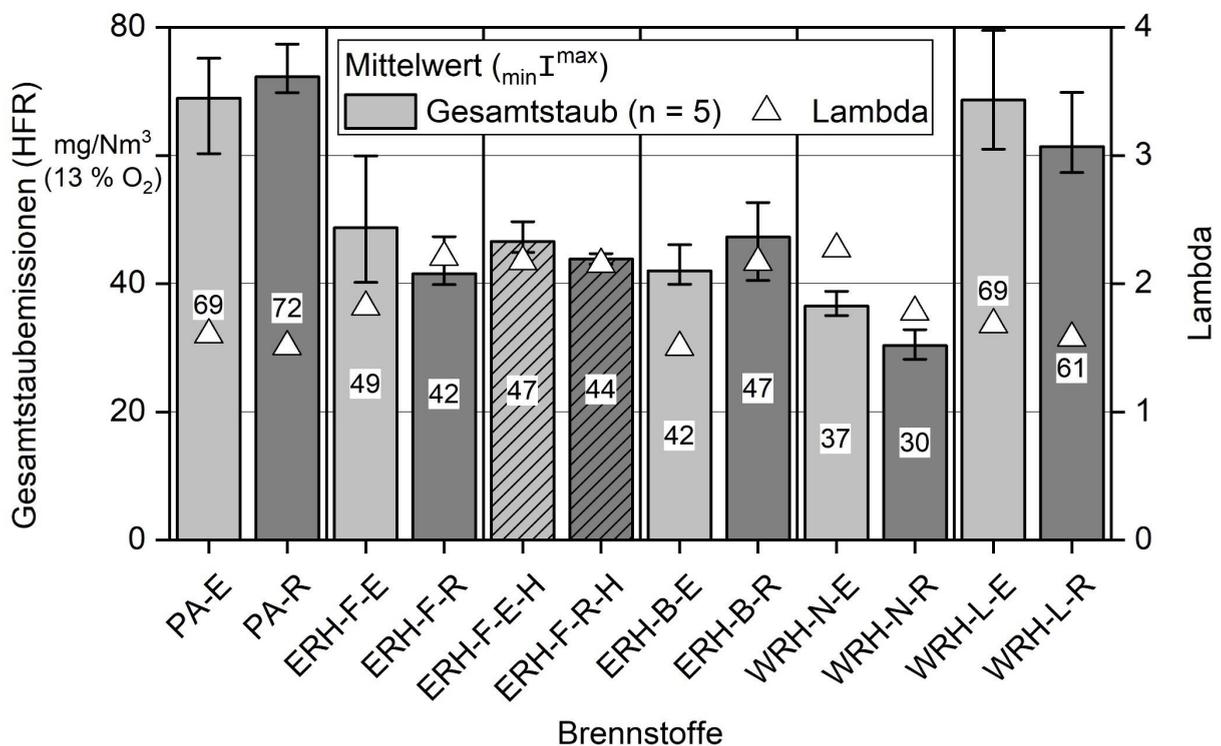


Abbildung 61: Mittlere Gesamtstaubemissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 an der HFR (schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

Der Unterschied zwischen den Effits und den Referenzbrennstoffen war lediglich bei den Versuchen am TFZ bei WRH-L signifikant ($p \leq 0,001$). Hier wiesen die Effits deutlich höhere Emissionen auf. Nachdem bei den restlichen Brennstoffpaaren jedoch zum Teil gegenläufige Trends auftraten, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Zerkleinerungsmethodik einen wesentlichen Einfluss auf die Staubemissionen nimmt. SCHÖN et al. (2019) [78] hatten festgestellt, dass geringe Feinanteile (ohne Änderung der inhaltsstofflichen Zusammensetzung) einen positiven Effekt auf die Gesamtstaubemissionen von Kleinf Feuerungsanlagen haben können. Dies konnte hier nicht beobachtet werden. Vermutlich hat der Transport der Brennstoffe in den Förderschnecken der Kessel zu einer Nachzerkleinerung der Brennstoffe geführt (siehe Abschnitt 3.2.5.2), wodurch die zu erwartenden positiven Effekte der geringeren Feinanteile aufgehoben wurden.

Die Gesamtstaubemissionen korrelierten wie erwartet gut mit der Summe der aerosolbildenden Elemente (K, Na, Zn und Pb) im Brennstoff (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63) [48] [80]. Bei beiden Kesseln zeigte sich jeweils ein Zusammenhang mit einem $R^2 \geq 0,7$.

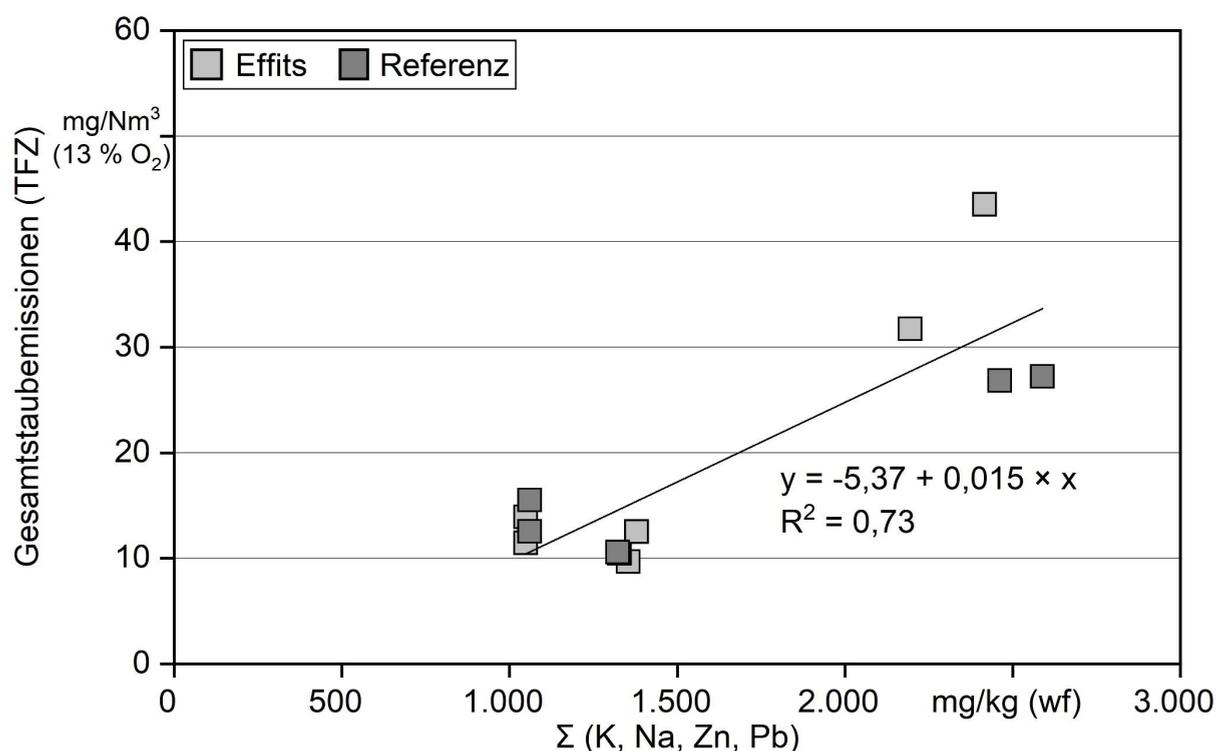


Abbildung 62: Lineare Regression zwischen den Gesamtstaubemissionen und der Summe aerosolbildender Elemente der Brennstoffe bei den Versuchen am TFZ ($n = 12$)

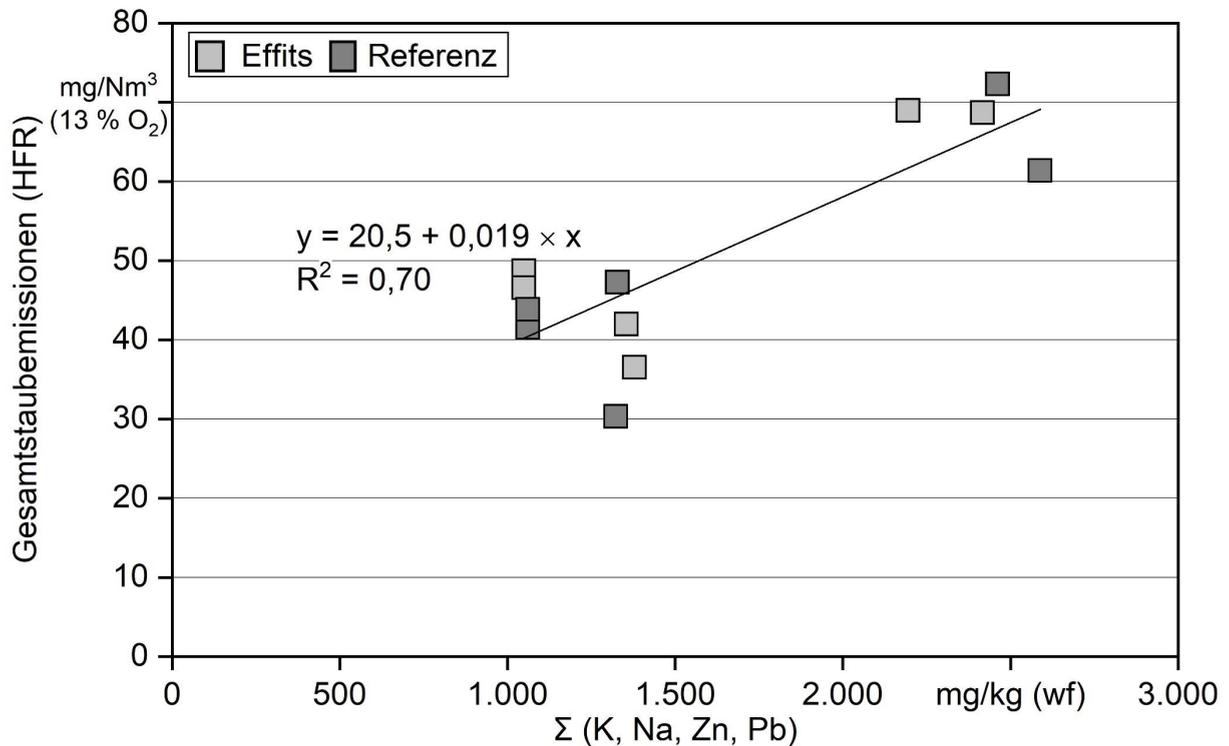


Abbildung 63: Lineare Regression zwischen den Gesamtstaubemissionen und der Summe aerosolbildender Elemente der Brennstoffe bei den Versuchen an der HFR ($n = 12$)

SO_x-Emissionen. Die mittleren SO_x-Emissionen der Brennstoffe zeigten keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der Zerkleinerungsmethode. Sie wurden lediglich bei den Feuerungsversuchen am TFZ bestimmt (Abbildung 64).

Zwar zeigten sich einzelne signifikante Unterschiede zwischen Effits und Referenz, diese folgen jedoch keinem einheitlichen Trend. Vor allem die Referenzbrennstoffe aus WRH-L zeigten einen sehr hohen Wert im Vergleich zu den dazugehörigen Effits, aber auch zu allen anderen Brennstoffen. SO_x-Emissionen entstehen hauptsächlich aus dem im Brennstoff enthaltenen Schwefel [48] [80]. Das ergibt sich auch bei Betrachtung des gemessenen Schwefelgehalts im Brennstoff. So wiesen die Referenzbrennstoffe aus WRH-L mit Abstand die höchsten Schwefelgehalte auf (0,034 m-% [wf], siehe Tabelle 9), während die restlichen Brennstoffe im Mittel einen S-Gehalt von 0,011 m-% (wf) aufwiesen. Vor allem WRH-L war als Brennstoff mit seinen unterschiedlichen Baumarten sehr inhomogen, womit sich die gemessenen Unterschiede erklären lassen.

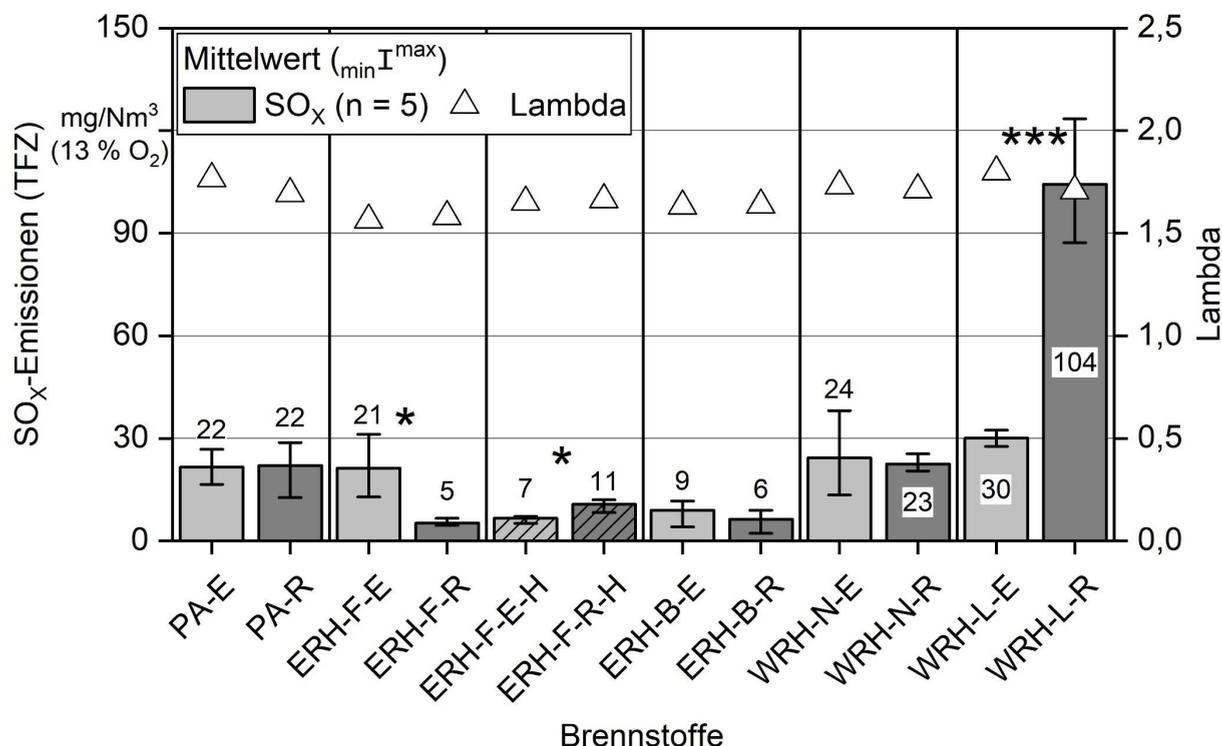


Abbildung 64: Mittlere SO_x-Emissionen und Lambdawerte bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ (* zeigt signifikante Unterschiede an; * $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,001$; ANOVA mit Tukey-Test; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

Wirkungsgrad. Die Wirkungsgrade der Kessel wurden lediglich bei den Messungen am TFZ bestimmt (Abbildung 65). Bei den Effits-Brennstoffen aus Pappel, ERH-F und ERH-B waren die Wirkungsgrade der Feuerung höher als bei den Referenzbrennstoffen. Bei den gelagerten Brennstoffen aus ERH-F und den Brennstoffen aus Waldrestholz waren die Wirkungsgrade dagegen bei der Nutzung der Referenzbrennstoffe höher. Somit kann kein klarer Trend hinsichtlich der Zerkleinerungstechnik auf den Wirkungsgrad des Kessels beobachtet werden. Mögliche Unterschiede, die potenziell aufgrund einer veränderten Partikelgrößenverteilung und der neuartigen Partikelstruktur der Effits auftreten könnten, werden wahrscheinlich durch die Nachzerkleinerung der Effits in der Förderschnecke aufgehoben (siehe Abschnitt 3.2.5.2).

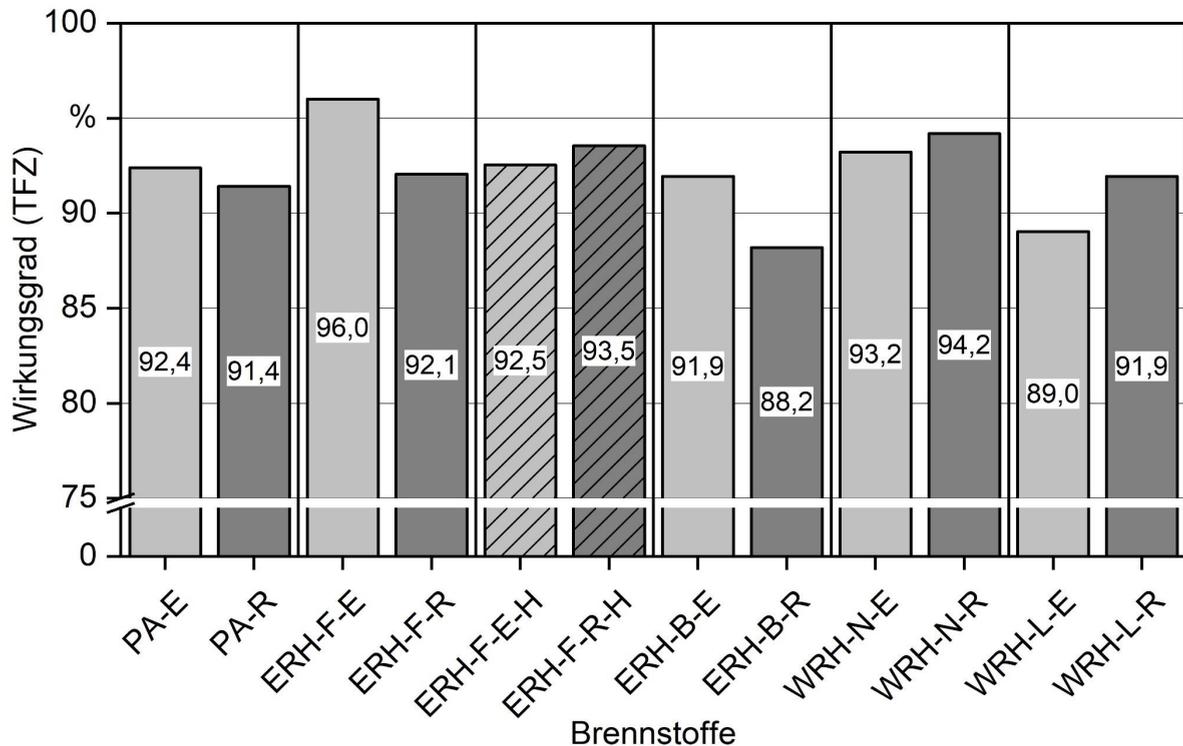


Abbildung 65: Wirkungsgrade des Kessels bei den Feuerungsversuchen 2019 am TFZ ($n = 1$, gemittelt über den gesamten Versuchszeitraum; schraffierte Balken = gelagerte Brennstoffe)

3.3 Zusammenfassung

Bei den stationären Versuchen 2019 mit dem Effiter 20.30 und dem Referenzhacker ergaben sich sowohl bei der Zerkleinerung selbst als auch bei den daraus resultierenden Brennstoffen sowie im Trocknungs- und Lagerverhalten wesentliche Unterschiede. Lediglich bei den Feuerungsversuchen und den damit verbundenen Emissionsmessungen traten kaum signifikante Unterschiede auf.

Bei der Zerkleinerung zeigte der Effiter 20.30 in allen Fällen geringere Durchsatzraten und einen größeren Kraftstoffverbrauch als der Referenzhacker. Dies liegt vermutlich an dem Leistungsbereich des Referenzhackers, der einer etwas größeren Leistungsklasse entstammt, wodurch eine Vergleichbarkeit beider Maschinen kaum gegeben ist.

Die erzeugten Effits wiesen gröbere, vorgebrochene Partikel mit einem deutlich reduzierten Feinanteil auf. Durch die neuartige Partikelstruktur ergaben sich verschiedene Vorteile bei den weiteren Untersuchungen. So zeigten die Effits deutlich geringere Belüftungswiderstände als die Referenzbrennstoffe, was zu einem geringeren Energieverbrauch bei der Belüftung und Trocknung führt. Im Trocknungsversuch zeigten die Effits in den meisten Fällen höhere Wirkungsgrade, vor allem durch eine schnellere Trocknung der Schüttgüter. Eine Anpassung der Trocknungsanlage auf die einzelnen Brennstoffe erfolgte nicht, so dass hier keine finale Aussage zum bestmöglichen Trocknerbetrieb möglich ist.

Bei den Lagerungsversuchen in Lagerbehältern zeigten die Effits in allen Fällen einen stark verringerten Trockenmasseverlust sowie in den meisten Fällen eine deutlich bessere natürliche Trocknung. Während keine der Referenzchargen nach der Lagerung über fünf Monate einen Wassergehalt < 20 m-% aufwies, war dies bei fast allen Effits-Chargen der Fall. Die Brennstoffe wären somit direkt für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen geeignet.

Sowohl die Effits als auch die Referenzbrennstoffe waren ohne größere mechanische Probleme in realen Förderschnecken von Kleinfeuerungsanlagen förderbar. Bei beiden Brennstoffarten traten allerdings Überschreitungen der Antriebsnennlast auf. Bei den Effits war dieser Effekt stärker ausgeprägt, was auf ihre grobe Partikelstruktur zurückgeführt werden kann. Die Effits zerkleinerten sich in der Förderschnecke sowie der Stokerschnecke des Kessels so weit, dass sie nach der Förderung dem Referenzbrennstoff vor der Förderung sehr ähnlich waren. Gravimetrische und fotooptische Analysen zur Partikelgrößenverteilung bestätigten diese nachträgliche Angleichung der Partikelgrößen.

Vermutlich aufgrund der ähnlichen Partikelstrukturen nach der Förderung zeigten sich bei den Feuerungsversuchen und den dabei durchgeführten Emissionsmessungen kaum signifikante Unterschiede oder Trends zwischen den Zerkleinerungstechniken. Unterschiede im Emissionsverhalten ergaben sich vielmehr durch den Einsatz unterschiedlicher Ausgangssortimente (Pappel, ERH, WRH). Der am TFZ verwendete Kessel hielt die Stufe-2-Grenzwerte der 1. BImSchV in den meisten Fällen ein. Für den Kessel, der an der HFR verwendet wurde, war dies meist nicht der Fall. Die Effits waren somit als Brennstoff in Kleinfeuerungsanlagen ebenso geeignet wie die Referenzbrennstoffe, führten hier jedoch zu keinen wesentlichen Verbesserungen.

4 Versuche im industriellen Maßstab

Die stationären Versuche mit dem Effiter 20.30 (Kapitel 3) wurden für ausgewählte Fragestellungen in einem größeren, industriellen Maßstab erneut durchgeführt. Hierbei kam Energierundholz aus Fichte (ERH-F) zum Einsatz. Die im Großversuch erzeugten bzw. umgesetzten Brennstoffvolumina waren deutlich größer als bei den stationären Versuchen. Die Messungen im Industriemaßstab hatten das Ziel, das neuartige Aufbereitungsverfahren in realen, praxisnahen Brennstoffbereitungsketten zu bewerten.

4.1 Material und Methoden

Die Versuche im industriellen Maßstab fanden im Sommer 2020 statt. Das Rohmaterial wurde erneut unter festgelegten Versuchsbedingungen zerkleinert, beprobt und anschließend in Praxishaufwerken > 100 SRM für mehrere Monate gelagert. Zudem wurde ein Teil der erzeugten Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung in einer Containertrocknungsanlage getrocknet und anschließend für Versuche zur Nutzung in einem Holzgas-BHKW verwendet. Probennahme, Probenaufbereitung und Brennstoffanalysen erfolgten nach den in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Verfahren.

4.1.1 Rohmaterial

Als Rohmaterial wurde Energierundholz verwendet, das bis auf sehr wenige Ausnahmen aus Fichtenstämmen (*Picea abies*) bestand. Die Stämme wiesen wie in den stationären Hackversuchen 2019 eine Länge von ca. zwei Metern auf (Abbildung 66).



Abbildung 66: Kleiner Teil des genutzten Rohmaterials am Ort des Anfalls für die Versuche im industriellen Maßstab 2020

Die Durchmesser variierten von ca. 10 cm bis 30 cm. Einige wenige Stammstücke überschritten diese Abmessungen teils massiv. Diese wurden vorab aussortiert und nicht für die Versuche verwendet. Die Rohmaterialien wurden von den Bayerischen Staatsforsten AöR (BaySF) kostenlos zur Verfügung gestellt. Das Material stammte aus Durchforstungsarbeiten und war aufgrund seines Durchmessers oder seiner Qualität (z. B. Stammfäule) als Sortiment für die stoffliche Nutzung weniger geeignet. Die Bäume wurden kurz vor den Feldversuchen in einem Forstrevier bei Neuötting eingeschlagen. Insgesamt wurden sechs Lkw-Ladungen an Stämmen zu einem Lagerplatz der Bayerischen Staatsforsten südlich von München gebracht. Dort erfolgte die Zerkleinerung.

4.1.2 Zerkleinerung

Die Stammstücke wurden mit dem Effiter 20.30 oder einem Referenzhacker zerkleinert. Es wurden jeweils dieselben Hackermodelle wie bei den stationären Hackversuchen aus dem Jahr 2019 genutzt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Erneut wurden ein Effiter 20.30 mit „Puls-Craft-Austragung“ sowie ein den Versuchen 2019 identischer Trommelhacker (selber Hersteller und selbes Modell) verwendet. Beide Hacker wurden mit demselben Schlepper, einem Fendt 712 Vario mit 85 kW, angetrieben. Der Referenzhacker sowie der Antriebschlepper wurden über ortsansässige Lohnunternehmer gemietet. Die Einstellung des Referenzhackers sowie der Betrieb des Antriebsschleppers wurden von dem Lohnunternehmer vorgenommen bzw. überwacht.

Vor der Zerkleinerung wurden die Stammstücke mit einem Forstkran vorsortiert und vor Versuchsbeginn neben der jeweiligen Maschine bereitgelegt. Die Vorsortierung war notwendig, da bei den Rohmaterialien auch Stammstücke mit einem Durchmesser > 20 cm (= Maximaldurchmesser des Effiters 20.30) vorlagen. Das Bereitlegen der Stämme neben bzw. vor dem jeweiligen Hacker sollte ein häufiges Umsetzen des Gespanns aus Schlepper und Hacker vermeiden.

Die manuelle Beschickung des Effiters 20.30 wurde von drei bis vier Personen zeitgleich durchgeführt. Die Beschickung des Referenzhackers erfolgte ebenfalls manuell mit drei Personen. Teilweise wurde hier auch der Forstkran eingesetzt, um Stammstücke mit einem sehr hohen Durchmesser, bei denen eine manuelle Beschickung aufgrund des Gewichts des Holzes nicht möglich war, maschinell zuzuführen. Ein Vergleich der Durchsatzleistungen, der Kraftstoffverbräuche sowie der Wirtschaftlichkeit zwischen den Verfahrensketten war demnach nur eingeschränkt möglich, da sich die Zerkleinerungsverfahren aufgrund der abwechselnden manuellen und maschinellen Beschickung des Referenzhackers und wegen der teilweise größeren Stammdurchmesser beim Referenzhacker unterschieden.

Bei den Zerkleinerungsversuchen wurden je Material etwa 125 SRM an Brennstoff erzeugt. Diese teilten sich jeweils auf in ca. 100 SRM für eine Lagerung in Haufwerken und ca. 25 SRM für die technische Trocknung der Brennstoffe in einem Container. Die Durchsatzleistung sowie der Energieverbrauch der Zerkleinerung wurden während des Versuchs beim Hacken in den Container aufgenommen, da hier das Volumen und die Masse des erzeugten Brennstoffs exakt bestimmt werden konnten. Das Volumen wurde durch

Nivellieren des Füllstands und anschließende manuelle Messung des Leervolumens ermittelt. Der Kraftstoffverbrauch der Antriebsmaschine wurde volumetrisch über eine mobile Tankstelle des TFZ bestimmt. Der Tank des Schleppers wurde vor Beginn der Zerkleinerung vollständig gefüllt und nach dem Ende der Versuche erneut auf das Startniveau gebracht.

4.1.3 Lagerung im Haufwerk

Einlagerung

Die Brennstoffe wurden nach der Zerkleinerung zum Aufbau von Lagerungsversuchen (Lagerdauer: 10.06.2020 bis 17.01.2020) genutzt und dabei hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Brennstoffparameter beprobt (vgl. Tabelle 2 in Abschnitt 3.1.4). Eine Homogenisierung des Materials vor der Lagerung wurde erreicht, indem zum einen ein mehrmaliges Umschaufeln der gesamten Schüttung mittels Teleskopradlader vorgenommen wurde. Zum anderen wurden die Haufwerke errichtet, indem nach dem Umschaufeln alternierend von verschiedenen Seiten der jeweiligen Brennstoffschüttung Material für den Aufbau der Haufwerke entnommen wurde. Nach der Zerkleinerung und der Homogenisierung waren zunächst zehn Schüttdichtebestimmungen ($n = 10$, vgl. Abschnitt 3.1.4) an verschiedenen Stellen der jeweiligen Schüttung durchgeführt worden, bevor mit dem Aufbau der Haufwerke begonnen wurde.

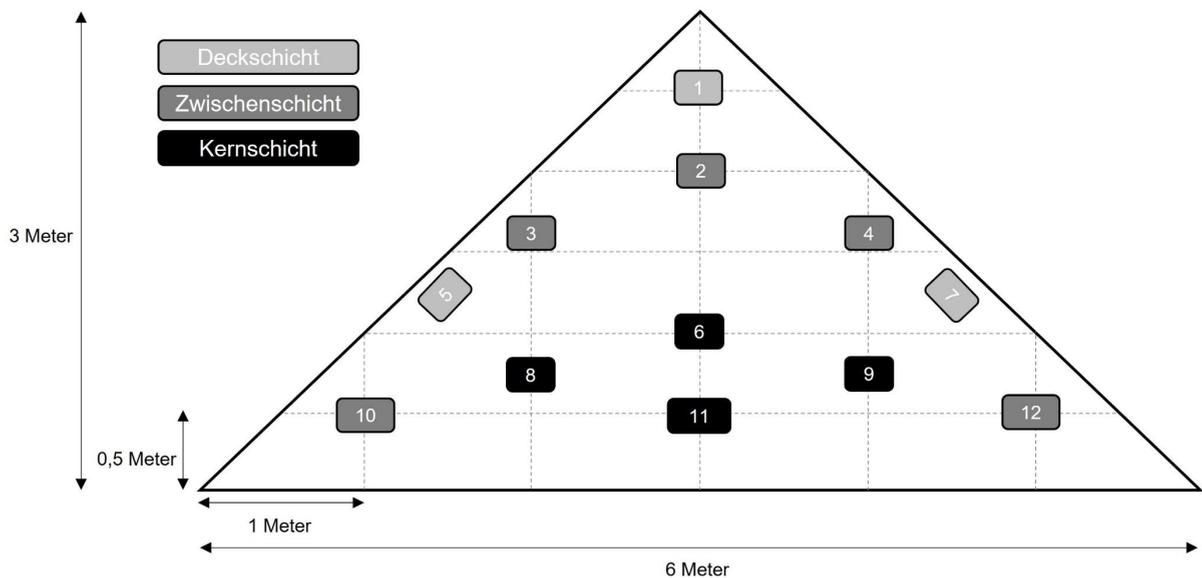


Abbildung 67: Aufbau der Haufwerksquerschnitte mit den genauen Positionen der Bilanzbeutel je Querschnitt für die Versuche im industriellen Maßstab 2020

Die Lagerhaufwerke wiesen eine Länge von ca. 11 m und eine dreieckige Stirnfläche von ca. 3 × 6 m auf. Somit ergab sich ein Volumen von ca. 100 SRM. In den Haufwerken wurden an definierten Punkten in drei Querschnitten jeweils zwölf Bilanzbeutel eingebracht.

Der Aufbau der Bilanzbeutel ist in Abschnitt 3.1.5.2 beschrieben. Somit ergaben sich 36 Bilanzbeutel je Haufwerk. Der Aufbau der Haufwerke sowie die Positionen der Bilanzbeutel und der vier zur Temperatureaufzeichnung genutzten Thermosensoren (siehe weiter unten) sind in Abbildung 67 und Abbildung 68 gezeigt.

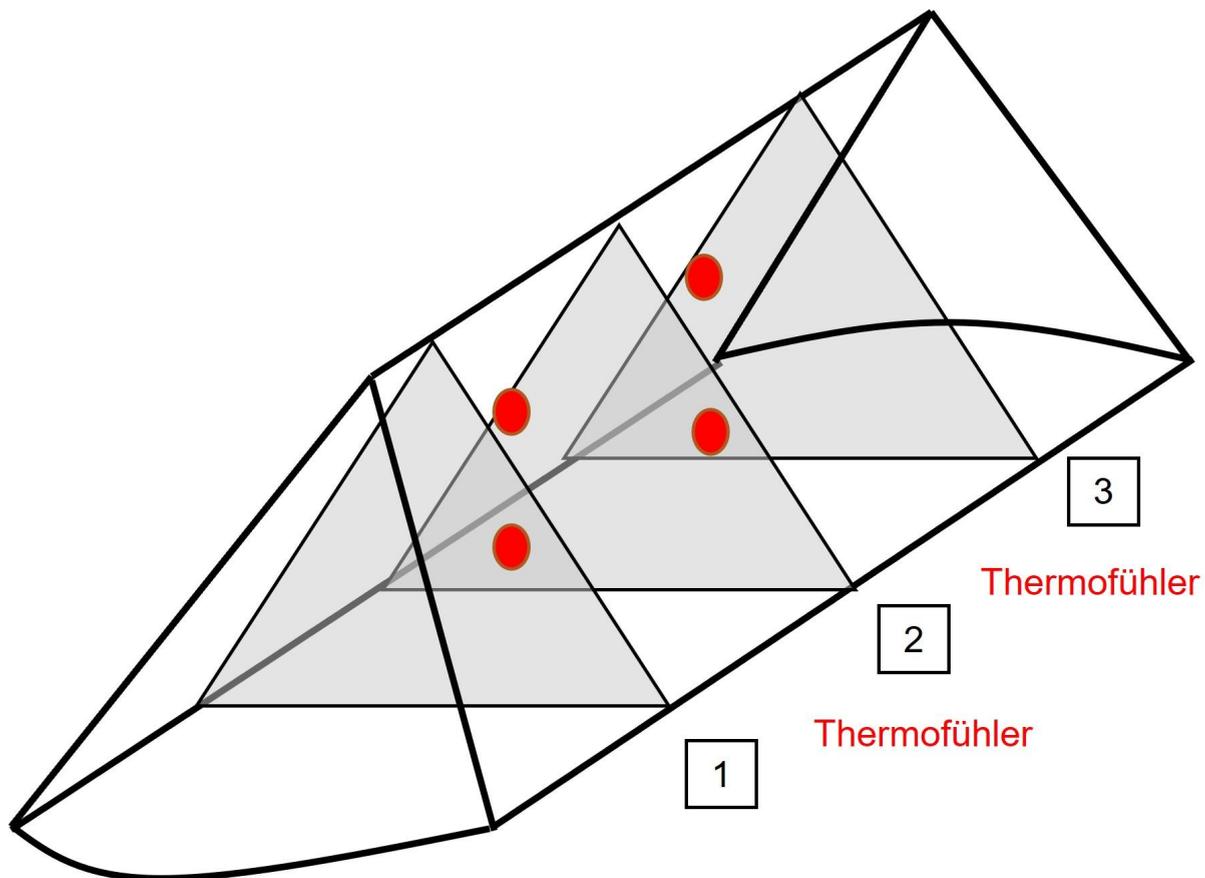


Abbildung 68: Aufbau des gesamten, 11 m langen Haufwerks mit den drei Querschnitten und den Positionen der vier Thermofühler für die Versuche im industriellen Maßstab 2020

Die Bilanzbeutel wurden mit dem zuvor homogenisierten Material befüllt. Hierzu wurden nach der Homogenisierung der gesamten Schüttung kleinere Teilmengen (ca. 10 l) manuell entnommen und in einem Riffelteiler (Fa. Retsch) mehrfach in drei Teilproben ($2 \times 2,5$ l, 1×5 l) geteilt. Von den drei so gewonnenen Teilproben wurde eine genutzt, um einen Bilanzbeutel zu befüllen. Die zweite Probe wurde zur Bestimmung des Wassergehalts in einer Aluschale eingewogen. Die dritte erzeugte Probenteilmenge wurde mit weiteren Teilproben aus derselben Haufwerksschicht (Deckschicht, Zwischenschicht, Kernschicht, siehe Abbildung 67) je Querschnitt zu einer Mischprobe für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung, der Aschegehalte sowie des Heizwerts genutzt. Die Analysen wurden anhand der aktuell gültigen Normen für biogene Festbrennstoffe durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.4). Somit wurden beim Aufbau je Haufwerk 36 Wassergehaltsbestimmungen, neun Aschegehaltsbestimmungen, neun Siebanalyseproben sowie drei Analysen zum Heizwert durchgeführt.

In jedes Haufwerk wurden jeweils vier Thermosensoren (Datalogger testo 175-H1, Testo AG) zentral verbaut. Zwei Logger wurden in der vorderen Hälfte der Haufwerke zwischen dem ersten und dem zweiten Probenquerschnitt und zwei Stück in dem hinteren Teil der Haufwerke zwischen dem zweiten und dem dritten Querschnitt installiert. Der untere Thermosensor des jeweiligen Fühlerpaars wurde auf einer Höhe von 0,75 m positioniert, der obere bei 1,5 m (Abbildung 68).

Nach dem vollständigen Aufbau wurden die Haufwerke mithilfe des Teleskopradladers mit einem diffusionsoffenen Vlies (PolyTex, 200 g/m², Zill GmbH und Co KG) abgedeckt, um eine Wiederbefeuchtung des Brennstoffs durch Niederschlag zu vermeiden und eine Trocknung der Holzhackschnitzel durch Verdunstung zu ermöglichen [1] [45] [60]. Das Vlies wurde mit Sandsäcken sowie Seilen und Stammstücken auf dem Haufwerk fixiert.

Auslagerung

Nach einer fünfmonatigen Lagerdauer (ca. 150 Tage) wurden die Haufwerke am 20. November 2020 freigelegt und die Bilanzbeutel mithilfe der an ihnen befestigten Seile aus der jeweiligen Schüttung gezogen. Bei den Beuteln aus dem Kern der Haufwerke wurde hierfür der Teleskopradlader genutzt. Die Beutel aus den äußeren Schichten wurden per Hand entfernt. Nach dem Ziehen wurden die Beutel mit einer Bürste von außen anhaftenden Partikeln befreit und gewogen. Anschließend wurden die Bilanzbeutel geöffnet, der Inhalt mit dem Probenteiler in drei Fraktionen geteilt und die Einzelfraktion, analog zur Einlagerung, für die Bestimmung des Wassergehalts ($n = 36$), des Aschegehalts ($n = 9$) und des Heizwerts ($n = 3$) sowie der Partikelgrößenverteilung ($n = 9$) genutzt. An jedem Haufwerk wurde aus verschiedenen Schichten und verschiedenen Positionen die Schüttdichte bestimmt ($n = 10$).

4.1.4 Technische Trocknung

Bei den Zerkleinerungsversuchen wurde jeweils eine Teilmenge des Materials (etwa 25 SRM) direkt in Trocknungscontainer gehackt. Die Container waren mit einem doppelten Boden und einem Lochblech ausgestattet. Wenige Tage nach der Zerkleinerung wurden die Container technisch an einer Biogasanlage eines Lohnunternehmers südlich von München vorgetrocknet. Anschließend wurde das Material für Versuche an ein Holzgas-BHKW (siehe Abschnitt 4.1.5) geliefert. Da sich dort herausstellte, dass der notwendige Zielwassergehalt von 10 m-% noch nicht eingehalten wurde, erfolgte vor Ort eine weitere Trocknung der Holzhackschnitzel in einer Satzrocknung (Abbildung 69). Nach der Trocknung wurde der Wassergehalt der jeweiligen Schüttung bestimmt ($n = 10$).



Abbildung 69: Trocknung der Brennstoffe mit Abwärme des Holzgas-BHKW bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020

Zusätzlich erfolgte in der Satz Trocknungsanlage des TFZ eine erneute Analyse der technischen Trocknung. Hierzu wurde jeweils eine Teilmenge von 4 SRM an zerkleinertem Material je Brennstoff am Lagerplatz südlich von München in Big Bags gefüllt und an das TFZ transportiert. Dort wurden analog zu den Versuchen 2019 die stationären Trocknungsversuche auch mit dem Praxismaterial durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.6). Im Unterschied zu 2019 lag der gewählte Trocknungsluft-Volumenstrom jedoch bei 200 m³/h.

4.1.5 Vergasung in einem Holzgas-BHKW

Die zwei untersuchten Brennstoffe (ERH-F-E, ERH-F-R) wurden auf Lkw-Überfahrwaagen gewogen und der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Nutzung in dem Holzgas-BHKW bestimmt. Keiner der Brennstoffe wurde vor der Nutzung in dem BHKW gesiebt oder, abgesehen von der technischen Trocknung, anderweitig vorkonditioniert.

Als Holzgas-BHKW wurde eine Anlage des Herstellers Spanner Re² GmbH (Neufahrn in Niederbayern) genutzt. Die Anlage des Typs HKA 49 befindet sich auf einem landwirtschaftlichen Tierhaltungsbetrieb in der Nähe von Landshut. Bei der HKA 49 handelt es sich, wie bei allen Anlagen des Herstellers, um einen autotherm arbeitenden Gleichstromvergaser mit Festbett. Autotherm heißt, es wird die benötigte Reaktionswärme aus einem Teil des Brennstoffs gewonnen. Der Brennstoff wird bei Gleichstrom-Reaktoren in dersel-

ben Fließrichtung wie das erzeugte Holzgas bewegt. Als Vergasungsmittel wird Umgebungsluft genutzt. Das so erzeugte Produktgas wird in einem Gasmotor mit angegliederter Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die hier betrachtete Anlage liefert eine Nennleistung von ca. 110 kW thermischer Leistung und etwa 50 kW elektrischer Leistung. Der erzeugte Strom wird gänzlich ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Deswegen wird die Anlage im stromgeführten Betrieb genutzt. Die erzeugte Wärme wird zur Beheizung der landwirtschaftlichen Liegenschaften, eines Gasthauses und von Wohnhäusern genutzt. Sobald die Wärmeabfuhr nicht ausreichend gegeben ist, können auch Brennstoffe oder andere Schüttgüter getrocknet werden. Die hier betrachtete Anlage ist einen niedrigen Leistungsbereich für Holzgas-BHKW zuzuordnen.

In dem Reaktor eines Gleichstrom-Holzvergasers laufen folgende Reaktionsschritte ab: Nach der Trocknung des Brennstoffs bei etwa 200 °C findet die Pyrolyse statt. Hier wird der Holzbrennstoff pyrolytisch zersetzt (500 °C, $\lambda < 1$). Die so entstehenden langkettigen Gase werden in der Oxidationszone in sauerstoffhaltiger Atmosphäre aufgespalten (1200 °C, $\lambda > 1$). In der anschließenden Reduktionszone reagieren sie mit dem entstandenen Koks unter weiterer Gasbildung [48].

Das hier verwendete Holzgas-BHKW besitzt in der Steigschnecke der Brennstoffzuführung eine Feinanteilabsiebung. Diese Siebung wurde nach Rücksprache mit dem Anlagenbetreiber sowohl bei den Effits als auch dem zugehörigen Referenzbrennstoff genutzt.

An der Anlage wurde neben den bereits verbauten Sensoren der Anlage selbst zusätzliche Messgeräte zur Bestimmung der erzeugten thermischen und elektrischen Energien installiert. So wurde sowohl der erzeugte als auch der selbst benötigte elektrische Strom mithilfe eines Energieverbrauchszählers (DBB 13000, ABB Automation GmbH) aufgenommen. Die thermische Energiemenge wurde über eine Messung des Durchflusses im Rücklauf des Wärmesystems (Sharky 775, Diehl Metering GmbH) sowie Temperaturmessungen im Vor- und Rücklauf erfasst.

Vor Beginn des jeweiligen Versuchs wurde der Bunker der Anlage so weit im regulären Praxisbetrieb geleert wie möglich. Nach dem Befüllen wurde die Messung gestartet und für beendet erklärt, sobald der Bunkerstand nahezu dem Anfangsfüllgrad entsprach. Die abgeseibten Feinanteile wurden separat gesammelt und abschließend gewogen, um den eingesetzten Netto-Massenstrom an Brennstoff berechnen zu können.

Aus den Heizwerten, den verwendeten Brennstofftrockenmassen und den erzeugten thermischen und elektrischen Energiemengen wurden die Wirkungsgrade des Holzgas-BHKW bestimmt.

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_{\text{thermisch}} + \eta_{\text{elektrisch}} \quad (4.1)$$

$$\eta_{thermisch} = \frac{E_{thermisch}}{m_{Brennstoff} \times Q} \quad (4.2)$$

$$\eta_{elektrisch} = \frac{E_{elekt.erzeugt} - E_{elektr.verbraucht}}{m_{Brennstoff} \times Q} \quad (4.3)$$

Wobei:

η_{gesamt} = Gesamtwirkungsgrad in %

$\eta_{thermisch}$ = thermischer Wirkungsgrad in %

$\eta_{elektrisch}$ = elektrischer Wirkungsgrad in %

$E_{thermisch}$ = thermisch generierte Energie in kWh

$E_{elekt.erzeugt}$ = elektrisch generierte Energie nach Generator in kWh

$E_{elektr.verbraucht}$ = verbrauchte elektrische Energie für systeminterne Prozesse in kWh

$m_{Brennstoff}$ = Masse an genutztem Brennstoff in kg (wasserfreie Bezugsbasis)

Q = Heizwert des Brennstoffs in kWh/kg (wasserfreie Bezugsbasis)

Neben den Energiemengen wurden verschiedene Kennzahlen des Vergasungsprozesses aus der Steuerung der Anlage ausgelesen und ausgewertet. Hierfür wurden Parameter wie die mittlere Reformertemperatur, der Differenzdruck im Reformer oder der Differenzdruck am Produktgasfilter genutzt. Zudem wurden brennstoffindizierte Störungen aufgezeichnet und beurteilt.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1 Zerkleinerung

Die Teilchargen, bei denen während der Versuche im industriellen Maßstab die Durchsatzleistung und der Kraftstoffbedarf des Zerkleinerungsprozesses bestimmt werden sollten, wurden direkt in einen Container gehackt, bis die gewünschte Füllmenge von ca. 25 SRM erreicht war. Hierfür wurden die benötigte Zeit und der Kraftstoffverbrauch ermittelt. Der Effiter 20.30 erreichte eine Durchsatzleistung von 3,5 t_{wf}/h , der Referenzhacker nur einen Durchsatz von 3,0 t_{wf}/h (Abbildung 70). Der spezifische Kraftstoffverbrauch des Antriebsschleppers lag bei dem Betrieb des Effiters 20.30 mit 4,01 l/t_{wf} um 14 % niedriger als beim Betrieb des Referenzhackers (4,56 l/t_{wf}). Die insgesamt erzeugte Trockenmasse war bei dem Referenzhacker geringfügig höher.

Entgegen den Ergebnissen der stationären Hackversuche aus dem Jahr 2019 zeigte der Effiter 20.30 im Praxisversuch 2020 höhere Durchsatzraten und geringere Kraftstoffverbräuche als der Referenzhacker. Diese Unterschiede lassen sich durch mehrere Aspekte erklären. Zunächst wurde durch den Hersteller des Effiters 20.30 eine modifizierte Version

der Duplex-Schnecke mit einem steileren Gewindegewinkel verwendet, um die großen Mengen an Brennstoff für den Versuch möglichst energieeffizient herstellen zu können. Die veränderte Schneckenengeometrie hatte einen um $0,5 \text{ l/t}_{\text{wf}}$ geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch und einen um $0,6 \text{ t}_{\text{wf}}/\text{h}$ höheren Durchsatz des Effiters 20.30 im Vergleich zu den stationären Versuchen mit ERH-F aus dem Jahr 2019 zur Folge. Gleichzeitig zeigten sich geringere Durchsatzraten und ein höherer spezifischer Kraftstoffverbrauch beim Betrieb des Referenzhackers im Vergleich zu 2019. Im Jahr 2020 erfolgte eine Beschickung des Rohmaterials teilweise mithilfe eines Forstkrans. Dies war nötig, da in dem Rohmaterial viele Stämme mit einem zu großen Stammdurchmesser vorhanden waren. Durch die zeitaufwendige Vorsortierung der Ausgangsmaterialien, die teilweise auch noch während des Versuchs erfolgte, sowie durch den phasenweisen und zeitlich abgesetzten Einsatz des Krans, erfolgte die Beschickung des Referenzhackers insgesamt langsamer und ungleichmäßiger als die des Schneckenhackers. Folglich sind die Durchsatzraten und der spezifische Kraftstoffverbrauch des Referenzhackers nicht mit anderen Versuchen vergleichbar.

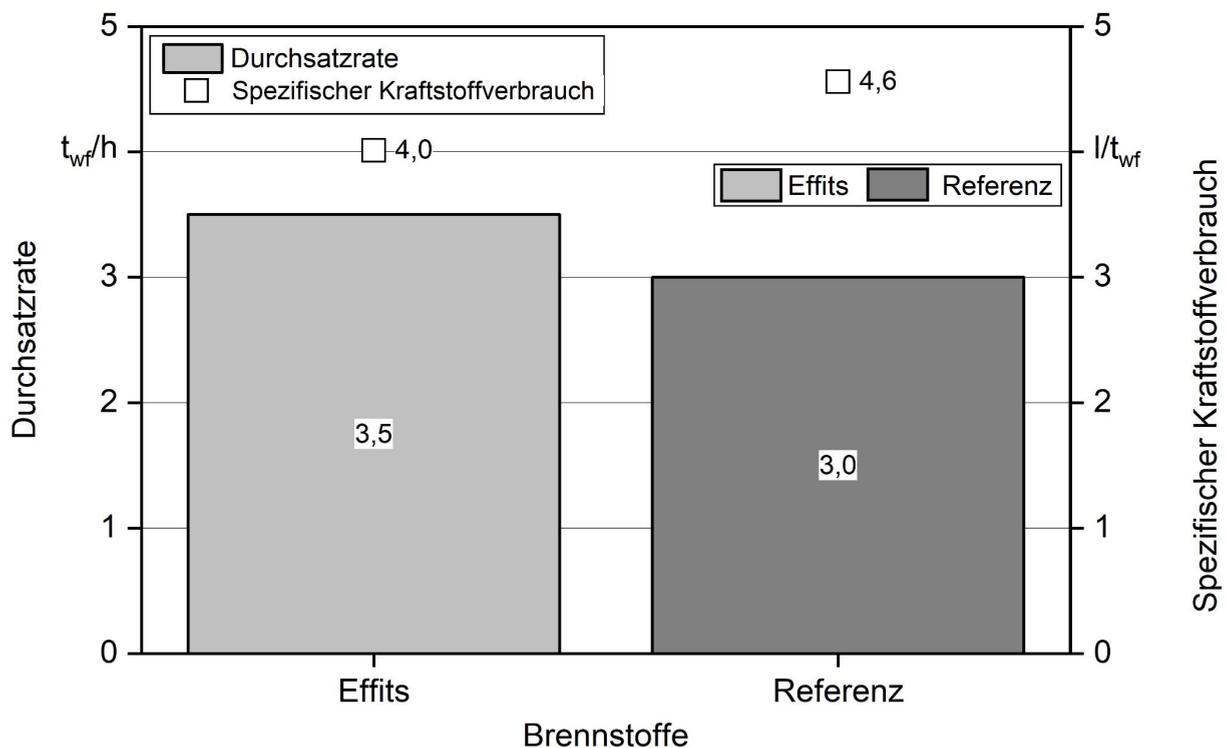


Abbildung 70: Durchsatzrate bei der Zerkleinerung in t/h sowie spezifischer Kraftstoffverbrauch in l/t (jeweils auf wasserfreier Bezugsbasis) bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020

Die Qualitätsparameter der Brennstoffe wurden direkt nach der Zerkleinerung bzw. beim Aufbau der Lagerhaufwerke bestimmt (Tabelle 24).

Tabelle 24: Ausgewählte Brennstoffparameter der jeweiligen Charge direkt nach der Zerkleinerung bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 (Mittelwert \pm Standardabweichung; wf = wasserfreie Bezugsbasis)

| Brennstoffparameter | ERH-F-E | ERH-F-R |
|--|-----------------|-----------------|
| Wassergehalt in m-% | 39,3 \pm 2,4 | 41,7 \pm 0,8 |
| Aschegehalt in m-% (wf) | 0,58 \pm 0,07 | 0,63 \pm 0,04 |
| Schüttdichte in kg/m ³ (wf) | 158 \pm 7,1 | 154 \pm 6,9 |
| Partikelgrößenklasse nach DIN EN ISO 17225-4 | P45s | P31s |
| Heizwert in kJ/kg (wf) | 19.072 | 19.127 |

Der Wassergehalt der Effits lag mit 39,3 m-% geringfügig unter dem der Referenzbrennstoffe mit 41,7 m-%. Die Werte entsprechen nicht einem erntefrischen Wassergehalt von Energierundholz aus Fichte [48] [56]. Der signifikante Unterschied ($p \leq 0,001$) lässt sich ähnlich wie bei den Brennstoffen aus ERH-B aus dem Jahr 2019 (siehe Abschnitt 3.2.1.2) durch die etwas größeren Stammdurchmesser der Rohmaterialien erklären, die für die Brennstoffproduktion im Referenzhacker genutzt wurden (Abbildung 71). Hierbei ist davon auszugehen, dass im Bestand oder während der vorgelagerten Prozessschritte in der Bereitstellungskette eine Vortrocknung des Materials stattgefunden hat [33] [76] [77]. Vermutlich hing der verringerte Wassergehalt mit dem hohen Schadholzaufkommen im Jahr 2020 zusammen. Geringe Niederschläge führten vor allem für die Baumart Fichte zu einem stark erhöhten Trockenstress und anschließendem Schädlingsdruck durch den Borkenkäfer [42]. Aufgrund dieser Ausnahmesituation wurde den Beständen zum Versuchszeitpunkt fast ausschließlich befallenes Holz entnommen.

Nach der Zerkleinerung wiesen beide Brennstoffe jedoch Wassergehalte ≥ 30 m-% auf, bei denen noch davon ausgegangen werden kann, dass bei der Lagerung der Brennstoffe mikrobielle Abbauprozesse ablaufen [44] [48] [68]. Somit wurde das Rohmaterial für die anschließenden Versuche zur Lagerung in Haufwerken als geeignet eingestuft. Für die etwas größere Inhomogenität des Wassergehalts in den Effits kann keine abschließende Erklärung gegeben werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die Inhomogenität des Wassergehalts in den teilweise vorgetrockneten Stämmen insgesamt sehr hoch war.

Bei der Betrachtung der Aschegehalte war, ähnlich wie im Vorjahr bei den stationären Hackversuchen mit ERH-F, kein markanter Unterschied zu erkennen (Tabelle 24). Die Brennstoffe wiesen mit 0,58 m-% (wf) bei den Effits und 0,63 m-% (wf) bei den Referenzbrennstoffen sehr ähnliche Wertebereiche auf. Der Unterschied war nicht signifikant. Beide Werte liegen in einem typischen Bereich für Holzhackschnitzel aus Nadelstammholz [27] [48] [62].

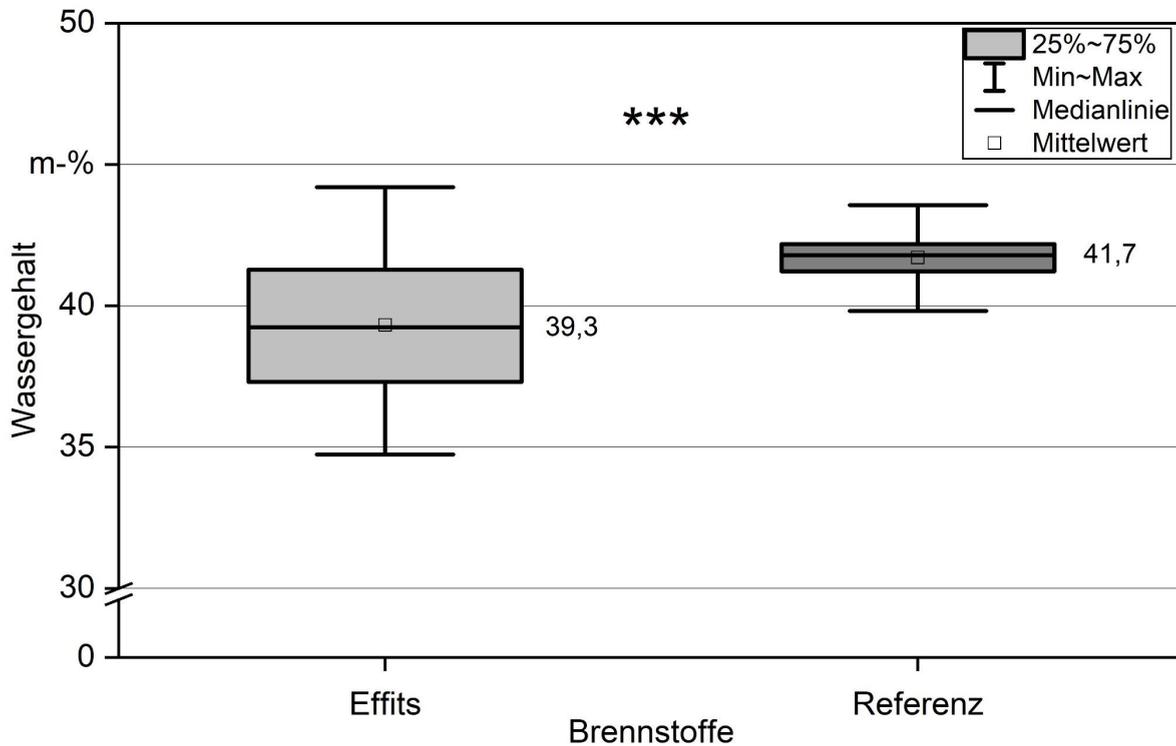


Abbildung 71: Schwankungsbreite der Wassergehalte der jeweiligen Brennstoffe aus den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 direkt nach der Zerkleinerung ($n = 36$; Mittelwert zusätzlich als Zahlenwert genannt; *** zeigt signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,001$ an; t-Test)

Die Schüttdichten der beiden Sortimenten unterschieden sich nicht signifikant voneinander (Tabelle 24). Jedoch lag die Schüttdichte der Effits (158 kg/m^3 , wf) signifikant ($p \leq 0,001$) über den Werten der Schüttdichte desselben Sortiments aus den Versuchen 2019 (ERH-F-E, 126 kg/m^3 , wf). Eine Erklärung für diesen Effekt kann der Einbau der modifizierten Duplex-Schnecke durch den Hersteller liefern. Aufgrund des veränderten Winkels der Gewindegänge an der Zylinderschnecke werden tendenziell kleinere Partikel abgeschert (siehe Partikelgrößenverteilung, weiter unten). Eine kleinere bzw. feinere Partikelgrößenverteilung bewirkt eine engere Packung der Schüttung, was zu einer insgesamt höheren Schüttdichte führt. Allerdings stieg auch die Schüttdichte des Referenzmaterials im Vergleich zum Vorjahr, wenn auch nicht signifikant, an. Im Jahr 2019 betrug die Schüttdichte von ERH-F-R 144 kg/m^3 (wf), 2020 dann 159 kg/m^3 (wf). Die Erhöhung der Schüttdichte bei den Referenzbrennstoffen deutet darauf hin, dass neben der Veränderung der Schneckenengeometrie beim Effiter 20.30 auch eine höhere Rohdichte des Ausgangsmaterials vorlag. Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz findet sich bei der Diskussion zur Partikelgrößenverteilung.

Die Effits zeigten, wie aus den Versuchen 2019 bereits erwartet, eine gröbere Partikelstruktur als die Referenzbrennstoffe (Abbildung 72). Während die Effits in den Partikelfractionen $\leq 3,15 \text{ mm}$ und $3,15 \text{ bis } 8 \text{ mm}$ nur geringe Abweichungen zu dem Referenzbrennstoff aufwiesen, waren die Unterschiede bei den größeren Partikelfractionen auffälliger.

Vor allem in der Partikelfraktion von 8 bis 16 mm wichen die Brennstoffe deutlich voneinander ab.

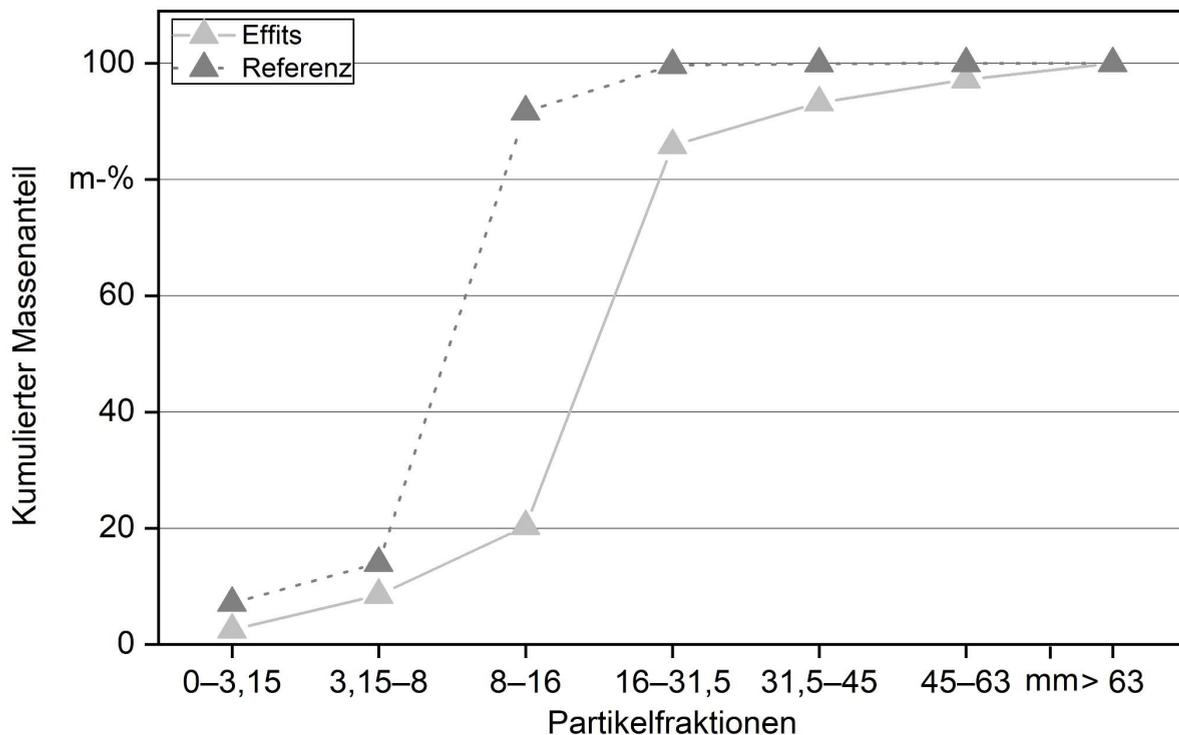


Abbildung 72: Kumulierte Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 ($n = 9$)

Im Vergleich zu den Versuchen aus dem Jahr 2019 war der Unterschied in der Partikelgrößenverteilung zwischen Effits und Referenz im Jahr 2020 nicht so stark ausgeprägt. Zudem war der Feinanteil im Vergleich zu den Versuchen 2019 erhöht und beide Brennstoffe zeigten insgesamt größere Anteile an kleinen Partikeln im Vergleich zu den stationären Hackversuchen am TFZ. Die durchschnittlich kleinere Partikelgröße beider Brennstoffe (Effits und Referenz) kann die hohe Ähnlichkeit bei den Schüttdichten und die insgesamt höheren Schüttdichtewerte im Vergleich zu 2019 erklären. Vor allem im Fall des Referenzhackers wird davon ausgegangen, dass dies u. a. an dem verwendeten Rohmaterial, d. h. an der Vortrocknung und ggf. an physikalischen Veränderungen des Holzes aufgrund des Schädlingsbefalls (Käferholz) lag. Diese Effekte konnten nicht genauer untersucht werden, da keine Vergleichschargen mit hohen Wassergehalten aus gesunden Beständen zur Verfügung standen.

Es ist zudem davon auszugehen, dass sich durch die Veränderung der Partikelgrößenverteilung weitere Einflüsse, beispielsweise auf die Lagerungseigenschaften der Effits und der Referenzhackschnitzel, ergeben.

4.2.2 Lagerung im Haufwerk

In beiden Haufwerken wurde über die gesamte Lagerdauer der Temperaturverlauf gemessen. Abbildung 73 gibt die Temperaturen als Tagesmittelwerte der vier Temperatursensoren je Haufwerk wieder. Direkt nach der Zerkleinerung stiegen bei beiden Schüttungen die Temperaturen rapide an. Sie zeigten in den ersten 20 Tagen der Lagerung die größten Differenzen zur Umgebungslufttemperatur. Nach Tag 20 der Lagerung blieben sie größtenteils auf einem nahezu konstanten Niveau gegenüber der Umgebungsluft und folgten deren Temperaturschwankungen.

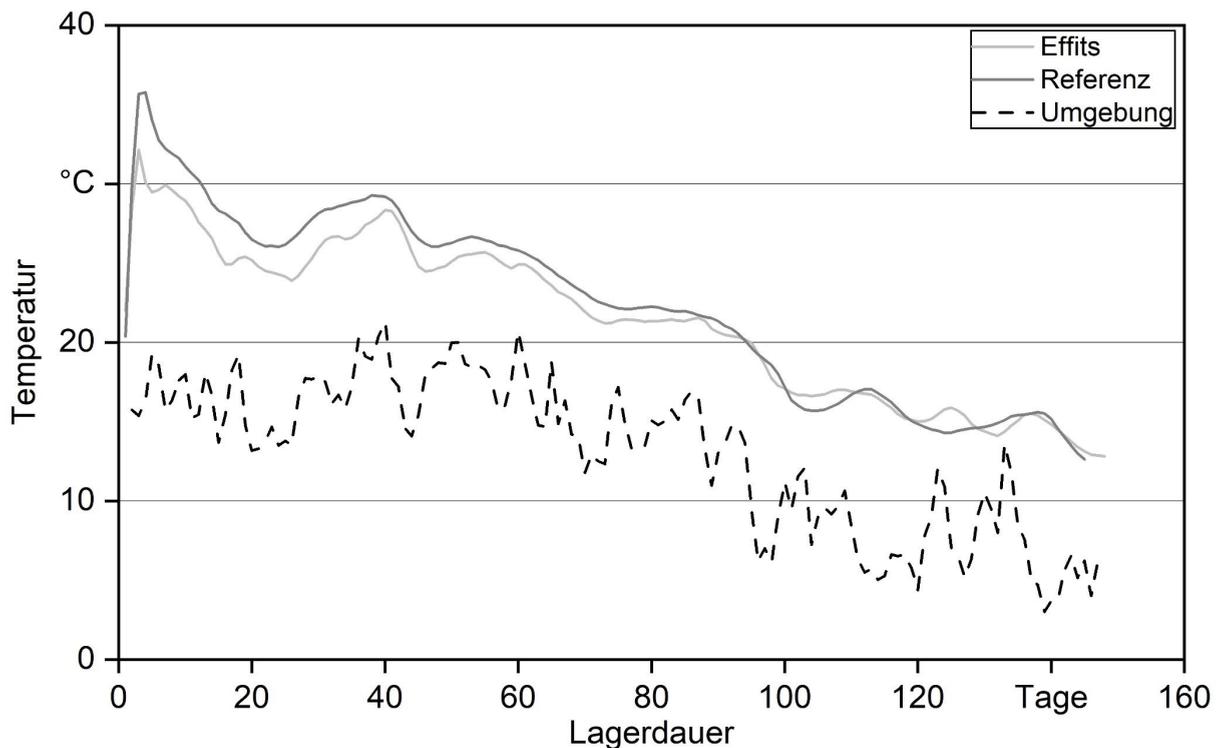


Abbildung 73: Tagesmitteltemperaturen der Haufwerke sowie der Umgebungsluft bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 über den gesamten Lagerungszeitraum von etwa 150 Tagen vom 10.06.2020 bis zum 17.11.2020

Die höchste Tagesmitteltemperatur der Effits lag bei 32,1 °C. In dem Referenzhaufwerk lag die höchste gemessene Tagesmitteltemperatur aller vier Sensoren bei 35,7 °C. Die mittlere Temperatur über den gesamten Versuch lag bei den Effits mit 21,4 °C um durchschnittlich 1,1 °C niedriger als die mittlere Temperatur der Referenzbrennstoffe.

Sowohl die Maximalwerte als auch die Durchschnittstemperaturen waren in den Haufwerken des industriellen Versuchs 2020 höher als bei den Versuchen in den Behältern und den kleineren Haufwerken (15 SRM) aus dem Jahr 2019 (siehe Abschnitt 3.2.2). Hier hat vor allem die unterschiedliche Haufwerksgröße (100 SRM vs. 15 SRM) einen entscheidenden Einfluss. So ist bei größeren Haufwerken die Abfuhr der bei der Lagerung entstehenden Wärme an die Oberfläche der Schüttungen allein schon aufgrund des größeren

Volumens eingeschränkt. Daneben könnten auch die bereits diskutierten Veränderungen in der Partikelgrößenverteilung zwischen den Versuchsjahren 2019 und 2020 eine Rolle spielen (siehe Abschnitt 4.2.1). Aufgrund der geringeren Partikelgröße der Brennstoffe aus dem Jahr 2020, der höheren Schüttdichte und des daraus höchstwahrscheinlich resultierenden höheren Belüftungswiderstands (vgl. Abschnitt 3.2.4) dürfte der natürliche Luftaustausch beider Sortimente im Jahr 2020 im Vergleich zu den Versuchen im Jahr 2019 erschwert gewesen sein [58]. Mit der unterschiedlichen Partikelgröße lässt sich zudem die etwas geringere Temperatur der Effits 2020 im Vergleich zu den Referenzbrennstoffen erklären, da die grobporigen Effits besser belüftbar sein dürften.

Die Verringerung des Wassergehalts über die Lagerdauer war in beiden Haufwerken signifikant ($p \leq 0,001$; siehe Abbildung 74). Die Wassergehalte der Materialien nach der Lagerung zeigten zwischen den Effits und den Referenzbrennstoffen jedoch keinen signifikanten Unterschied. Die Abnahme des mittleren Wassergehalts war mit $-6,1$ m-% bei den Referenzbrennstoffen geringfügig höher als bei den Effits ($-4,4$ m-%).

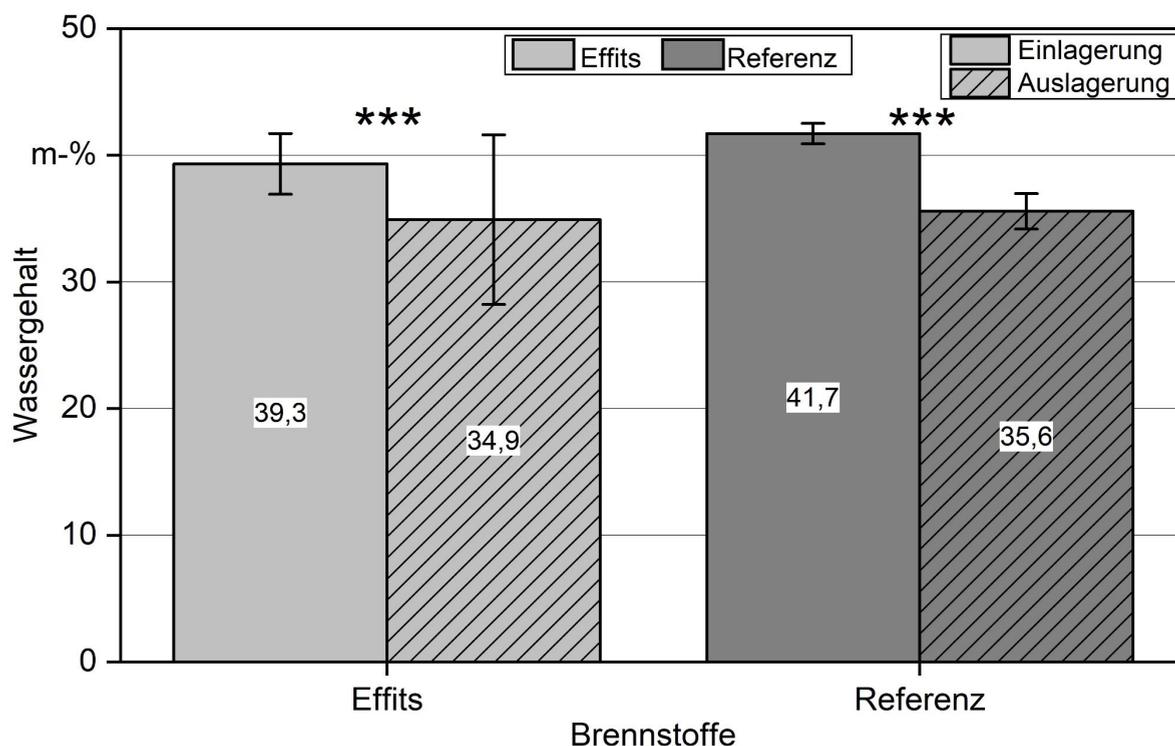


Abbildung 74: Mittlere Wassergehalte zum Zeitpunkt der Ein- und Auslagerung (Mittelwert \pm Standardabweichung; $n = 36$; *** zeigt signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,001$ an; t -Test und Mann-Whitney-Test)

Bei den stationären Versuchen 2019 hatten die Effits aus ERH-F noch deutlich bessere natürliche Trocknungserfolge als die zugehörigen Referenzbrennstoffe gezeigt. Dies war bei der Lagerung 2020 nicht der Fall. Allerdings zeigten sich auch bei den Effits im Jahr 2020 stärkere Trocknungseffekte in den äußeren Schichten des Haufwerks als bei den

Referenzbrennstoffen. Dieser Effekt wurde bei der Mittelwertbildung jedoch von zwei Bilanzbeuteln mit besonders hohen Wassergehalten maskiert (siehe Abbildung 75). Bei den Referenzbrennstoffen zeigte sich wie schon bei den Versuchen 2019 keine Abhängigkeit des Trocknungserfolgs von der Position des Bilanzbeutels im Haufwerk.

Betrachtet man bei der natürlichen Trocknung in den Haufwerken nicht den Mittelwert über alle Bilanzbeutel, sondern den Median, so lagen die Effits mit einer durchschnittlichen Reduktion des Wassergehalts von $-5,90$ m-% in nahezu demselben Bereich wie die Referenzbrennstoffe mit $-5,96$ m-%. Dies deutet an, dass abgesehen von den Extremwerten eine vergleichbare Trocknung ablief.

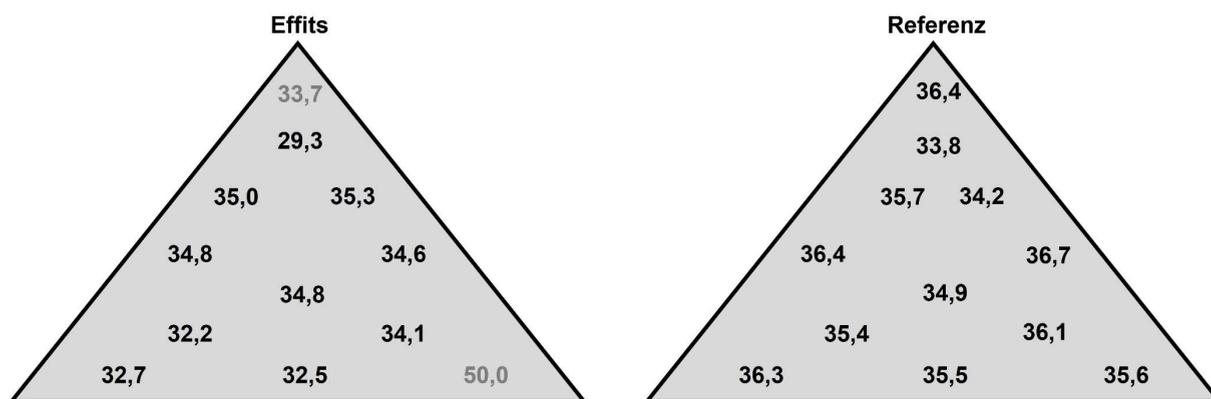


Abbildung 75: Mittlere Wassergehalte an den jeweiligen Positionen in den Haufwerken bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 ($n = 3$; grau gekennzeichnet: Wassergehaltszunahmen bzw. Mittelwerte, bei denen Wassergehaltszunahmen eingeflossen sind)

Die Bilanzbeutel mit sehr hohen Wassergehalten in der äußersten Schicht des Effits-Haufwerks legen die Vermutung nahe, dass es zu Kondensationsprozessen in der Nähe des Vlieses gekommen ist. Möglicherweise wird dabei das Eindringen des Kondensationswassers in die Brennstoffe durch die aufgebrochene Partikelstruktur der Effits erleichtert.

Keiner der Brennstoffe aus den beiden Haufwerken 2020 lag in einem Wassergehaltsbereich, bei dem ein emissionsarmer Einsatz in Hackschnitzelheizungen < 100 kW zu erwarten wäre [48]. Vor allem bei den Effits muss zudem die hohe Heterogenität im Wassergehalt bei Auslagerung für einen möglichen Einsatz als Brennstoff in Kleinf Feuerungslagen berücksichtigt werden.

Die Effits zeigten mit $3,7$ m-% höhere Trockenmasseverluste als die Referenzbrennstoffe mit $2,5$ m-% (Abbildung 76). Die Heterogenität der Einzelwerte war bei den Effits deutlich höher als bei den Referenzbrennstoffen. Es zeigte sich, dass die Mediane der jeweiligen Trockenmasseverluste in beiden Fällen bei etwa $2,5$ m-% lagen. Dies deutet darauf hin, dass bei einer Betrachtungsweise, die den Extremwerten weniger Bedeutung beimisst, die Effits hier fast annähernd denselben Trockenmasseverlust aufwiesen wie die Referenzbrennstoffe.

Die Trockenmasseverluste der Effits waren im Vergleich zu den Versuchen mit ERH-F im Jahr 2019 deutlich geringer. In den kleineren Haufwerken aus dem Vorjahr zeigte ERH-F-E Trockenmasseverluste von 4,5 m-% und die dazugehörigen Referenzbrennstoffe Verluste von 6,5 m-% (siehe Abschnitt 3.2.2.2). Es wird vermutet, dass die geringeren Trockenmasseverluste bei den Versuchen im industriellen Maßstab durch die deutlich trockeneren Ausgangsmaterialien bedingt waren. So lagen zwar die Brennstoffe bei Einlagerung mit Wassergehalten von etwa 40 m-% noch in einem Bereich, in dem Biomasse prinzipiell durch Mikroorganismen abgebaut wird [44] [48]. Dennoch ist davon auszugehen, dass der höhere Wassergehalt der Rohmaterialien im Jahr 2019 mit Werten > 50 m-% zu besseren Wuchsbedingungen für Bakterien und Pilzen geführt hat, die zudem wahrscheinlich länger in den Haufwerken vorherrschten [46] [68].

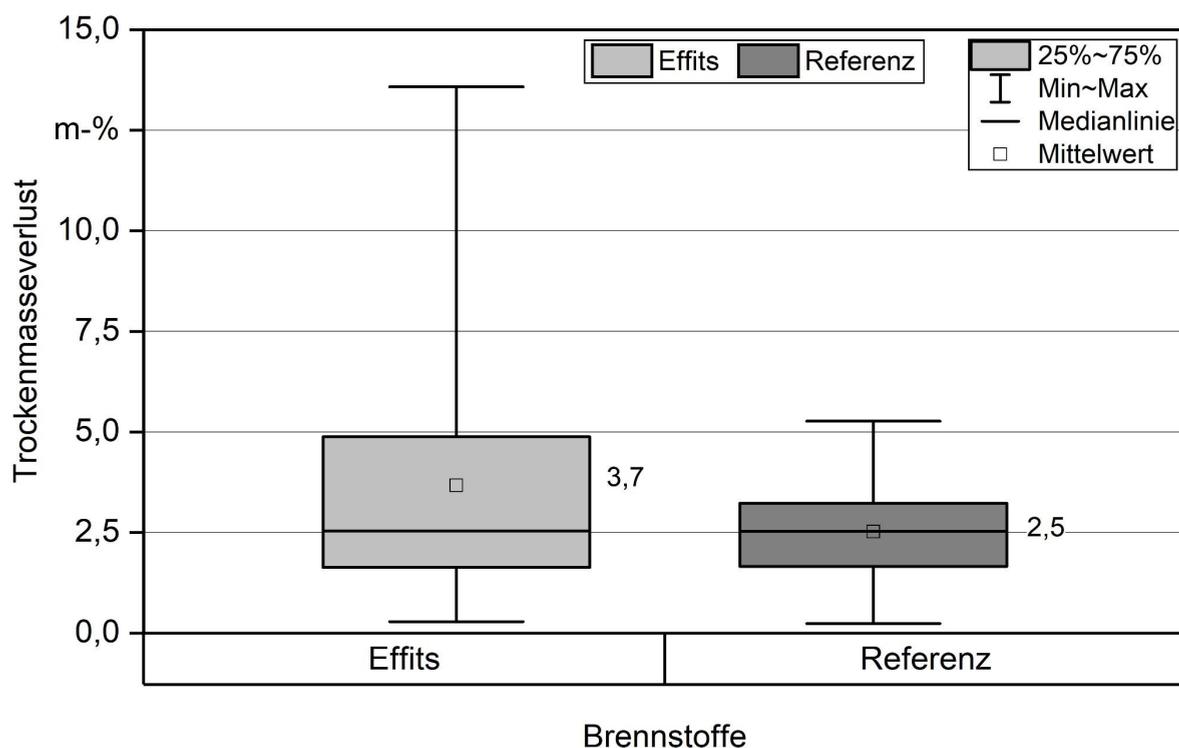


Abbildung 76: Schwankungsbreite der Trockenmasseverluste über den gesamten Zeitraum der Lagerung in den Haufwerken bei den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 ($n = 36$; Mittelwert zusätzlich als Zahlenwerte genannt)

Im Jahr 2019 waren die Effits bezüglich der natürlichen Trocknung und der Trockenmasseverluste klar im Vorteil gegenüber der Referenz. Im Gegensatz dazu zeigten die Effits aus den Versuchen im industriellen Maßstab einen höheren Trockenmasseverlust als die Referenzbrennstoffe, beziehungsweise ausgehend von der Medianbetrachtung annähernd denselben Wert. Ursache hierfür ist vermutlich die sehr ähnliche Partikelgrößenverteilung der Effits 2020 im Vergleich zur dazugehörigen Referenz zu sehen, wohingegen sich die Brennstoffe aus dem Jahr 2019 deutlich unterschieden.

Die Partikelgrößenverteilung der Effits änderte sich über die Lagerung 2020 nur in sehr geringem Maße (Abbildung 77). Entgegen den Erwartungen aus dem Vorjahr (siehe Abschnitt 3.2.2.2) zeigte sich keine wesentliche Nachzerkleinerung der groben und vorgebrochenen Partikel durch die mechanische Beanspruchung der Brennstoffe bei Auf- und Abbau der Haufwerke. Auch die Partikelgrößenverteilung der Referenzbrennstoffe unterlag keiner nennenswerten Veränderung. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte in der allgemein kleinere Partikelgrößenverteilung der Brennstoffe 2020 liegen. Es ist plausibel, dass aufgrund der kleineren Größe der einzelnen Partikel eine mechanische Beanspruchung weniger zu einem erneuten Aufbrechen der Einzelpartikel führte als bei größeren Partikeln, da die Hebelwirkung auf die Partikel eingeschränkt ist.

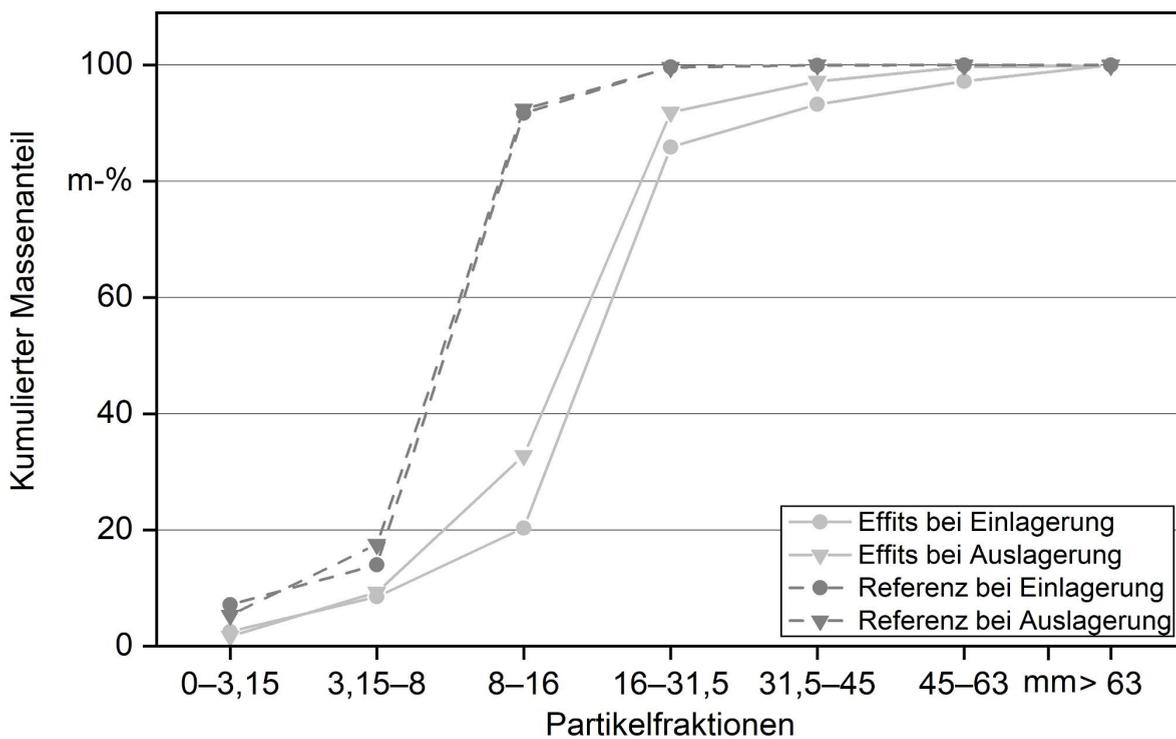


Abbildung 77: Kumulierter Massenanteil der Brennstoffe vor und nach der fünfmonatigen Lagerung im Haufwerk bei den Versuchen im industriellen Maßstab (n = 9)

Betrachtet man den Energieinhalt der Brennstoffe nach der fünfmonatigen Lagerung, so zeigt sich, dass bei den Effits bei Auslagerung noch 96,3 % der Ausgangsenergie verfügbar waren. Bei den Referenzbrennstoffen lagen noch 97,5 % der Energie vor. Die geringfügig höheren Energieinhalte nach der Lagerung lassen sich durch den besseren natürlichen Trocknungserfolg sowie die geringeren Trockenmasseverluste der Referenzbrennstoffe erklären, wenn der Mittelwert der Messwerte (Wassergehalt, Trockenmasseverlust) verwendet wird. Dieser Effekt war in den stationären Versuchen im Jahr 2019 umgekehrt. Ebenso ließen die geringfügig höheren Temperaturen in den Haufwerken einen höheren

Energieverlust in den Referenzbrennstoffen erwarten. Da die Trockenmasseverluste jedoch nahezu gleich waren, wird hier lediglich von einer besseren Durchlüftung und damit von einem besseren Abtransport der Wärme in den Effits-Brennstoffen ausgegangen.

4.2.3 Technische Trocknung

Die Trocknungsversuche mit den Brennstoffen aus den industriellen Versuchen (Abbildung 78) zeigten einen Gesamtwirkungsgrad (Heizregister und Gebläse) von 43,4 % bei den Effits und von 40,7 % bei den Referenzbrennstoffen. Wie schon 2019 wurde hierbei die Änderung im Wassergehalt von 30 m-% auf 20 m-% ausgewertet. Die Trocknereffizienzen lagen damit etwas unter denen, die im Versuchsjahr 2019 mit den ERH-F-Brennstoffen gemessen worden waren (Effits: 47,1 %; Referenz: 42,1 %). Erneut ließen sich die Effits mit einem höheren Wirkungsgrad trocknen als die Referenzbrennstoffe.

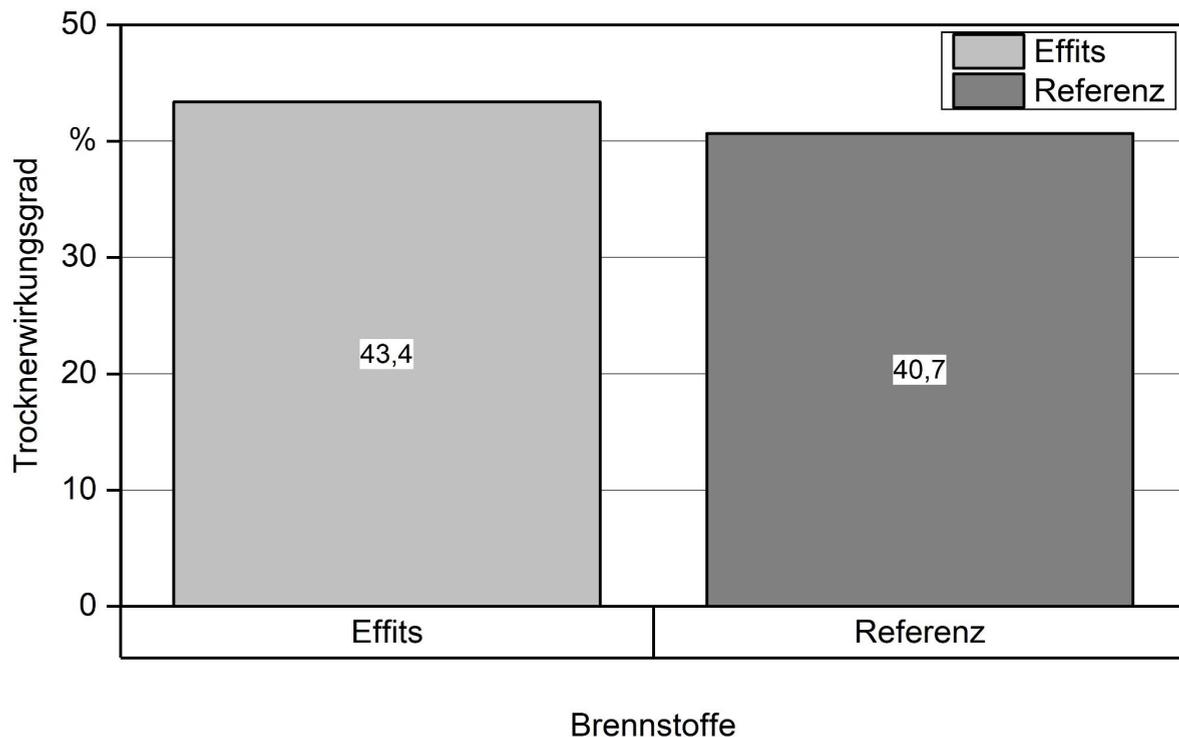


Abbildung 78: Trocknerwirkungsgrade des TFZ-Satztrockners mit den Brennstoffen aus den Versuchen im industriellen Maßstab 2020 ($n = 1$)

Die Gründe für die etwas geringeren Wirkungsgrade im Vergleich zu 2019 können in den physikalischen Unterschieden zwischen den Chargen, aber auch in den angepassten Trocknereinstellungen liegen. Zum einen sollte die feinere Partikelstruktur der beiden Brennstoffe aus dem Jahr 2020 im Vergleich zu den vorjährigen Versuchen einen negativen Einfluss auf die Trocknereffizienz haben. Wie bei den Betrachtungen zum Belüftungswiderstand bereits diskutiert (siehe Abschnitt 3.2.4) führen feinere Partikel zu dichteren Packungen der Schüttung, was einen höheren spezifischen Belüftungswiderstand bewirkt.

In der Folge wird die Trocknung der Brennstoffe eingeschränkt. Zum anderen ist es möglich, dass der voreingestellte, geringere Volumenstrom, der an der Trocknungsbox anlag, den Wirkungsgrad der Trocknung negativ beeinflusste, indem die Trocknungsdauer anstieg. Hierfür wären jedoch weitere Untersuchungen mit variierenden Volumenströmen und unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen bei einem einheitlichen Ausgangsmaterial nötig.

4.2.4 Vergasung in einem Holzgas-BHKW

Beide Brennstoffe (ERH-F-E, ERH-F-R) wurden in einem Holzgas-BHKW thermisch verwertet. Die mittlere Reformertemperatur der Anlage (fünf Einzelmesspunkte im Reformier), die über die gesamte Versuchsdauer vorlag, veranschaulicht Abbildung 79. Bei den Effits und den dazugehörigen Referenzbrennstoffen zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Temperaturen (t-Test: $p \leq 0,001$). Die Effits wiesen mit $410,0\text{ °C}$ durchschnittlich eine um $36,8\text{ °C}$ höhere Durchschnittstemperatur auf als die Referenzbrennstoffe ($373,2\text{ °C}$). Eine höhere Temperatur im Gleichstromvergaser kann laut Hersteller des Holzgas-BHKW ein erster Hinweis auf eine wirkungsvollere Vergasung darstellen. Die in den Temperaturverläufen sichtbaren Einbrüche lassen sich auf Störungen der Anlage im Zeitraum des Versuchs zurückführen.

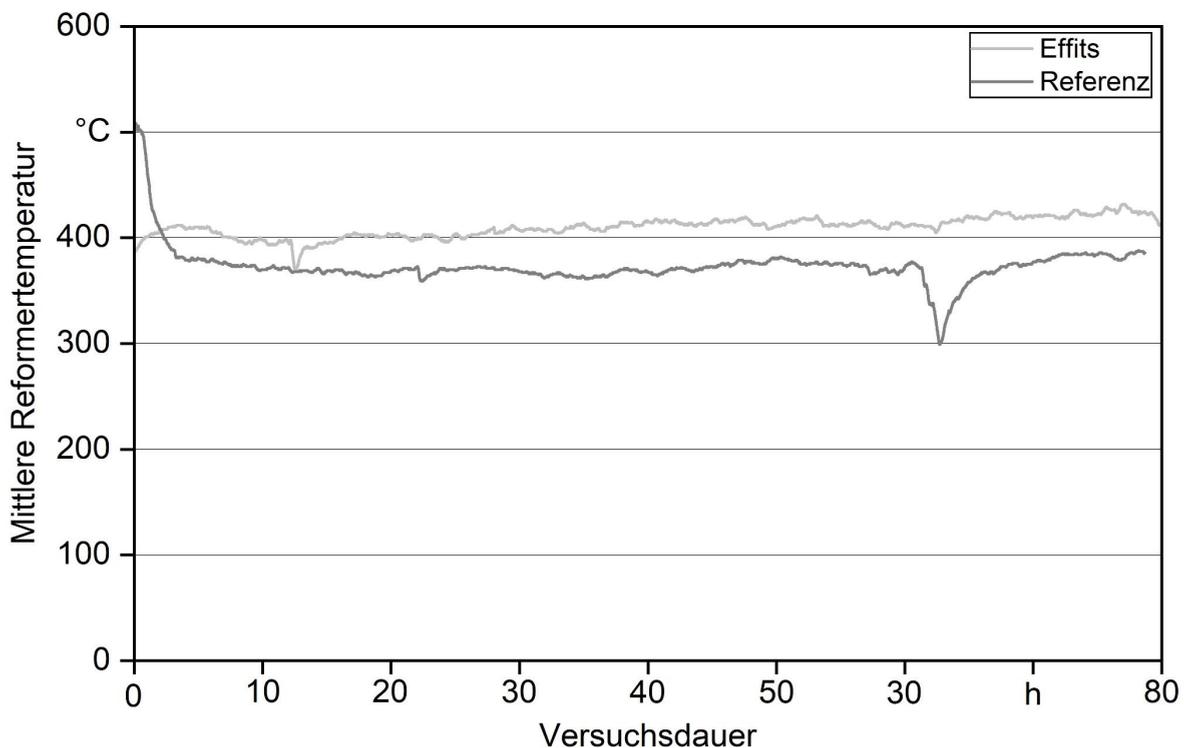


Abbildung 79: Mittlere Reformertemperatur über den gesamten Versuchszeitraum von etwa 80 Stunden (etwa 3,5 Tage) bei der Nutzung der Effits und des zugehörigen Referenzbrennstoffs aus den industriellen Versuchen 2020 in einem Holzgas-BHKW

Die Nutzung der Effits führte zu einer Erhöhung der Abreinigungsintervalle des Produktgasfilters (Abbildung 80). Dies ist deutlich an den Differenzdrücken am Filter zu erkennen. Der mittlere Differenzdruck war bei den Effits im Vergleich zu den Referenzbrennstoffen signifikant erhöht (Mann-Whitney-Test: $p \leq 0,001$). Während die Effits sechsmal den kritischen Differenzdruck erreichten, der die automatische Abreinigung der Anlage startet, war dies bei den Referenzhackschnitzeln im selben Zeitraum nur zweimal der Fall. Ein erhöhter Differenzdruck resultiert aus einer hohen Partikelfracht im Produktgas. Diese hat, abgesehen von der erhöhten Filterbeladung, laut Hersteller des Holzgas-BHKW jedoch keine negativen Auswirkungen auf den Vergasungsprozess. Lediglich die Filterlebensdauer würde geringfügig durch die höhere Anzahl an Abreinigungsprozessen sinken.

Die Differenzdrücke im Reformier des Holzgas-BHKW waren bei den Effits (40,29 mbar) signifikant geringer als bei den zugehörigen Referenzbrennstoffen (49,28 mbar, t-Test: $p \leq 0,001$, Abbildung 81). Der mittlere Differenzdruck der Effits lag damit etwa 9 mbar niedriger als der Wert der Referenzbrennstoffe. Dies entspricht einem Verhältnis von etwa 83 %.

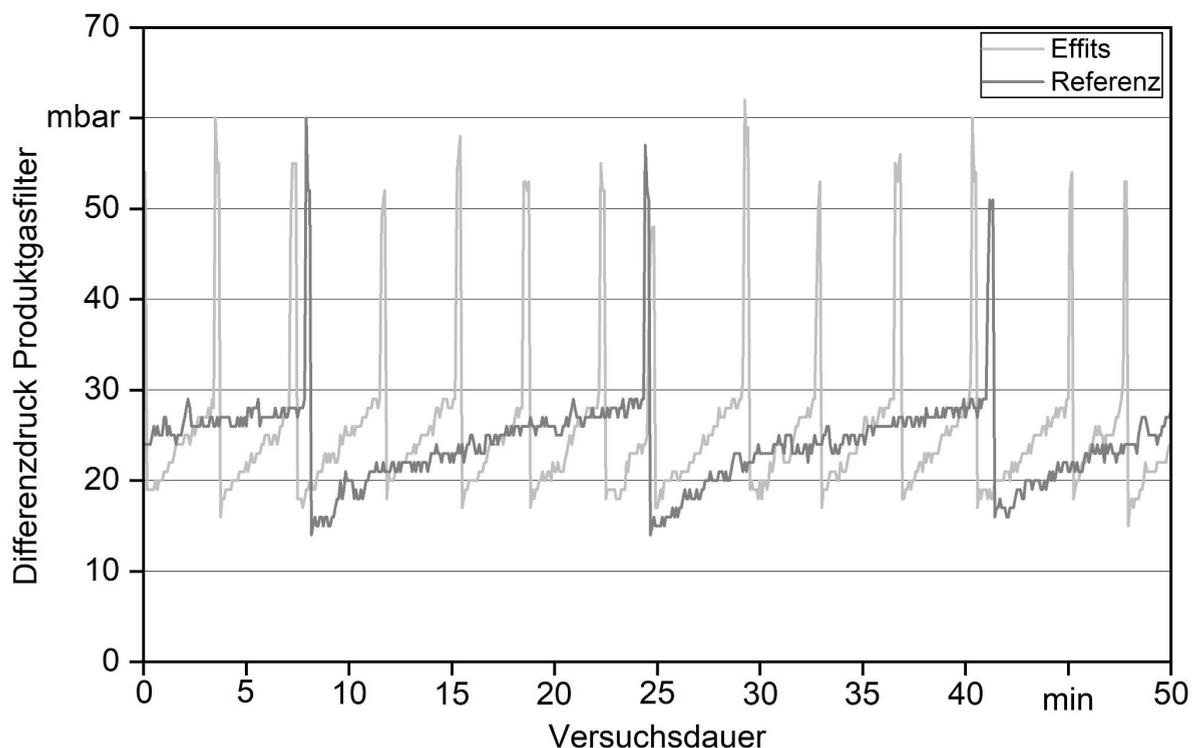


Abbildung 80: Differenzdruck am Produktgasfilter über einen repräsentativ ausgewählten Betrachtungszeitraum von 50 Minuten bei der Nutzung der Effits und der zugehörigen Referenzbrennstoffe in einem Holzgas-BHKW

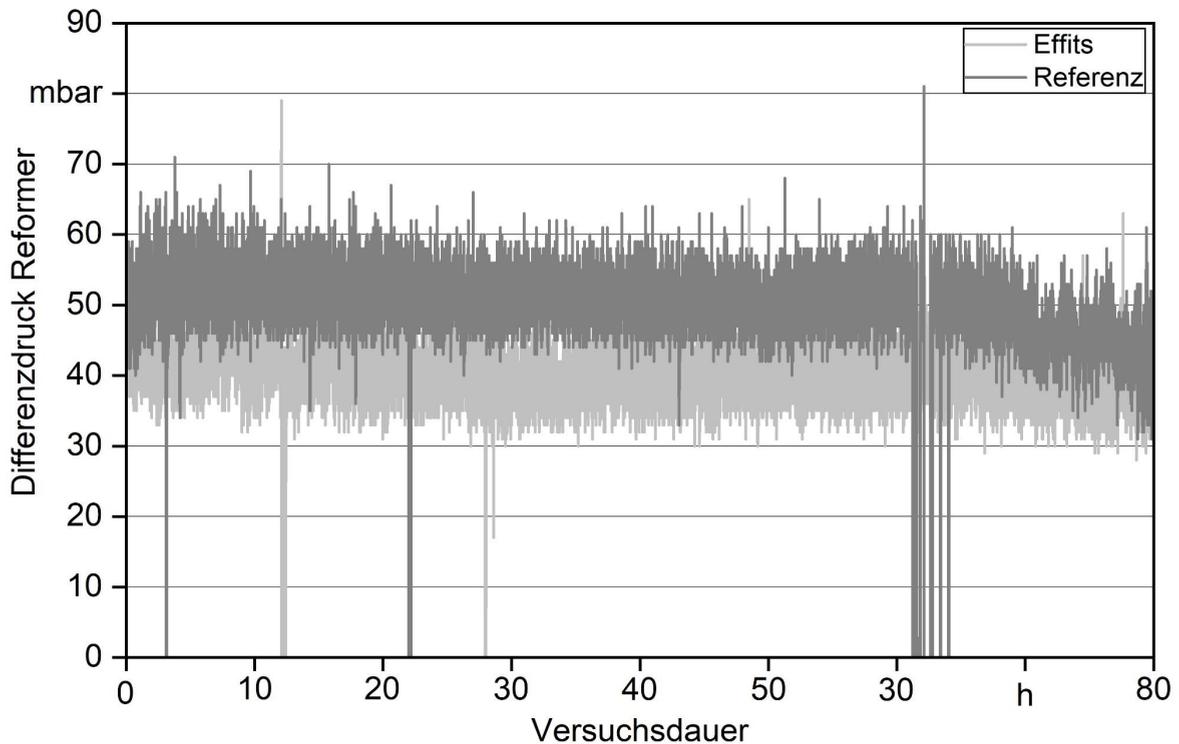


Abbildung 81: Differenzdruck im Reformer über den gesamten Versuchszeitraum von 80 Stunden bei der Nutzung der Effits und der zugehörigen Referenzbrennstoffe in einem Holzgas-BHKW

Ein geringerer Differenzdruck am Reformer weist auf einen besseren Transport des erzeugten Holzgases durch die Oxidations- und Reduktionsschicht des Reformers hin. Eine genauere Einordnung dieser Messdaten bedarf jedoch weiterer Messungen mit einer erhöhten Wiederholungsanzahl und einer präziseren Datenaufzeichnung.

Während der Versuche traten lediglich beim Referenzbrennstoff brennstoffbezogene Störungen auf. Dieser wies eine sehr feine Partikelstruktur auf, was zu einer Überfüllung der Brennstoffschleuse und zu weiteren, daraus resultierenden mechanischen Problemen führte. Diese konnten durch eine Anpassung der Förderschneckendrehzahl des Holzgas-BHKW behoben werden. Die Anpassung wurde sehr zeitig nach Versuchsbeginn vorgenommen, was zur Folge hatte, dass die Auswirkungen der Störung nur sehr geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis nahmen. Versuche in anderen Forschungsprojekten zeigten, dass die Nutzung problematischer Brennstoffe im Regelfall einen deutlichen intensiveren Einfluss auf die Anzahl der Störungen nimmt [73]. Dass beim Einsatz der Effits keine brennstoffbezogenen Störungen am Holzgas-BHKW auftraten, deutet darauf hin, dass ihrer Nutzung in einer dieser Anlagen nichts entgegensteht.

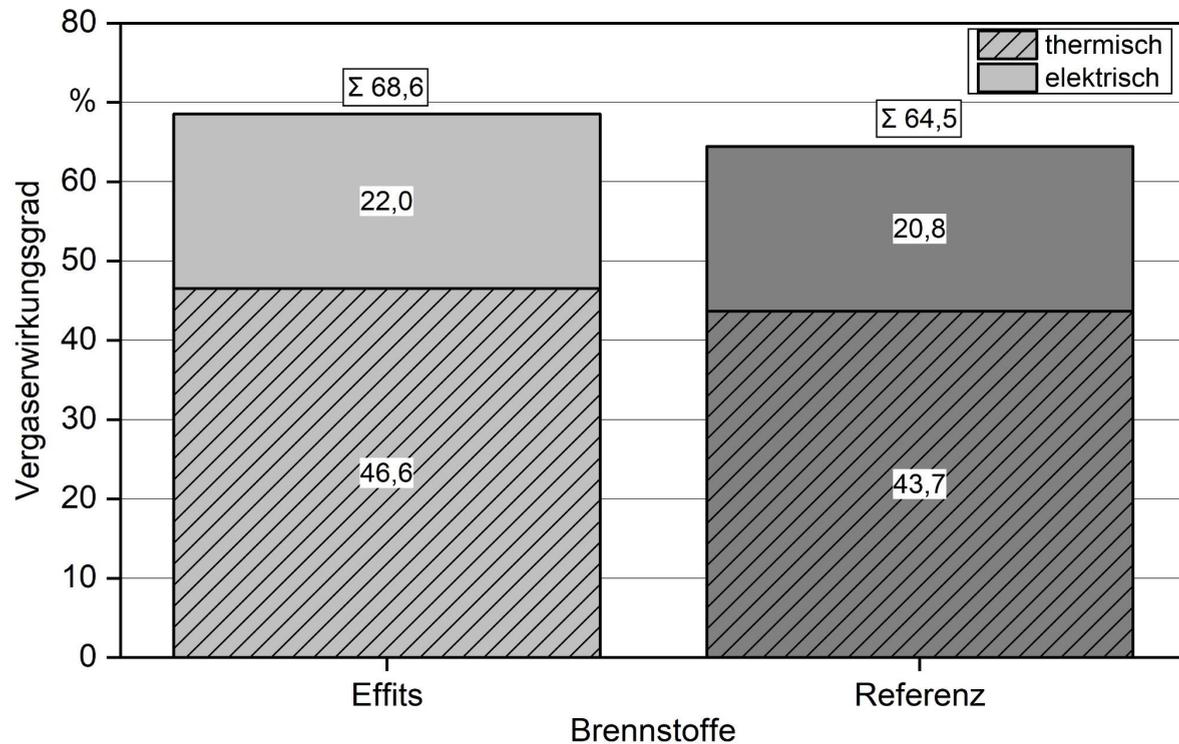


Abbildung 82: Wirkungsgrade des Holzgas-BHKW bei der Nutzung der Brennstoffe aus den Versuchen im industriellen Maßstab, aufgegliedert in den thermischen und den elektrischen Wirkungsgrad ($n = 1$)

Die Wirkungsgrade des Holzgas-BHKW zeigt Abbildung 82. Beide Brennstoffe wiesen Gesamtwirkungsgrade $> 60\%$ auf, die als typisch für die untersuchte Anlage beim Einsatz von Holzbrennstoffen aus Energierundholz angegeben werden können [73].

Bei der Gegenüberstellung der Brennstoffe zeigte sich für die Effits ein höherer elektrischer und thermischer Wirkungsgrad als für die dazugehörigen Referenzbrennstoffe. Der Gesamtwirkungsgrad des Prozesses bei den Effits lag um 4,1 Prozentpunkte höher. Der thermische Wirkungsgrad zeigte größere Differenzen als der elektrische Wirkungsgrad. Die höheren Wirkungsgrade bei der Nutzung der Effits im Vergleich zu den zugehörigen Referenzbrennstoffen decken sich mit den Rückschlüssen, die bereits bei den Auswertungen der Temperaturverläufe und der Differenzdrücke im Reformier gezogen wurden.

Nachdem Versuche zur Förderbarkeit und der damit verbundenen Veränderung der Partikelgrößenverteilung gezeigt haben, dass sich die Effits den Referenzbrennstoffen während der Brennstoffförderung angleichen (siehe Abschnitt 3.2.5.2), und da die Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung bei den Versuchen 2020 bereits vor der Förderung gering waren (siehe Abschnitt 4.2.1), ist davon auszugehen, dass die deutliche Wirkungsgradsteigerung einen anderen Ursprungs hat als allein die Partikelgröße. Eine mögliche Erklärung, die in Zusammenarbeit mit dem Hersteller Spanner Re² diskutiert wurde, ist das zugrunde liegende Prinzip der Zerkleinerung des Effitters 20.30. Durch den speziellen Modus des Abscherens werden die Effits in einem anderen Winkel zur Faserrichtung des Holzes im Vergleich zu konventionellen Trommelhackern abgesichert. Es ist möglich, dass

die neuartige Schnittrichtung zur Faser eine bessere Verfügbarkeit der für die Holzvergasung hauptsächlich relevanten Inhalts- und Extraktstoffe zur Folge hat. Um jedoch valide Aussagen treffen zu können, ob und in welchem Maße sich die neuartige Zerkleinerung auf einzelne Prozessparameter wie beispielsweise die Reformertemperatur auswirkt, wären weitere Untersuchungen mit einer höheren Wiederholungsanzahl, einer größer angelegten Messdatenaufzeichnung und unter Umständen einer computergestützten Simulation der Prozesse im Reformier nötig.

4.3 Zusammenfassung

Bei der Zerkleinerung der Materialien im Jahr 2020 wurde im Effiter eine modifizierte Duplex-Schnecke verwendet, die aufgrund einer geänderten Schneckengeometrie höhere Durchsätze erzielen konnte (2020: 3,5 t_{wf}/h ; 2019: 2,9 t_{wf}/h). Ebenso waren die spezifischen Kraftstoffverbräuche 2020 geringer als 2019 (2020: 4,0 l/t_{wf} ; 2019: 4,5 l/t_{wf}).

Die veränderte Schneckengeometrie schlug sich in den Brennstoffparametern der Effits nieder. Diese zeigten im Vergleich zu 2019 nur sehr geringe Unterschiede in den Feinanteilen sowie nur mäßige Unterschiede bei den groben Partikeln zu den Referenzbrennstoffen. Neben der Schneckengeometrie könnte die Physiognomie des Rohmaterials (Alter, Schädlingsbefall etc.) einen Einfluss hierauf haben, was jedoch nicht abschließend quantifiziert werden konnte. In der Folge wiesen die Effits aus den Versuchen 2020 mit 158 kg/m^3 annähernd dieselbe Schüttdichte auf wie die Referenzhackschnitzel (154 kg/m^3 , jeweils wasserfreie Bezugsbasis).

Der Wassergehalt der Brennstoffe lag mit ca. 40 m-% in einem Bereich, in dem ein mikrobieller Biomasseabbau zu erwarten war. Bei der fünfmonatigen Lagerung in den abgedeckten Lagerhaufwerken zeigten sich zwischen Effits und Referenz jedoch keine markanten Unterschiede bezüglich Trocknung oder Trockenmasseverlust. Dies wird vor allem auf die ähnliche Partikelgrößenverteilung der Effits und der Referenz aufgrund der veränderten Schneckengeometrie und auf den insgesamt niedrigeren Ausgangswassergehalt vor der Lagerung zurückgeführt.

Die Effits verursachten keine Nachteile bei der Verwendung in einem Holzgas-BHKW im kleinen Leistungsbereich. Sie zeigten im Vergleich zu den dazugehörigen Referenzbrennstoffen signifikante Veränderungen bei den Temperaturen sowie den Differenzdrücken im Reformier. Diese Veränderungen bedingen höchstwahrscheinlich die beobachtete Steigerung im Wirkungsgrad der Anlage. Geringfügige Nachteile bei der Haltbarkeit des Produktgasfilters könnten sich durch die Erhöhung der Abreinigungsintervalle ergeben. Um die genauen Mechanismen und Gründe der beobachteten Wirkungsgradsteigerung der Effits zu untersuchen, sind weitere Analysen mit einem höheren Maß an Datenerfassung nötig.

Zusammenfassung

Ziel des Projekts „InnoFuels“ war es, innovative Verfahren zur Produktion und Aufbereitung von Holzbrennstoffen im Praxisversuch zu untersuchen und zu bewerten. Zum Einsatz kamen der Duplex-Schneckenhacker Effiter 20.30 der Firma Alvatec GmbH & Co. KG (Teilvorhaben 1, TFZ) sowie das Hackschnitzelpressverfahren der Firma Bohnert-Technik GmbH (Teilvorhaben 2, HFR). Die Arbeiten zum Effiter 20.30 sind in diesem Bericht wiedergegeben. Die Versuche erfolgten 2019 stationär am TFZ inklusive der Untersuchungen zur Zerkleinerung, zur Lagerung, zur technischen Trocknung, zum Belüftungswiderstand, zur Förderbarkeit und zum Verbrennungsverhalten der Holzbrennstoffe sowie 2020 in Versuchen im industriellen Maßstab, bei denen neben der Brennstoffproduktion auch die Lagerung und die Vergasung in einem dezentralen Holzgas-BHKW analysiert wurden.

Stationäre Versuche mit dem Effiter 20.30: Für die stationären Versuche 2019 wurden aus fünf Sortimenten (Pappel aus einer Kurzumtriebsplantage, Energierundholz aus Fichte und Buche, sowie Waldrestholz aus Nadel- und Laubholz) jeweils mindestens zehn Schüttraummeter (SRM) je Bereitstellungskette hergestellt. Zum Einsatz kamen der Effiter 20.30 und ein Referenzhacker (Trommelhacker). Die Zerkleinerung der Rohmaterialien am Betriebshof des TFZ war in allen Fällen ohne Probleme möglich. Der Duplex-Schneckenhacker erzielte dabei geringere Durchsätze (54 bis 81 % der Referenzmaschine) und wies etwas höhere Kraftstoffverbräuche als der Referenzhacker auf. Die erzeugten Brennstoffe („Effits“) unterschieden sich in allen Fällen beträchtlich von den Referenzbrennstoffen (signifikant geringere Schüttdichten, signifikant höherer Anteil an Partikeln $\geq 31,5$ mm und i. d. R. deutlich geringere Feinanteile). In zwei von fünf Fällen konnten die Effits in keine der Partikelklassen für Kleinfeuerungsanlagen nach DIN EN ISO 17225-4 (P16s, P31s, P45s) eingeordnet werden, während alle Referenzbrennstoffe entweder der Klasse P45s oder der Klasse P31s zuordenbar waren. Auch eine Einordnung nach ENplus war nicht immer möglich.

Die fünfmonatige Lagerung der Brennstoffe direkt nach der Zerkleinerung wurde in Lagerbehältern mit einem Volumen von etwa $0,6 \text{ m}^3$ untersucht. In allen Fällen zeigten die Effits geringere Lagertemperaturen, einen besseren Trocknungserfolg und um 25 bis 73 % geringere Trockenmasseverluste. Die meisten Effits-Brennstoffe erreichten nach der Lagerung Wassergehalte $\leq 20 \text{ m-\%}$, die eine emissionsarme Verbrennung in kleinen Feuerungen zulassen würde. Dies war für die Referenzbrennstoffe häufig nicht der Fall. Analog zu den Behälterversuchen wurden mit den Brennstoffen aus Energierundholz (Fichte) Versuche in ca. 15 SRM großen abgedeckten Haufwerken durchgeführt. Dort zeigten sich dieselben Tendenzen wie in den Lagerbehältern, wenngleich die Ergebnisse heterogener ausfielen.

Trocknungsversuche in der Satzrocknungsanlage des TFZ zeigten für die Effits meist geringfügig höhere Trocknerwirkungsgrade. Dies wird auf die neuartige Partikelstruktur und die dadurch bedingte bessere Belüftbarkeit der Brennstoffe zurückgeführt, die auch bei Versuchen in einem Strömungskanal am TFZ nachgewiesen und mit aktuellen Modellen zum Belüftungswiderstand verglichen wurde. Bei den meisten Brennstoffen waren die Belüftungswiderstände der Effits um 18 bis 48 % geringer als die der Referenzbrennstoffe.

Die Effits zeigten in Förderversuchen eine höhere Anforderung an die Fördertechnik als die Referenzbrennstoffe. Sie wurden durch konventionelle Förderschnecken während des Transports vom Bunker in den Kessel aufgebrochen, was zu einer Erhöhung der Leistungs- und Energieanforderung, zu einer Verminderung des Massenstroms beim Transport als auch zu einer deutlichen Nachzerkleinerung der neuartigen Brennstoffe führte. Nach der Förderung wiesen die Effits starke physikalische Ähnlichkeiten zum Referenzbrennstoff auf. Trotz höherer Belastung war der Transport der Effits ohne einen Ausfall der Fördertechnik möglich.

Bei Verbrennungsversuchen in zwei Hackschnitzelkesseln (TFZ: 20 kW, HFR: 50 kW) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Effits und Referenz. Untersucht wurden neben den Kesselwirkungsgraden sowohl gas- als auch partikelförmige Emissionen. Dies wird auf die Nachzerkleinerung der Effits bei der Förderung in die Brennkammer zurückgeführt. Unterschiede ergaben sich vielmehr durch den Einsatz unterschiedlicher Ausgangssortimente (Pappel, Waldrestholz etc.) und unterschiedlicher Feuerungstechnik. Die Versuche 2019 zeigten, dass die neuartigen Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen geeignet sind, dort jedoch zu keiner Verbesserung des Verbrennungsverhaltens führen. Die derzeit gegebene fehlende Zuordenbarkeit zu einer der internationalen Hackschnitzelgrößenklassen dürfte bei Eigenversorgungsfällen keine Rolle spielen.

Industrielle Versuche mit dem Effiter 20.30: Bei den Versuchen im industriellen Maßstab im Jahr 2020 wurden mit dem Effiter 20.30 und demselben Referenzhacker jeweils ca. 125 SRM Holzhackschnitzel aus Energierundholz (Fichte) erzeugt. Aus 100 SRM je Brennstoff wurde direkt im Anschluss ein Lagerhaufwerk errichtet, um relevante Lagerprozesse über einen Zeitraum von fünf Monaten zu analysieren. Die restlichen 25 SRM je Brennstoff wurden technisch getrocknet und für Versuche zur Vergasung des Materials in einem dezentralen Holzgas-BHKW verwendet.

Bei den Versuchen 2020 kam eine modifizierte Duplex-Schnecke zum Einsatz. Diese führte zu höheren Durchsatzraten (2020: 3,5 t_{wf}/h ; 2019: 2,9 t_{wf}/h) und zu geringeren Kraftstoffverbräuchen (2020: 4,0 l/t_{wf} ; 2019: 4,5 l/t_{wf}) des Effiters 20.30 im Vergleich zu den Versuchen 2019. Gleichzeitig zeigten die Effits aufgrund der geänderten Schneckengeometrie geringere physikalische Unterschiede zu den Referenzbrennstoffen als noch 2019. Im Resultat bestanden zwischen den Brennstoffen keine wesentlichen Unterschiede bei den anschließenden Lagerungsversuchen (Trockenmasseverluste, Trocknungserfolg).

Mit einem Teil der Brennstoffe wurden Versuche an einem Holzgas-BHKW (Spanner Re², 49 kW elektrische Leistung) durchgeführt. Bei der energetischen Nutzung der Effits zeigte sich, dass diese sowohl höhere Temperaturen als auch geringere Differenzdrücke im Reformier hervorriefen. Beide Parameter können einen effizienteren Vergasungsprozess andeuten. Sowohl der thermische als auch der elektrische Wirkungsgrad bei der Nutzung der Effits war höher als bei den Referenzbrennstoffen. Der Gesamtwirkungsgrad lag mit den Effits bei 68,6 %, während mit den Referenzbrennstoffen 64,5 % erreicht wurden.

Quellenverzeichnis

- [1] ANERUD, E.; BERGSTRÖM, D.; ROUTA, J.; ELIASSON, L. (2021): Fuel quality and dry matter losses of stored wood chips – Influence of cover material. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 150, Nr. 7 (July), Art.-Nr. 106109, S.1–7
- [2] ANERUD, E.; LARSSON, G.; ELIASSON, L. (2020): Storage of Wood Chips: Effect of Chip Size on Storage Properties. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Bd. 41, Nr. 2, S. 277–286
- [3] ASSIRELLI, A.; CIVITARESE, V.; FANI GLIULO, R.; PARI, L.; POCHI, D.; SANTANGELO, E.; SPINELLI, R. (2013): Effect of piece size and tree part on chipper performance. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 54, Nr. 7 (July), S. 77–82
- [4] BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F. (2019): Review of efficiencies in comminuting forest fuels. *International Journal of Forest Engineering*, Bd. 30, Nr. 1, S. 45–55
- [5] BOZAGHIAN BÄCKMAN, M.; STRANDBERG, A.; THYREL, M.; BERGSTRÖM, D.; LARSSON, S. H. (2020): Does Mechanical Screening of Contaminated Forest Fuels Improve Ash Chemistry for Thermal Conversion? *Energy Fuels*, Bd. 34, Nr. 12, S. 16294–16301
- [6] BUCHMAYR, M.; GRUBER, J.; HARGASSNER, M.; HOCHENAUER, C. (2015): Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 81, Nr. 10 (October), S. 356–363
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV), in der Fassung vom 01.02.2010. *Bundesgesetzblatt*, Teil I, Bd. 61, Nr. 4, S. 38–56
- [8] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (2020): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 88 Seiten
- [9] CHANDRASEKARAN, S. R.; HOPKE, P. K.; RECTOR, L.; ALLEN, G.; LIN, L. (2012): Chemical Composition of Wood Chips and Wood Pellets. *Energy & Fuels*, Bd. 26, Nr. 8, S. 4932–4937
- [10] DAUGBJERG-JENSEN, P.; MATTSSON, J. E.; KOFMAN, P. D.; KLAUSNER, A. (2004): Tendency of wood fuels from whole trees, logging residues and roundwood to bridge over openings. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 26, Nr. 2, S. 107–113
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2001): DIN 22022-2. Feste Brennstoffe. Bestimmung der Gehalte an Spurenelementen. Teil 2: ICP-OES. Februar 2001. Berlin: Beuth Verlag, 3 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2009): DIN EN ISO 11885. Wasserbeschaffenheit. Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES). September 2009. Berlin: Beuth Verlag, 37 Seiten
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16968. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung von Spurenelementen. September 2015. Berlin: Beuth Verlag, 19 Seiten

- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134-1. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Wassergehaltes. Ofentrocknung. Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser. Referenzverfahren. Dezember 2015. Berlin: Beuth Verlag, 12 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 16948. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. September 2015. Berlin: Beuth Verlag, 16 Seiten
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 16967. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung von Hauptelementen. Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti. Juli 2015. Berlin: Beuth Verlag, 20 Seiten
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 16994. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor. Dezember 2016. Berlin: Beuth Verlag, 18 Seiten
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17827-1. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe. Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber. Oktober 2016. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung der Schüttdichte. Mai 2016. Berlin: Beuth Verlag, 18 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Aschegehalts. März 2016. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN 590. Kraftstoffe. Dieselkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Oktober 2017. Berlin: Beuth Verlag, 19 Seiten
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 14780. Biogene Festbrennstoffe. Probenherstellung. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 31 Seiten
- [23] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18125. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Heizwerts. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 61 Seiten
- [24] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18135. Biogene Festbrennstoffe. Probenahme. August 2017. Berlin: Beuth Verlag, 69 Seiten
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 21404. Biogene Festbrennstoffe. Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens. Juni 2020. Berlin: Beuth Verlag, 37 Seiten
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 21945. Biogene Festbrennstoffe. Vereinfachtes Verfahren zur Probenahme an kleinen Anlagen. Juni 2020. Berlin: Beuth Verlag, 29 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Oktober 2021. Berlin: Beuth Verlag, 78 Seiten

- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe. Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Juni 2021. Berlin: Beuth Verlag, 17 Seiten
- [29] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI) (2016): EN*plus*-Hackschnitzel. Handbuch für die EN*plus*-Qualitätszertifizierung von Holzhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4. Version 1.0, 1. September 2016. Berlin. Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI), 21 Seiten
- [30] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Hackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschgehalt. Berichte aus dem TFZ, Nr. 46. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 150 Seiten, ISSN 1614-1008
- [31] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; BOSCH, F.; BÖSWIRTH, T.; BRYZINSKI, T.; EFFENBERGER, M.; HAAS, R.; HIJAZI, O.; HÜLSBERGEN, K.-J.; JORISSEN, T.; KLEIN, D.; MAZE, M.; RICHTER, K.; RÖDER, H.; SCHULZ, C.; SERDJUK, M.; STRIMITZER, L.; WIDMANN, B.; TIEMANN, A.; WEBER-BLASCHKE, G.; WOLF, C.; ZERLE, P.; REMMELE, E. (2016): ExpResBio – Ergebnisse. Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Abschlussbericht – Langfassung. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 748 Seiten, ISSN 1614-1008
- [32] ELIASSON, L.; HOFSTEN, H. VON; JOHANNESSON, T.; SPINELLI, R.; THIERFELDER, T. (2015): Effect of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers. Croatian Journal of Forest Engineering, Bd. 36, Nr. 1, S. 11–17
- [33] ERBER, G.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. (2016): Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. Scandinavian Journal of Forest Research, Bd. 31, Nr. 3, S. 294–301
- [34] ERGUN, S. (1952): Fluid flow through packed columns. Chemical engineering progress, Bd. 48, Nr. 2, S. 89–94
- [35] FACELLO, A.; CAVALLO, E.; MAGAGNOTTI, N.; PALETTO, G.; SPINELLI, R. (2013): The effect of knife wear on chip quality and processing cost of chestnut and locust fuel wood. Biomass and Bioenergy, Bd. 59, Nr. 12 (December), S. 468–476
- [36] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2017): Marktübersicht Hackschnitzelheizungen. 5. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 61 Seiten
- [37] FERRERO, F.; MALOW, M.; NOLL, M. (2011): Temperature and gas evolution during large scale outside storage of wood chips. European Journal of Wood and Wood Products, Bd. 69, Nr. 4, S. 587–595
- [38] GENDEK, A.; NAWROCKA, A. (2014): Effect of chipper knives sharpening on the forest chips quality. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture, Bd. 64, S. 97–107

- [39] GÖßWEIN, S.; HIENDLMEIER, S. (2020): Energieholzmarkt Bayern 2018. Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 147 Seiten
- [40] GRUBECKI, I. (2015): Airflow versus pressure drop for a mixture of bulk wood chips and bark at different moisture contents. *Biosystems Engineering*, Bd. 139, Nr. 11 (November), S. 100–110
- [41] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Leitfaden. 3., vollst. überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 192 Seiten, ISBN 3-00-011041-0
- [42] HASTREITER, H. (2020): Schadholzmenge 2019 auf Rekordhoch. *LWF aktuell*, Bd. 127, S. 35–37
- [43] HINTERREITER, S.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P. (2012): Method for determining bridging properties of biomass fuels – experimental and model approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 2, Nr. 2, S. 109–21
- [44] HOFMANN, N.; BORCHERT, H. (2022): Influence of fuel quality and storage conditions on oxygen consumption in two different wood chip assortments – Determination of the storage-stable moisture content. *Fuel*, Bd. 309, Nr. 2 (February), S. 122196, 1–9
- [45] 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
- [46] JIRJIS, R. (1995): Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 9, Nr. 1–5, S. 181–190
- [47] JIRJIS, R. (2005): Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 28, Nr. 2, S. 193–201
- [48] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer Verlag, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [49] KARAJ, S.; MEISSNER, K.; MÜLLER, J. (2012): Geometric vs. aerodynamic diameter for modelling airflow resistance of wood chip. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING (CIGR-AGENG2012), Agriculture & Engineering for a Healthier Life, July 8-12, 2012, Valencia, Spain, S. 1-7
- [50] KENGHE, R.; NIMKAR, P.; SHIRKOLE, S.; SHINDE, K. (2012): Airflow resistance in soybean. *International Agrophysics*, Bd. 26, S. 137–143
- [51] KLEIN, D.; WOLF, C.; SCHULZ, C.; WEBER-BLASCHKE, G. (2015): 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector. State of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 20, Nr. 4, S. 556–575

- [52] KLEIN, D.; WOLF, C.; SCHULZ, C.; WEBER-BLASCHKE, G. (2016): Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change. *The Science of the Total Environment*, Bd. 539, Nr. 1 (January), S. 45–60
- [53] KONS, K.; BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F. (2015): Effects of sieve size and assortment on wood fuel quality during chipping operations. *International Journal of Forest Engineering*, Bd. 26, Nr. 2, S. 114–123
- [54] KRISTENSEN, E. F.; KOFMAN, P. D. (2000): Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 18, Nr. 3, S. 175–180
- [55] 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
- [56] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2015): The effect of raw material and machine setting on chipping performance and fuel quality – a German case study. *International Journal of Forest Engineering*, Bd. 26, Nr. 1, S. 60–70
- [57] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2021): Influence of tree species and machine settings on chip quality and specific energy consumption of a stationary drum chipper. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 155, Nr. 5, S. 106305, 1–13
- [58] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2021): Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical fuel parameters. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 145, Nr. 2 (February) S. 1–11
- [59] KUPTZ, D.; HARTMANN, H. (2022): Evaluation of Fuel Quality, Throughput Rate and Energy Consumption During Non-Industrial Wood Chip Production with Three PTO Driven Chippers. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Bd. 43, Nr. 1, S. 109–122
- [60] KUPTZ, D.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; LESCHE, S.; RIEBLER, M.; SCHULMEYER, F.; SCHÖN, C.; BURGER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2020): Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 70. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 328 Seiten, ISSN 1614-1008
- [61] 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*, Bd. 9, Nr. 1, S. 83–98
- [62] 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

- [63] 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*, Bd. 96, Nr. 1 (January), S. 119–129
- [64] MORÁN, J. C.; MÍGUEZ, J. L.; PORTEIRO, J.; PATIÑO, D.; GRANADA, E. (2015): Low-Quality Fuels for Small-Scale Combustion Boilers. An Experimental Study. *Energy Fuels*, Bd. 29, Nr. 5, S. 3064–3081
- [65] NATI, C.; ELIASSON, L.; SPINELLI, R. (2014): Effect of Chipper Type, Biomass Type and Blade Wear on Productivity, Fuel Consumption and Product Quality. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Bd. 35, Nr. 1, S. 1–7
- [66] NATI, C.; MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. (2015): The improvement of hog fuel by removing fines, using a trommel screen. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 75, Nr. 4 (April), S. 155–160
- [67] NATI, C.; SPINELLI, R.; FABBRI, P. (2010): Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 34, Nr. 5, S. 583–587
- [68] NOLL, M.; JIRJIS, R. (2012): Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Bd. 95, Nr. 3, S. 551–563
- [69] OLAVE, R. J.; FORBES, E.G.A.; JOHNSTON, C. R.; RELF, J. (2017): Particulate and gaseous emissions from different wood fuels during combustion in a small-scale biomass heating system. *Atmospheric Environment*, Bd. 157, Nr. 5 (May), S. 49–58
- [70] 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*, Bd. 116, Nr. 2, S. 140–150
- [71] PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C.; DARIES, W.; EHLERT, D. (2014): Development of biophysical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 65, Nr. 7 (July), S. 13–19
- [72] PECENKA, R.; LENZ, H.; JEKAYINFA, S. O.; HOFFMANN, T. (2020): Influence of Tree Species, Harvesting Method and Storage on Energy Demand and Wood Chip Quality When Chipping Poplar, Willow and Black Locust. *Agriculture*, Bd. 10, Nr. 4, S. 1–16
- [73] POLLEX, A.; LESCHE, S.; KUPTZ, D.; ZENG, T.; KUFFER, G.; MÜHLENBERG, J.; HARTMANN, H.; LENZ, V. (2020): Influence of Screening and Drying on Low-Quality Wood Chips for Application in Small-Scale Gasification Plants. *Chemical Engineering Technology*, Bd. 43, Nr. 8, S. 1–14
- [74] QUINTERO-MARQUEZ, A.; BERNARD, C.; ZOULALIAN, A.; ROGAUME, Y. (2014): Improving the Operation of an Automatic Wood Chip Boiler by Optimizing CO Emissions. *Energy & Fuels*, Bd. 28, Nr. 3, S. 2152–2159
- [75] RAMSIN, L.K. (1928): Der Gaswiderstand verschiedener Schüttstoffe. *Die Wärme*, Bd. 51, S. 301-303
- [76] RÖSER, D.; MOLA-YUDEGO, B.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; GRITTEN, D.; EMER, B.; VÄÄTÄINEN, K.; ERKKILÄ, A. (2011): Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 35, Nr. 10, S. 4238–4247

- [77] ROUTA, J.; KOLSTRÖM, M.; RUOTSALAINEN, J.; SIKANEN, L. (2015): Validation of prediction models for estimating the moisture content of small diameter stem wood. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Bd. 36, Nr. 2, S. 283–291
- [78] 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*, Bd. 9, Nr. 1, S. 71–82
- [79] SERRANO, C.; PORTERO, H.; MONEDERO, E. (2013): Pine chips combustion in a 50kW domestic biomass boiler. *Fuel*, Bd. 111, S. 564–573
- [80] SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2012): Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, Bd. 26, Nr. 1, S. 380–390
- [81] SPANNER RE² GMBH (2022): Strom & Wärme aus Holz – CO₂-neutrale Holz-Kraft-Anlagen von Spanner Re². URL: <https://www.holz-kraft.com/de/holzvergaser/holz-kraft-anlage.html> (Stand: 05.05.2022)
- [82] SPINELLI, R.; GLUSHKOV, S.; MARKOV, I. (2014): Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 62, S. 117–122
- [83] SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. (2012): The Effect of Raw Material, Cut Length, and Chip Discharge on the Performance of an Industrial Chipper. *Forest Products Journal*, Bd. 62, Nr. 7–8, S. 584–589
- [84] SPINELLI, R.; MARCHI, E. (2021): Trends and Perspectives in the Design of Mobile Wood Chippers. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Bd. 42, Nr. 1, S. 25–38
- [85] VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. (2010): An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, Bd. 89, Nr. 5, S. 913–933
- [86] WETTERKONTOR GMBH (2022): Monats- und Jahreswerte für Straubing. URL: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp> (Stand: 04.05.2022)
- [87] WHITTAKER, C.; YATES, N. E.; POWERS, S. J.; MISSELBROOK, T.; SHIELD, I. (2018): Dry matter losses and quality changes during short rotation coppice willow storage in chip or rod form. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 112, Nr. 5 (May), S. 29–36
- [88] YAZDANPANA, F.; SOKHANSANJ, S.; LAU, A. K.; LIM, C. J.; BI, X.; MELIN, S. (2011): Air-flow versus pressure drop for bulk wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 35, Nr. 5, S. 1960–1966

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

- 1 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
- 2 Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
- 3 Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
- 4 Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
- 5 Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
- 6 Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
- 7 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
- 8 Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
- 9 Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
- 10 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
- 11 Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
- 12 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- 13 Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
- 19 Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis

- 20 Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
- 21 Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
- 22 Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
- 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
- 24 Charakterisierung von Holzbriketts
- 25 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
- 26 Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
- 27 Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
- 28 Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
- 29 Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
- 30 Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
- 31 Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der 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 ExpRessBio – 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 ExpRessBio-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 Amaranth 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_x-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 Grundlagenorientierte Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf ein Motorsystem der Abgasstufe V (EVOLUM)
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie
- 73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen
- 74 Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln
- 75 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie
- 76 Mineralisch verschmutzte Holzbrennstoffe – Teil 1: Auswirkung auf die Verbrennung
- 77 Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Thermische Verwertung
- 82 Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker

