



40

Berichte aus dem TFZ

Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel

Projektpartner

LWF Bayerische Landesanstalt
für Wald und Forstwirtschaft



Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel



Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel

Dr. Daniel Kuptz (TFZ)
Fabian Schulmeyer (LWF)
Karl Hüttl (LWF)
Dr. Elke Dietz (LWF)
Peter Turowski (TFZ)
Dr. Florian Zormaier (LWF)
Dr. Herbert Borchert (LWF)
Dr. Hans Hartmann (TFZ)

**Straubing und Freising-Weihenstephan,
April 2015**

Titel: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel

Projektleiter: Dr. Hans Hartmann (TFZ) Fabian Schulmeyer (LWF)

Autoren: Dr. Daniel Kuptz (TFZ) Fabian Schulmeyer (LWF)
Peter Turowski (TFZ) Karl Hüttl (LWF)
Dr. Hans Hartmann (TFZ) Dr. Elke Dietz (LWF)
Dr. Florian Zormaier (LWF)
Dr. Herbert Borchert (LWF)

Mitarbeiter: Albert Maierhofer (TFZ) Florian Mergler (LWF)
Alexander Marks (TFZ) Dr. Uwe Blum (LWF)
Stefan Winter (TFZ) Irmgard Kern (LWF)
Thomas Kieslinger (TFZ) Corinna Fadler (LWF)
Anja Rocktäschel (TFZ)
Sophie Hlawatsch (TFZ)
Sonja Plankl (TFZ)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen K/10/17 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.12.2010 bis 31.12.2013. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Alle Rechte vorbehalten.

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

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

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. Daniel Kuptz, Fabian Schulmeyer, Karl Hüttl

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2015

Gestaltung: Dr. Daniel Kuptz, Fabian Schulmeyer, Karl Hüttl,
Stephanie Neumeier

Fotonachweis: Kuptz, Schulmeyer, Hüttl, Mergler

Inhaltsverzeichnis_Toc417571311

Abbildungsverzeichnis 11

Tabellenverzeichnis..... 19

1 Einleitung 27

2 Problemstellung 29

3 Zielsetzung und Aufbau der Forschungsarbeit 31

4 Prozessanalyse der Hackschnitzelbereitstellung 33

4.1 Stand des Wissens33

4.1.1 Grundsätzliches zur Waldholznutzung33

4.1.2 Forstwirtschaftliche Verfahrenstechnik.....39

4.1.2.1 Die Elemente forstwirtschaftlicher Verfahrensketten zur Bereitstellung von
Waldhackschnitzeln39

4.1.2.2 Maschinenausstattung für die Holzernte und die Holzbringung42

4.1.2.3 Maschinenausstattung des Verfahrensschritts „Hacken“44

4.1.2.4 Transportfahrzeuge46

4.1.3 Kombination und Kopplung forstwirtschaftlicher Verfahrensschritte48

4.1.4 Forstwissenschaftliche Arbeitsstudien.....49

4.1.5 Ermittlung von Produktivität und Kosten.....52

4.2 Material und Methoden 54

4.2.1 Expertenbefragung 54

4.2.2 Definition von Modellverfahrensketten zur Bereitstellung von
Waldhackschnitzeln 54

4.2.3 Ermittlung von Leistungs- und Kostenwerten für die
Modellverfahrensketten55

4.2.4 Methodik der Arbeitsstudien57

4.2.4.1 Arbeitsstudien zum Verfahrensschritt Hacken 61

4.2.4.2 Fallstudie: Gekoppelte Verfahrensschritte Hacken und Logistik64

4.2.4.3 Fallstudie Sailershausen: Erstdurchforstung und Feinerschließung mit
Harvester und nachgerüsteter Sammeleinheit67

4.2.4.4 Fallstudie Eurasburg: Altdurchforstung mit Harvester –
Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“70

4.2.4.5 Fallstudien: Hackschnitzelproduktion aus Flurholz72

4.2.5 Messung des Kraftstoffverbrauchs und der Durchsatzleistung der
Maschinen74

4.3 Ergebnisse76

4.3.1 Expertenbefragung76

4.3.1.1 Erster Fragenkomplex: Verfahrensketten und Maschinenausstattung
(Fragen 1, 2 und 11).....76

4.3.1.2 Zweiter Fragenkomplex: Verwendete Waldrestholzsortimente, Herkünfte
der Waldhackschnitzel 2010 (Fragen 3 und 16).....80

4.3.1.3 Dritter Fragenkomplex: Betriebsablauf Hacken (Fragen 4 bis 8)82

4.3.1.4 Vierter Fragenkomplex: Brennstoffspezifikationen, Qualität, Normung und
Zertifizierung (Frage 9 und 10)83

4.3.1.5	Fünfter Fragenkomplex: Probleme und Schwachstellen, Forschungsbedarf, Hilfsmittel (Fragen 12 bis 14).....	85
4.3.1.6	Sechster Fragenkomplex: Vermarktungsstrukturen (Fragen 15 und 17).....	86
4.3.1.7	Fazit zur Expertenbefragung.....	87
4.3.2	Modellverfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln.....	88
4.3.3	Leistungs- und Kostenwerte für die Modellverfahrensketten.....	90
4.3.3.1	Ermittlung von Leistungs- und Kostenwerten für die Verfahrensschritte.....	90
4.3.3.2	Zusammenführung der Leistungs- und Kostenwerte.....	95
4.3.3.3	Fazit zu den Kosten und Leistungswerten der Modellverfahrensketten.....	97
4.3.4	Ergebnisse der Arbeitsstudien.....	98
4.3.4.1	Arbeitsstudien zum Verfahrensschritt Hacken.....	98
4.3.4.2	Fallstudien: Gekoppelte Verfahrensschritte Hacken und Logistik.....	112
4.3.4.3	Fallstudie Sailershausen: Erstdurchforstung und Feinerschließung mit Harvester und nachgerüsteter Sammeleinheit.....	122
4.3.4.4	Fallstudie Eurasburg: Altdurchforstung mit Harvester – Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“.....	134
4.3.4.5	Fallstudien: Hackschnitzelproduktion aus Flurholz.....	144
4.3.5	Kraftstoffverbrauch und Durchsatzleistung beim Verfahrensschritt Hacken...	148
5	Hackschnitzelqualität (physikalisch)	153
5.1	Stand des Wissens	153
5.1.1	Definition Qualitätshackschnitzel.....	153
5.1.1.1	Qualitätsparameter Wassergehalt.....	154
5.1.1.2	Qualitätsparameter Aschegehalt.....	155
5.1.1.3	Qualitätsparameter Heizwert.....	155
5.1.1.4	Qualitätsparameter Partikelgröße und Partikelform.....	156
5.1.1.5	Qualitätsparameter Fremdanteil.....	156
5.1.1.6	Produktnormen für feste Brennstoffe.....	157
5.1.1.7	Qualitäts- und Nachhaltigkeitsnachweise für die Praxis.....	157
5.1.2	Beeinflussung der Hackschnitzelqualität.....	158
5.1.2.1	Herstellungsbedingte Einflüsse.....	158
5.1.2.2	Rohstoffbedingte Einflüsse.....	161
5.2	Material und Methoden.....	162
5.2.1	Feldmessungen.....	162
5.2.2	Stationäre Hackversuche (elektrischer Trommelhacker).....	165
5.2.2.1	VecoPlan-Trommelhacker.....	165
5.2.2.2	Messerschärfe, Siebkorb und Einzugswalzengeschwindigkeit.....	166
5.2.2.3	Rohmaterial.....	166
5.2.2.4	Zusammenfassung des Messprogramms.....	167
5.2.3	Stationäre Versuche (zapfwellenbetriebene Hacker).....	168
5.2.3.1	Verwendete Maschinen.....	168
5.2.3.2	Prozessvarianten.....	169
5.2.4	Hackschnitzelanalysen.....	170
5.2.4.1	Gesamtmasse der Probe.....	170
5.2.4.2	Probenhomogenisierung und Probenteilung.....	170
5.2.4.3	Schüttdichte und Stauchfaktor.....	172
5.2.4.4	Wassergehalt.....	173
5.2.4.5	Probentrocknung.....	173
5.2.4.6	Siebanalyse.....	174
5.2.4.7	Bildanalyseverfahren.....	175
5.2.4.8	Probenzerkleinerung.....	178
5.2.4.9	Aschegehalt und Heizwert.....	178

5.3	Ergebnisse und Diskussion der Feldversuche	179
5.3.1	Probenherkunft	179
5.3.2	Physikalische Brennstoffeigenschaften	180
5.3.2.1	Wassergehalt.....	180
5.3.2.2	Aschegehalt und Heizwert.....	181
5.3.2.3	Schüttdichte und Stauchfaktor.....	184
5.3.2.4	Partikelgröße und Partikelform	186
5.4	Auszug: Stoffliche Hackschnitzelqualität (TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“)	189
5.5	Ergebnisse und Diskussion der stationären Hackversuche.....	190
5.5.1	Stationäre Versuche (elektrischer Trommelhacker)	190
5.5.1.1	Physikalische Eigenschaften des Rohmaterials	190
5.5.1.2	Schüttdichte und Stauchfaktor.....	191
5.5.1.3	Partikelgröße und Partikelform	193
5.5.2	Stationäre Versuche (zapfwellenbetriebene Hacker)	196
5.5.2.1	Physikalische Eigenschaften des Rohholzes	196
5.5.2.2	Schüttdichte und Stauchfaktor.....	197
5.5.2.3	Partikelgrößenverteilung und Partikelform	198
5.6	Zusammenfassung der Einflüsse auf die physikalische Hackschnitzelqualität.....	203
6	Energiebedarf und Durchsatzleistung (stationär).....	207
6.1	Stand des Wissens.....	207
6.1.1	Kraftstoffbedarf forstwirtschaftlicher Maschinen.....	207
6.1.2	Durchsatzleistung von Hackern.....	208
6.2	Material und Methoden	209
6.2.1	Volumen und Masse des Rohmaterials.....	209
6.2.2	Durchführung der stationären Hackversuche	210
6.2.2.1	Energiebedarfsmessung des elektrischen Trommelhackers.....	211
6.2.2.2	Kraftstoffbedarfsmessung der zapfwellenbetriebenen Hacker.....	211
6.2.2.3	Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Hackzeiten	212
6.2.3	Bestimmung der Hackschnitzelvolumens.....	214
6.3	Ergebnisse und Diskussion der stationären Hackversuche mit dem elektrischen Trommelhacker.....	215
6.3.1	Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers	215
6.3.2	Energiebedarf des elektrischen Trommelhackers	217
6.3.3	Vergleich der Ergebnisse mit den Feldversuchen.....	219
6.4	Ergebnisse und Diskussion der stationären Versuche mit drei zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistungsklasse	220
6.4.1	Durchsatzleistung	220
6.4.2	Energiebedarf	223
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse (stationäre und Feld).....	227
6.5.1	Einfluss auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf.....	227
6.5.2	Empfehlungen für die Praxis	229

7	Belüftungswiderstand bei der technischen Hackguttrocknung.....	231
7.1	Stand des Wissens	231
7.1.1	Trocknungsarten	231
7.1.1.1	Natürliche Trocknung	231
7.1.1.2	Technische Trocknung.....	232
7.1.2	Belüftungswiderstand bei der technischen Hackguttrocknung	233
7.1.3	Wahl des Gebläses für die technische Hackguttrocknung	234
7.2	Material und Methoden.....	235
7.2.1	Versuchsaufbau	235
7.2.2	Berechnung des Belüftungswiderstands.....	237
7.2.3	Modellierung des Belüftungswiderstands	238
7.3	Ergebnisse und Diskussion der Belüftungswiderstandsmessungen	240
7.3.1	Spezifischer Belüftungswiderstand	240
7.3.2	Modellierung des Belüftungswiderstands	243
7.3.2.1	Ermittlung der materialspezifischen Parameter a und b	243
7.3.2.2	Modellentwicklung mittels multipler linearer Regressionsanalyse	244
7.4	Schlussfolgerung.....	251
8	Umrechnungsfaktoren und Schätzverfahren	253
8.1	Stand des Wissens	253
8.1.1	Forst- und holzwirtschaftliche Maßeinheiten.....	253
8.1.2	Schätzverfahren für zu erwartende Hackschnitzelmengen	254
8.2	Material und Methoden.....	257
8.2.1	Charakterisierung der Hackholzpolter.....	257
8.2.2	Volumenermittlung	257
8.2.2.1	Messungen bei den Hackereinsätzen im Wald.....	257
8.2.2.2	Geometrische Formen zur Beschreibung des Poltervolumens	258
8.2.2.3	Volumenmessung bei den stationären Hackversuchen am TFZ.....	261
8.2.2.4	Volumenmessung der produzierten Hackschnitzel.....	262
8.3	Ergebnisse.....	263
8.3.1	Schätzverfahren und Umrechnungsfaktoren aus den Feldversuchen.....	263
8.3.1.1	Geometrische Formen zur Beschreibung des Poltervolumens	263
8.3.1.2	Beziehungen zwischen den geometrischen Körpern.....	263
8.3.1.3	Umrechnungsfaktoren.....	265
8.3.2	Umrechnungsfaktoren bei den stationären Versuchen am TFZ.....	267
8.4	Ableitung praxistauglicher Schätzverfahren.....	273
8.4.1	Poltervolumen	273
8.4.2	Umrechnungsfaktoren.....	275
	Zusammenfassung	277
	Quellenverzeichnis	285

9	Anhang.....	301
9.1	Fragebogen zur Expertenbefragung.....	301
9.2	Literaturquellen zu Modellverfahrensketten.....	302
9.3	Literaturwerte zu Modellverfahrensketten.....	305
9.4	Einzelvarianten mit dem elektrischen Trommelhacker.....	314
9.5	Vorversuche zum Belüftungswiderstand.....	316

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafte Polter aus Waldrestholz (A) und Energierundholz (B).	35
Abbildung 2:	Schematische Darstellung alternativer Holzsortimentierung. Die grauen Flächen stellen im Beispiel die technisch genutzten Sortimente dar.....	36
Abbildung 3:	Grundmuster der Verfahrensketten (Restholzverfahrensketten und Verfahrensketten mit Fällung) und enthaltene Verfahrensschritte	39
Abbildung 4:	Hackschnitzelshuttle im Einsatz (A), Vortrocknen eines Hackholzpolters auf einer Wiese (B).....	40
Abbildung 5:	Beispiele für ein Fäller-Bündler-Aggregat (A = Nahaufnahme, B = im Einsatz).....	42
Abbildung 6:	Beispiel eines Anhängenhackers (A), Hackertrommel und Einzugstisch mit Einzugsband und Einzugstrommel (B)	45
Abbildung 7:	Lkw-Aufbauhacker (A) und selbstfahrender Hacker (B)	45
Abbildung 8:	Landwirtschaftlicher Kippanhänger (17 m ³) an Traktor (A), Abschiebewagen (45 m ³) an Traktor (B).....	46
Abbildung 9:	Lkw-Motorwagen mit Hakenlift beim Absetzen eines Containers am Umladeplatz (A) und in typischer Beladestellung am Hacker im Wald (B)	47
Abbildung 10:	Sattelschlepper mit Schubboden-Auflieger bei der Befüllung am Hacker (A), Detailansicht der Schubbodenelemente im Aufliegerboden (B)	48
Abbildung 11:	Beispielhafte Darstellung der Kopplung innerhalb einer Bereitstellungskette. Harvester und Forwarder arbeiten voneinander und vom Hacker unabhängig (entkoppelt), während Hacker und Lkw aufeinander abgestimmt werden müssen (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet).....	48
Abbildung 12:	Zeitaufnahmegerät Timba-Tec Recon (A) und Beispiel einer Zeitstudienmaske (B)	59
Abbildung 13:	Häufigste Verfahrensketten bei der Waldhackschnitzelbereitstellung (n = 36)	76
Abbildung 14:	Verwendete Maschinen beim Verfahrensschritt „Fällen“ (n = 36)	77
Abbildung 15:	Verwendete Maschinen beim Verfahrensschritt „Vorliefern/Vorkonzentrieren“(links) und beim Verfahrensschritt „Rücken“ (n = 36)	77
Abbildung 16:	Verwendete Hacker (links, Einteilung nach Bauweise) und Fahrzeuge beim Verfahrensschritt „Transport“ (n = 29)	78
Abbildung 17:	Zur Produktion von Waldhackschnitzeln am häufigsten verwendete Hackholzsortimente (n = 36).....	81

Abbildung 18:	Jährliche Waldhackschnitzelvermarktungsmengen der Befragungsgruppen FBG/WBV, Hackerunternehmer und das ZfE (n = 14).....	86
Abbildung 19:	Übersicht über die definierten Modellverfahrensketten I bis IV mit Angabe der Zielsortimente (Kombi: stofflich/energetisch kombiniert; EH: primäre Energieholzverfahren; Restholz: Restholzverfahren ohne Fällung und Aufarbeitung, im Waldbestand nur Vorliefern bei vorangehendem motormanuellem Hieb).....	89
Abbildung 20:	Leistungsbereiche für die Verfahrensschritte Fällern (inkl. Aufarbeiten und Vorliefern), Rückung und Hacken für die Modellverfahrensketten in Srm/h (MAS). Angegeben sind Mittel-, Minimal- und Maximalwert.....	95
Abbildung 21:	Kostenbereiche für die Verfahrensschritte Fällern (inkl. Aufarbeiten und Vorliefern), Rückung und Hacken sowie Gesamtkosten für die Modellverfahrensketten in €/Srm. Angegeben sind Mittel-, Minimal- und Maximalwert. Zu beachten ist, dass für die MVK II als Restholzverfahrenskette keine Kosten für Fällern und Aufarbeiten hinterlegt sind. Bei vorangehendem motormanuellem Hieb ist hier jedoch das Vorliefern des Hackholzes zur Rückegasse zu berücksichtigen.....	96
Abbildung 22:	Überwiegende Baumartengruppen in den Hackholzpoltern (Fi: Fichte, Kie: Kiefer, HLbh: Hartlaubholz, WLbh: Weichlaubholz, Mix: Buntmischung). Bei 4 der 38 Einsätze wurden getrennt gepoltert je zwei Baumartengruppen vorgefunden, die Gesamtzahl beträgt daher 42.....	99
Abbildung 23:	In den Arbeitsstudien verwendete Siebeinsätze in mm nach Häufigkeit (n = 38).....	100
Abbildung 24:	Bei den Arbeitsstudien beobachtete Transportfahrzeuge (CL: Container-Lkw, SB: Schubboden-Lkw, CL+SB: Kombination von Container-Lkw und Schubboden-Lkw, LWA: Landwirtschaftliche Anhänger, CL+LWA: Kombination von Container-Lkw und landwirtschaftlichen Anhängern; n = 37).....	101
Abbildung 25:	Anteile der Ablaufabschnitte an der Gesamten Arbeitszeit (GAZ) des Verfahrensschritts „Hacken“	102
Abbildung 26:	Zusammensetzung der Reinen Arbeitszeit (RAZ, links) und der Allgemeinen Zeiten (AZ, rechts) (VZ = Verteilzeit mechanisch, persönlich und organisatorisch)	103
Abbildung 27:	Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz (Wrh) und Energierundholz (Er) in Srm/h (Maschinenarbeitsstunde MAS) (n Wrh = 30, n Er = 13).....	104
Abbildung 28:	Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz und Energierundholz in Abhängigkeit von der Antriebsleistung.....	106
Abbildung 29:	Wartezeiten auf Wechsel des Transportbehälters (gerundet auf ganze Minuten; n Schubboden-Auflieger = 13, n Container = 35).....	108

Abbildung 30:	Standardaufstellung Hacker und Container-Lkw solo bei geringer Wegebreite (A) und seltenere Aufstellung zur Beladung eines Container-Lkw-Zuges (B).....	113
Abbildung 31:	Typischer Logistik-Zyklus eines Lkw-Container-Zugs mit Umladeplatz (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet)	114
Abbildung 32:	Umladen eines leeren Containers vom abgestellten Anhänger auf den Motorwagen (A) und befüllte Container am Umladeplatz (B)	115
Abbildung 33:	Aufstellung eines Schubboden-Lkw bei ausreichender Wegebreite parallel zum Hacker (A) und rückwärts am Hacker (B).....	115
Abbildung 34:	Typischer Logistik-Zyklus eines Schubboden-Lkw (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet)	116
Abbildung 35:	Hackschnitzelshuttle im Einsatz bei der Aufnahme eines leeren Containers am Umladeplatz (A) und bei der Befüllung am Hacker (B).....	117
Abbildung 36:	Typischer Logistik-Zyklus beim Einsatz eines Shuttle und eines Container-Lkw-Zugs (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet).....	117
Abbildung 37:	Der eingesetzte Raupenharvester Neuson Ecotec 132 HVT (A). Oberhalb der Entastungsmesser des Logmax-5000D-Harvester-Kopfs ist die nachgerüstete Sammeleinheit zu erkennen (B, markiert mit Pfeil).	124
Abbildung 38:	Leistung des Harvesters nach BHD-Klassen. Das Nichtderbholz wurde zusätzlich zum Derbholz als Hackschnitzel bereitgestellt. Die Darstellung in Fm erfolgt für das Hackholz rechnerisch mit Faktor $1 F_m \cong 2,5 S_{rm}$. Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hatte einen BHD von 10,02 cm.....	130
Abbildung 39:	Harvester im Versuchsbestand Eurasburg, die ausscheidenden Bäume sind mit Forstmarkierfarbe durchnummeriert (A). Rauhbeige des Sortiments „Grob entastetes Energierundholz“ (B)	136
Abbildung 40:	Durchschnittlicher Entzug je entnommenem Baum (getrennt nach Fichte und Kiefer) bei der untersuchten Maßnahme für die Elemente P, K, Ca und Mg bezogen auf die Aushaltungsvarianten „Grob entastetes Energierundholz“, Vollbaumnutzung und ausschließlicher Derbholznutzung in kg	139
Abbildung 41:	Leistung des Harvesters nach BHD-Klassen. Die Darstellung in Fm erfolgt für das Hackholz rechnerisch mit Faktor $1 F_m \cong 2,5 S_{rm}$. Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hatte einen BHD von 23,08 cm.....	140
Abbildung 42:	Radbagger im Einsatz im Straßenbegleitholz (A); Nahaufnahme des Zwickaggregats (B)	145
Abbildung 43:	Beobachtete Einzelzyklen und Mehrschnitzzyklen. Die rechte Säule stellt Mehrschnitzzyklen mit fünf (MZ (5)), vier (MZ (4)), drei (MZ (3)) und zwei Schnitten (MZ (2)) dar.	146
Abbildung 44:	Hackeraufstellung in der Fallstudie Straßenbegleitholz B13 (A) und beim Stromtrassenauftrieb (B)	147

Abbildung 45:	Spezifischer Kraftstoffverbrauch (I/S_{rm} , I/t_{atro}) für die jeweilige Maschinenleistung bei den Feldmessungen	149
Abbildung 46:	Spezifischer Kraftstoffverbrauch pro Trockenmasse (I/t_{atro}) für unterschiedliche Prozessvarianten beim Prozessschritt „Hacken“	151
Abbildung 47:	Hackschnitzel (A) und Schredderholz (B) aus Buche-Energierundholz (80 × 80 mm Siebkorb)	159
Abbildung 48:	Schematische Darstellung der Schneidtechnik von (A) Scheibenradhackern, (B) Trommelhackern und (C) Schneckenhackern (aus Handbuch „Bioenergie Kleinanlagen“ [75])	159
Abbildung 49:	Unterschiedliche Rohmaterialien für die Produktion von Hackschnitzeln (A = Waldrestholz Fichte 1.1.4.2, B = Energierundholz Buche 1.1.3.1, C = Pappel-Kurzumtriebsplantagenholz 1.1.1.3).....	163
Abbildung 50:	Vecoplan-Trommelhacker VTH 45/12/2 (A), verwendete Siebkörbe (B) und Messersätze (C)	165
Abbildung 51:	(A) Heizohack HM 8 400 Trommelhacker, (B) Laimet HP 21 Schneckenhacker und (C) Farmi CH 260 HF-2EL Scheibenradhacker für stationäre Hackversuche am TFZ.....	168
Abbildung 52:	Siebkörbe für Trommelhacker (A), Messersätze für Trommelhacker(B), Schnecken (C) und Messer für Scheibenradhacker (D).....	170
Abbildung 53:	Ablauf und verwendete Methoden der Brennstoffanalysen (* = homogene Teilprobe, ¹ = nur bei stationären Hackversuchen, ² = siehe TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“, ³ = siehe Kapitel „Belüftungswiderstand“).....	171
Abbildung 54:	Probenteilung großer Schüttgutproben in homogene Teilproben ohne (A) und mit Probenteiler (B).....	172
Abbildung 55:	Trocknungseinrichtung für große Schüttgutproben	174
Abbildung 56:	Schematische Darstellung des Bildanalyseverfahrens	176
Abbildung 57:	Messprinzip des Bildanalyseverfahrens und Kornformfaktoren unterschiedlicher Partikelformen, A = minimaler Feret, B = maximale Partikellänge, U = Partikelumfang, U' = Umfang eines flächengleichen Kreises	176
Abbildung 58:	Beispiel für die Berechnung des Medianwerts und der 25%- und 75%-Quantile der Partikelklassenerteilung mittels Bildanalyseverfahren	177
Abbildung 59:	Mittlerer Wassergehalt der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. *** = signifikante Abweichung, Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, Vb = Vollbäume, KUP = Kurzumtriebsplantagen. Variante „getrocknet“: ungehackte Lagerung über Sommer	181

Abbildung 60:	Mittlerer Aschegehalt und mittlerer Heizwert der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, Vb = Vollbäume, KUP = Kurzumtriebsplantagen	182
Abbildung 61:	Mittlere Schüttdichten nach DIN EN 15103 (bei $w = 15 \text{ Ma.-%}$) und Stauchfaktoren der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten.....	184
Abbildung 62:	Schüttdichte im Lkw zu Schüttdichte im Normbehälter und gemessene Tonnage zu berechneter Tonnage (aus Volumen der Ladung und Schüttdichte im Normbehälter)	185
Abbildung 63:	Durchschnittliches Gewicht frischer ($w = 50 \text{ Ma.-%}$) und vorgetrockneter Hackschnitzel ($w = 35 \text{ Ma.-%}$) im Transportfahrzeug.....	186
Abbildung 64:	Partikelgröße nach DIN EN ISO 17225, maximale Partikellänge und Feinanteil der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen. Balken geben 25-%- und 75-%-Quantile sowie Min. und Max. der Verteilungen an. Horizontale graue Linie gibt Grenzwerte für Feinanteil und maximale Länge der Klasse P45S nach DIN EN ISO 17225-4 wieder. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten.....	187
Abbildung 65:	Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen der Partikel nach dem Bildanalyseverfahren. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten.....	188
Abbildung 66:	Auf 15 % normierte Schüttdichte der Hackschnitzel bei den stationären Hackversuchen am TFZ (elektrischer Trommelhacker) in Abhängigkeit von der Baumart und der Maschineneinstellung (Mittelwert \pm SD), dargestellt für alle 3 Zeitpunkte. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Varianten.....	192
Abbildung 67:	Siebfraktionen der Hackschnitzelproben aus den stationären Versuchen (mit elektrischem Trommelhacker)	194
Abbildung 68:	Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen nach dem Bildanalyseverfahren. Signifikanter Unterschiede zwischen Mittelwerten, dargestellt als * (Kornformfaktor, Hauptfraktion).....	195
Abbildung 69:	Schüttdichte (bezogen auf Wassergehalt $w = 15 \text{ %}$) und Stauchfaktor der Hackschnitzelproben, produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ.....	198
Abbildung 70:	Siebfraktion der Hackschnitzelproben aus den stationären Versuchen der Hackschnitzelproben, produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ.....	200
Abbildung 71:	Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen nach dem Bildanalyseverfahren der Hackschnitzelproben,	

	produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ.....	201
Abbildung 72:	Bestimmung des Mitteldurchmessers (A1, A2) und der Masse der Einzelstämme für die stationären Hackversuche am TFZ	210
Abbildung 73:	Semimanuelle Beschickung der zapfwellenbetriebenen Hacker bei den stationären Versuchen am TFZ.....	211
Abbildung 74:	Beispiel für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über lineare Regressionen bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern	212
Abbildung 75:	Beispiel für die Messung des Kraftstoffverbrauchs (gravimetrisch) bei den stationären Versuchen am TFZ	213
Abbildung 76:	Mittlere Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers (MW \pm SD). Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.	215
Abbildung 77:	Mittlere Leistungsaufnahme (kW) des elektrischen Trommelhackers.....	217
Abbildung 78:	Spezifischer Energieverbrauch (MW \pm SD) des elektrischen Trommelhackers. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.....	218
Abbildung 79:	Mittlere Energieinput (in % der Energie im Holz, MW \pm SD). Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen Varianten.	219
Abbildung 80:	Durchsatzleistung (Hackerlastzeit) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistung	220
Abbildung 81:	Dieserverbrauch pro Zeit bei den stationären Versuchen mit Hackern mittlerer Leistung.....	223
Abbildung 82:	Spezifischer Dieserverbrauch pro Schüttraummeter (ungefüllte Balken) und Trockenmasse (gefüllte Balken) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern	224
Abbildung 83:	Energieinput (in % der Energie im Holz) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern	226
Abbildung 84:	Zusammenfassung der beobachteten Einflüsse auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf bei den Feldversuchen und den stationären Versuchen am TFZ (1 = nur Feldversuche, 2 = nur stationäre Versuche, Pfeil nach oben = höhere Werte, Pfeil nach unten = Abnahme der Werte, Pfeil nach rechts = kein Effekt, mehrere Pfeile = verschiedene Beobachtungen)	227
Abbildung 85:	Beispiele für den spezifischen Belüftungswiderstand aus der Literatur [5][205]	233
Abbildung 86:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung des Belüftungswiderstands von Schüttgütern	236

Abbildung 87:	Versuchsaufbau zur Messung des Belüftungswiderstands von Schüttgütern im Technikum des TFZ.....	236
Abbildung 88:	Beispiel für die lineare Zunahme des statischen Drucks mit der Schüttguthöhe bei einer festen Luftgeschwindigkeit.....	237
Abbildung 89:	Belüftungswiderstand von Hackschnitzeln aus den Feldversuchen	240
Abbildung 90:	Einfluss der Baumart und des Herstellungsprozesses auf den Belüftungswiderstand der Hackschnitzel (elektrischer Trommelhacker).....	241
Abbildung 91:	Beispiel für Über- und Unterschätzung des Belüftungswiderstands einer Hackschnitzelprobe bei Verwendung von Literaturwerten für „feine“ und „grobe“ Hackschnitzel aus Waldrestholz [127]	242
Abbildung 92:	Prozentuale Abweichung der berechneten Werte vom tatsächlichen Wert für den Belüftungswiderstand nach den Modellen von RAMSIN [166], HUKILL & IVES [105] und ERGUN [71]	244
Abbildung 93:	Vergleich des modellierten und des gemessenen Belüftungswiderstands für das wissenschaftliche Hackschnitzel- und Nadelholz-Hackschnitzel-Modell.....	246
Abbildung 94:	Sensitivitätsanalyse des wissenschaftlichen Hackschnitzel-Modells...	247
Abbildung 95:	Sensitivitätsanalyse des wissenschaftlichen Nadelholz-Hackschnitzel-Modells	248
Abbildung 96:	Vergleich des modellierten und des gemessenen Belüftungswiderstands für das vereinfachte Hackschnitzel- und Nadelholz-Hackschnitzel-Modell.....	249
Abbildung 97:	Sensitivitätsanalyse des vereinfachten Hackschnitzel-Modells	250
Abbildung 98:	Sensitivitätsanalyse des vereinfachten Nadelholz-Hackschnitzel-Modells.....	251
Abbildung 99:	Unterteilung der Stirnseite eines Waldrestholzpolters zur Ermittlung der mittleren Höhe im Sektionsverfahren (A) (die vertikalen Striche unterteilen das Polter in 1 m breite Abschnitte) und Vermessung der Kronenfüße mithilfe eines Holzrahmens mit 1 × 1 m Seitenlänge (B).....	257
Abbildung 100:	Übersicht über die zur Beschreibung der Polterform verwendeten geometrischen Formen (von links oben nach rechts unten: Quader, Quader mit mittlerer Höhe aus Sektionsverfahren, Prisma, Pyramidenstumpf, Zylinder, halbiertes Kegestumpf).....	259
Abbildung 101:	Beispielhafte Belegung eines Hackholzpolters (Waldrestholz) mit den geometrischen Formen Pyramidenstumpf (V_{PSt}) und halbiertes Kegestumpf (V_{hKst}).	261
Abbildung 102:	Übersicht der Verhältnisse der Volumina der geometrischen Formen zum Volumen des Pyramidenstumpfs ($V_{PSt} = 1,0$)	264
Abbildung 103:	Verhältnis der erzeugten Hackschnitzelmenge in Schüttraummetern zum Poltervolumen in Raummeter. Für	

	Waldrestholz und Energierundholz sind jeweils die tatsächlich gemessenen Datenreihen links und die um die geprüften Schätzwerte der Maschinenführer erweiterten Datenreihen rechts dargestellt.	266
Abbildung 104:	Zusammenhang zwischen Kronenfußflächenanteil und dem Umrechnungsfaktor von Poltervolumen zu Hackschnitzelvolumen ($R^2 = 0,7914$)	267
Abbildung 105:	Mittlere Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (S_{rm}) bei den stationären Versuchen mit elektrischem Trommelhacker (\pm SD; $n = 3$)	268
Abbildung 106:	Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (S_{rm}) bei stationären Versuchen mit zapfwellenbetriebenen Hackern	270
Abbildung 107:	Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (S_{rm}) in Bezug auf mittleren Stammdurchmesser der Charge bei den stationären Versuchen	270
Abbildung 108:	Umrechnungsfaktoren (R_m zu m^3 (m. R.) und S_{rm} zu R_m) in Bezug auf den Anteil der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche ...	272
Abbildung 109:	Einfluss des Wassergehalts auf den Belüftungswiderstand.....	316
Abbildung 110:	Einfluss der Schüttguthöhe auf den Belüftungswiderstand.....	316

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele für die Herkunft nach DIN EN ISO 17225-1 (Auszug)	34
Tabelle 2:	Anforderungen an Hackholzpolter für eine effiziente Hackschnitzelbereitstellung in Anlehnung an BAYSF [11]	37
Tabelle 3:	Verfahrenstypen, in die die Fallstudien aus der Literatur eingruppiert wurden	56
Tabelle 4:	Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Allgemeinen Zeiten (AZ) und der nicht auswertbaren Zeiten (NA).....	58
Tabelle 5:	Übersicht der Zeitarten in Anlehnung an [139] und [169].....	60
Tabelle 6:	Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudien „Hacken“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.....	63
Tabelle 7:	Untersuchte Einflussfaktoren auf die TAP	64
Tabelle 8:	Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudien zur Logistik. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.....	66
Tabelle 9:	Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Holzernte“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.	68
Tabelle 10:	Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Rückung“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.	69
Tabelle 11:	Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Holzernte“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.	71
Tabelle 12:	Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Straßenbegleitholz B13 Bagger“ Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.....	73
Tabelle 13:	Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Straßenbegleitholz B13 motormanuell“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.....	74
Tabelle 14:	Ausgangsmaterial bei der Hackschnitzelproduktion (n = 29)	81
Tabelle 15:	Leistungs- und Kostenwerte aus der Literaturlauswertung für die Modellverfahrensketten, getrennt in die Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten (inkl. Vorliefern) sowie Rückung. Angegeben sind die Mittelwerte, in Klammern Minimal- und Maximalwert sowie die Anzahl der zuordenbaren Fälle.	91

Tabelle 16:	Gesamtkosten der Verfahrensschritte Fällen und Vorliefern, Rückung und Hacken aus der Literaturlauswertung für die Modellverfahrensketten in €/Srm. Angegeben sind die Mittelwerte, in Klammern Minimal- und Maximalwert sowie die Anzahl der zuordenbaren Fälle; zudem sind die Fallstudien soweit möglich BHD-Klassen zugeordnet.....	92
Tabelle 17:	Leistungswerte für Holzernte und Rückung in den Fallstudien Sailershausen und Eurasburg.....	93
Tabelle 18:	Kosten für Harvester und Forwarder aus den Fallstudien Sailershausen und Eurasburg.....	93
Tabelle 19:	Leistungswerte für den Verfahrensschritt Hacken aus den Fallstudien.....	93
Tabelle 20:	Leistung und Kosten für Hacker nach Leistungsklasse	94
Tabelle 21:	Kosten für den Verfahrensschritt Hacken aus den im Projekt durchgeführten Arbeitsstudien getrennt nach Ausgangsmaterial und Leistungsklasse des Hackers.....	95
Tabelle 22:	Leistungsklassen und Anzahl der beobachteten Hackereinsätze (n = 38).....	99
Tabelle 23:	Hacker-Leistungsklassen und erwartete Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz (Wrh) und Energierundholz (Er) ..	106
Tabelle 24:	Transportbehälter, Anzahl der Beobachtungen und Wartezeiten.....	108
Tabelle 25:	Überblick über die in den Logistikstudien eingesetzten Hacker und Transportfahrzeuge.....	112
Tabelle 26:	Mittlerer Zeitbedarf für die Ablaufabschnitte am Umladeplatz und im Wald für einen typischen Zyklus mit Container-Lkw-Zügen.....	119
Tabelle 27:	Dauer eines kompletten Zyklus eines Container-Lkw-Zugs in Abhängigkeit von der Lieferentfernung (Entfernung vom Umladeplatz im Wald zum Bestimmungsort). Die pauschalen Zuschläge für Ruhezeiten betragen 5 min je Arbeitsstunde.	120
Tabelle 28:	Bestandsdaten Fallstudie Sailershausen.....	123
Tabelle 29:	Durchmesserverteilung nach Stammzahl im Ausgangsbestand und im ausscheidenden Bestand.....	123
Tabelle 30:	Ausgehaltene Sortimente nach Baumarten	124
Tabelle 31:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Biomassemodellierung nach Baumarten und Kompartimenten im Gesamtbestand. Durch den geringen Umfang und die hohen Anteile an Verjüngung mit BHDs unter 7 cm sind die modellierten Werte für Laubholz nur als Orientierungswerte zu sehen.	125
Tabelle 32:	Vorratswerte im Ausgangsbestand nach Baumarten.....	126
Tabelle 33:	Sortimentsanfall nach Werksmaß und Hackerprotokoll.....	126

Tabelle 34:	Gesamte oberirdische und unterirdische Biomasse in einem modellierten Fichtenreinbestand und Aufteilung auf Baumteile. Die Werte für die oberirdische Biomasse sind aus der SILVA-Modellierung des Versuchsbestands hochgerechnet. Die Werte für die unterirdische Biomasse sind aus Literaturdaten zum Verhältnis oberirdischer zu unterirdischer Biomasse berechnet [110]. 127	127
Tabelle 35:	Entnahme der Elemente N, P, K, Ca und Mg anteilig an der in der oberirdischen Biomasse bzw. in der ober- und unterirdischen Biomasse enthaltenen Mengen in einem modellierten Fichtenbestand 128	128
Tabelle 36:	Absolute Menge entnommener Nährstoffe, aufgeteilt in Derbholz und Nichtderbholz, bei Entnahme von 12,7 t _{atro} /ha Derbholz und 4,6 t _{atro} /ha Nichtderbholz in einem modellierten Fichtenbestand..... 128	128
Tabelle 37:	Übersicht Einzelbaumzyklen nach BHD-Klasse und Zeitbedarf (Reine Arbeitszeit) 129	129
Tabelle 38:	Übersicht Bündelzyklen nach BHD-Klasse..... 129	129
Tabelle 39:	Mittlere Rückeentfernung nach Sortimenten 131	131
Tabelle 40:	Eingangsparameter für die Kalkulation der Maschinenkosten für Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Sailershausen 132	132
Tabelle 41:	Übersicht über Produktivität und Bereitstellungskosten von Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Sailershausen 132	132
Tabelle 42:	Bestandsdaten Fallstudie Eurasburg..... 135	135
Tabelle 43:	Durchmesserverteilung nach Stammzahl im ausscheidenden Bestand..... 135	135
Tabelle 44:	Ausgehaltene Sortimente nach Baumarten..... 136	136
Tabelle 45:	Sortimentsanfall nach Werksmaß und Hackerprotokoll 137	137
Tabelle 46:	Ergebnisse der Laboranalysen für Nichtderbholz [76]. Angegeben sind Mittelwerte aus je 3 Prohebäumen (Fichte: BHD 17, 17 und 27 cm; Kiefer: BHD 21, 25 und 27 cm)..... 138	138
Tabelle 47:	Absolute Nährstoffmengen in Kilogramm je Hektar in der oberirdischen Biomasse des ausscheidenden Bestands 138	138
Tabelle 48:	Übersicht Holzernte-Zyklen (nur Nadelholz) nach BHD-Klasse und Zeitbedarf (Reine Arbeitszeit)..... 140	140
Tabelle 49:	Mittlere Rückeentfernung nach Sortimenten. 141	141
Tabelle 50:	Eingangsparameter für die Kalkulation der Maschinenkosten für Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Eurasburg 142	142
Tabelle 51:	Übersicht über Produktivität und Bereitstellungskosten von Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Eurasburg 142	142
Tabelle 52:	Leistungsbereich der Maschinen bei den Kraftstoffbedarfsmessungen..... 148	148

Tabelle 53:	Durchschnittsleistung und Kraftstoffverbrauch der Hacker in Abhängigkeit der Maschinenleistung (Mittelwert \pm SD)	149
Tabelle 54:	Typische Einteilung der Hackschnitzelqualität.....	153
Tabelle 55:	Verfügbare und sich in Bearbeitung befindliche Gütesiegel/Zertifikate für qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel	158
Tabelle 56:	Beschreibung maschinenbedingter Prozessparameter und ihr möglicher Einfluss auf die Qualität von Waldhackschnitzeln[74][89][148][149][151] [188][189]	160
Tabelle 57:	Beschreibung rohstoffbedingter Parameter und ihr möglicher Einfluss auf die Qualität von Waldhackschnitzeln [149][151][89]	161
Tabelle 58:	Einteilung der untersuchten Sortimente der Feldmessungen nach DIN EN ISO 17225-1.....	163
Tabelle 59:	Aufgenommene Maschinendaten zu jeder Hackschnitzelprobe (Checkliste)	164
Tabelle 60:	Technische Daten des elektrischen Trommelhackers am TFZ.....	166
Tabelle 61:	Standard-Prozessvariationen bei den stationären Hackversuchen am TFZ.....	167
Tabelle 62:	Technische Daten der drei zapfwellenbetriebenen Hacker	168
Tabelle 63:	Prozessvarianten bei den stationären Versuchen mit zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistungsklasse	169
Tabelle 64:	Ausgewählte Längen- und Formparameter des Bildanalyseverfahrens.....	177
Tabelle 65:	Liste der Feldversuchsproben.....	179
Tabelle 66:	Aufbereitungsverfahren holzigen Materials aus kommunalen Grüngutsammelstellen am Kompostwerk/Biomassehof	180
Tabelle 67:	Aschegehalt und Heizwert der einzelnen Verfahrensketten zum Siedlungsholz (Mittelwert \pm Standardabweichung)	183
Tabelle 68:	Mittlerer Stammdurchmesser, Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert pro Baumart und Hackzeitpunkt.....	191
Tabelle 69:	Partikelklassenzuordnung von Hackschnitzeln aus Buche und Fichte gemäß DIN EN ISO 17225-4 (Herstellung mit elektrischem Trommelhacker)	193
Tabelle 70:	Feinanteil, Grobanteil und maximale Partikellänge der Hackschnitzel aus den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker (MW \pm SD).....	194
Tabelle 71:	Stammdurchmesser, Volumen und Wassergehalt des Hackholzes bei den stationären Versuchen mit Hackern mittlerer Leistung	197
Tabelle 72:	Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225-4 der Hackschnitzelproben produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ	199

Tabelle 73:	Empfehlung für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel für kleine Feuerungen (nach DIN EN ISO 17225-4 [61]).....	205
Tabelle 74:	Physikalische Brennstoffparameter für die Berechnung der Parameter a und b mittels multipler linearer Regressionsanalyse (Abschnitt 5.2.4).....	239
Tabelle 75:	Wertebereich des Belüftungswiderstands von Hackschnitzeln aus den Feldversuchen (Belüftungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s)	240
Tabelle 76:	Berechnungsbeispiel für die Auslegung eines Gebläses für die technische Trocknung von Hackschnitzeln bei unterschiedlichen Lagerraumgrößen und einer Belüftungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s nach Formel 8-5. A = Lagerraumfläche (in m ²), h = Schüttguthöhe (in m), Vabs = absoluter Luftdurchsatz (in m ³ /h), P = absoluter Belüftungswiderstand (in Pa, inklusive 20%iger Sicherheitszuschlag), L = geschätzte Gebläseleistung (in kW nach Formel 8-5), E = Energieverbrauch (in kWh) bei jährlich 5.000 Betriebsstunden.....	243
Tabelle 77:	Wertebereich der Parameter a und b nach den Formeln von RAMSIN, HUKILL & IVES und ERGUN für die analysierten Hackschnitzel.....	244
Tabelle 78:	Bestimmtheitsmaße für die Parameter a und b der Modelle nach RAMSIN (a ₁ und b ₁), HUKILL & IVES (a ₃ und b ₃) und ERGUN (a ₄ und b ₄), berechnet mittels multipler linearer Regressionsanalyse	245
Tabelle 79:	Zur Beschreibung der Hackholzpolter verwendete geometrische Körper und notwendige Eingangsgrößen	258
Tabelle 80:	Geometrische Formen zur Beschreibung der Polterform und Anzahl der Polter, für die die entsprechenden Eingangsgrößen ermittelt wurden	263
Tabelle 81:	Verhältnisse der Volumina der geometrischen Formen zum Volumen des Pyramidenstumpfs (V _{PSt} = 1,0)	264
Tabelle 82:	Verhältnis der Länge an der Basis der Rückseite zur Länge an der Basis der Stirnseite (l _{BRs} zu l _{BSS}) und Verhältnis der Höhe der Rückseite zur Höhe der Stirnseite (h _{RS} zu h _{SS}).....	265
Tabelle 83:	Korrekturfaktoren bei der Bestimmung des Poltervolumens	273
Tabelle 84:	Empfohlene Mess- und Berechnungsverfahren für das Poltervolumen bei Waldrestholz (Wrh) und Energierundholz (Er).....	274
Tabelle 85:	Polterklassen nach Anteilen der Kronenfußflächen an der Polterstirnfläche und jeweils gültige Umrechnungsfaktoren vom Raummaß [Rm] des Polters auf die zu erwartende Hackschnitzelmenge [Srm].....	275
Tabelle 86:	Fragebogen zur Expertenbefragung (Abschnitte 4.2.1, 4.3.1)	301
Tabelle 87:	Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 1)	302
Tabelle 88:	Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 2)	303
Tabelle 89:	Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 3)	304

Tabelle 90:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I a zugeordnet werden können	305
Tabelle 91:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I a zugeordnet werden können.....	305
Tabelle 92:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I b zugeordnet werden können	306
Tabelle 93:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I b zugeordnet werden können.....	307
Tabelle 94:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette II zugeordnet werden können	308
Tabelle 95:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette II zugeordnet werden können.....	309
Tabelle 96:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III a zugeordnet werden können	310
Tabelle 97:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III a zugeordnet werden können.....	310
Tabelle 98:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III b zugeordnet werden können	311
Tabelle 99:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III b zugeordnet werden können.....	312
Tabelle 100:	Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette IV zugeordnet werden können.....	313
Tabelle 101:	Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette IV zugeordnet werden können	313
Tabelle 102:	Schüttdichte, Stauchfaktor, Median, 25%- und 75%-Quartil der Partikelgrößenverteilung sowie Kornformfaktor der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker	314
Tabelle 103:	Feinanteil, maximale Partikellänge und Partikelklasse nach ISO 17225-4 der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker	314
Tabelle 104:	Energiebedarf und Durchsatzleistung der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker.....	315
Tabelle 105:	Umrechnungsfaktoren der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker	315

Danksagung

Der Forschungsbericht „Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel“ umfasst die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen, die über den Zeitraum von drei Jahren erarbeitet wurden.

Weite Teile des vorliegenden Forschungsberichtes wären ohne die produktive Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Energieholz (ZfE) der Bayerischen Staatsforsten AÖR (BaySF), namentlich mit Herrn Markus Achhammer und Frau Anika Sander, nicht möglich gewesen. Wir bedanken uns dabei besonders für die hervorragende Unterstützung bei der Durchführung unserer Feldversuche, aber auch für den umfassenden fachlichen Austausch mit den Kollegen.

Hervorzuheben ist die Unterstützung von Frau Corinna Fadler, die im Rahmen ihrer Masterarbeit „Reduzierter Nährstoffentzug bei der Energieholzernte am Beispiel des Verfahrens Energierundholz“ wesentliche Beiträge zur Fallstudie Eurasburg leistete.

Besonderer Dank gilt den zahlreichen Forstbetrieben, forstlichen Dienstleistungsunternehmen, Kompostwerken und Biomassehöfen, die uns bei den Messungen im Wald und bei der Beschaffung von Brennstoffproben tatkräftig unterstützt haben. Hervorzuheben sind das Universitätsforstamt Sailershausen (Herr Hans Stark) und der Forstbetrieb Landsberg am Lech, auf deren Flächen umfangreiche Feldstudien stattfanden. Daneben ist Herr Alexander Eberhardinger von der TTW Waldpflege GmbH zu nennen, der uns bei mehreren Feldversuchen unterstützt hat. Dank gilt auch der Stadtgärtnerei Straubing für die freundliche Unterstützung bei mitunter sehr kurzfristigen Anfragen.

Abschließend bedanken wir uns bei den Firmen Heizomat GmbH, Eusäko Sägewerkmaschinen und Meier HM Land- und Forstmaschinen, die uns sowohl maschinell durch die Zurverfügungstellung forstlicher Hacker für die stationären Versuche am Betriebshof des TFZ, aber auch im fachlich Austausch sehr unterstützt haben.

Die Studie wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) unter dem Förderkennzeichen K/10/17 gefördert.

1 Einleitung

DANIEL KUPTZ, FABIAN SCHULMEYER, HERBERT BORCHERT & HANS HARTMANN

Erneuerbare Energien deckten im Jahr 2012 insgesamt 12,0 % des Bruttoendenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland [31]. Die Vorreiterrolle nimmt dabei nach wie vor die Bioenergie ein, welche ca. 65 % der erneuerbaren Endenergie beisteuert [29]. Ein besonderer Schwerpunkt der Bioenergie liegt in der Wärmebereitstellung, bei der sie 2013 ca. 88 % der erneuerbaren Energienutzung ausmachte [29][31]. Insgesamt gehen 69 % der erneuerbaren Wärme auf die Verbrennung biogener Festbrennstoffe zurück [31]. Dies entspricht einer Wärmemenge von 93 Mrd. kWh bzw. 6,3 % des bundesweiten Bedarfs [31]. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) verzeichnete dabei für den Zeitraum 2002–2012 fast eine Verdopplung der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse [29].

Allein in Bayern werden knapp 2.000 Biomasseheiz(kraft)werke mit einer Nennwärmeleistung ab 100 kW betrieben. Der Verbrauch wird für das Jahr 2012 auf 2,07 Mio. t_{atro} geschätzt. Davon waren 725.000 t_{atro} Waldhackschnitzel, die überwiegend in Biomassefeuerungen zur reinen Wärmeproduktion und Heizkraftwerken mit ORC-Technik verbraucht wurden [83]. Auch im privaten und kommunalen Sektor ist die Nachfrage nach regionalen Alternativen zu Gas und Heizöl hoch. Zwar hat der Zubau kleinerer Hackschnitzelkessel bis 100 kW seit 2009 leicht abgenommen, ist mit einem durchschnittlichen Neubau von 620 Anlagen pro Jahr dennoch immer noch sehr ausgeprägt (Berechnung anhand BAFA-Daten zu geförderten Anlagen in Bayern für den Zeitraum 2010–2013 [69]).

Die Nachfrage nach festen Bioenergieträgern, vornehmlich Energieholz, ist hoch. Laut Energieholzmarktbericht der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF) wurde allein in Bayern 2012 eine Menge von 14 Mio. Festmetern Holz mit Rinde (Fm m. R.) energetisch verwendet. Die Herkunft des Holzes beschränkt sich dabei nicht nur auf Waldholz, sondern beinhaltet u. a. auch Sägerestholz, Holz aus der Landschaftspflege, von Verkehrswegen, KUP-Flächen und urbanen Bereichen. Von den 14 Mio. Fm fielen 8 Mio. Fm auf private Haushalte, 4,8 Mio. Fm auf Biomasseheiz(kraft)werke und 1,2 Mio. Fm auf Feuerstätten im Industrie- und Dienstleistungsbereich. Die Nachfrage nach Energieholz ist damit seit 2005 stark gestiegen [83]. Im gleichen Zeitraum haben sich auch die Preise für Hackschnitzel nahezu verdoppelt [33]. Langfristig ist daher absehbar, dass die gesamte Bundesrepublik aufgrund der hohen Nachfrage (sowohl energetisch als auch stofflich) trotz kurzfristiger positiver Nettobilanz zwischen 2004 und 2010 (Export > Import) [180] ein Nettoholzimporteur sein wird [30][154][177].

Schon heute übersteigt in manchen Regionen der Brennstoffbedarf das Angebot. Im Fall von Energieholz lohnen sich lange Transportwege jedoch nur für Brennstoffe mit hoher Schüttdichte, z. B. für Pellets. Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln wird somit trotz hoher Nachfrage auch langfristig nur in dezentralen Märkten erfolgen. Umso wichtiger ist

es, das regional vorhandene Potenzial an holziger Biomasse unter Berücksichtigung nachhaltiger Grundsätze so effizient wie möglich zu nutzen [3].

Die erhöhte Nachfrage nach Energieholz, z. B. in Form von Waldhackschnitzeln, bietet für viele Forstbetriebe und Unternehmen die Möglichkeit, neue Geschäftsfelder für ehemals ungenutzte Holzsortimente zu erschließen. Die Nutzung von Waldrestholz oder von Holz aus der Pflege von Verkehrswegen, Stromtrassen oder Landschaftsbild [70][153][202] bietet sich ebenso an wie die gezielte Aushaltung schwacher Stämme [176] oder die Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Der Hackschnitzelmarkt ist dabei einer Reihe ökonomischer, ökologischer und sozialer Forderungen ausgesetzt. Waldhackschnitzel sollen nachhaltig und möglichst klimaschonend produziert werden, eine hohe Brennstoffqualität haben, die regionale Wertschöpfung steigern und eine kostengünstige Alternative zu fossilen Energieträgern und der Kernenergie sein. Obwohl der Brennstoff die genannten Punkte schon umfangreich erfüllt [206], bieten sich bei vielen Aspekten noch deutliche Optimierungspotenziale.

2 Problemstellung

DANIEL KUPTZ, FABIAN SCHULMEYER, HERBERT BORCHERT & HANS HARTMANN

Aktuelle Marktpreise für Hackschnitzel erreichten in Bayern im 3. Quartal 2014 durchschnittlich 99,59 bis 139,16 € pro Tonne bzw. 32,10 bis 35,02 € pro MWh, abhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs [33]. Trotz regional sehr starker Schwankungen liegt der Hackschnitzelpreis somit weiterhin noch deutlich unter dem Preis für Heizöl (ca. 78 €/MWh, Stand 3. Quartal 2014 [33][88]). Den aktuell sehr niedrigen Verkaufspreisen stehen relativ hohe Produktionskosten gegenüber. Lohn- und Maschinenkosten, eine komplexe Bereitstellungslogistik, aber auch Masseverluste durch unsachgemäße Lagerung verhindern häufig einen positiven Deckungsbeitrag [202]. Die Lösung dieses Dilemmas wird durch die unübersichtliche Anzahl an Verfahrensketten bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln erschwert [68][201]. Erste Zeitstudien und Untersuchungen zu Leistung und Kosten einzelner Prozessketten zeigten dabei erhebliche Rationalisierungsmöglichkeiten auf. Großes Potenzial zur Kostenminimierung bietet z. B. die Reduzierung der Stand- und Leerlaufzeiten teurer Forstmaschinen [68][80][174][202]. Neben einer besseren zeitlichen Abstimmung der einzelnen Arbeitsschritte kommt auch dem schonenden Umgang mit Energie eine gestiegene Bedeutung zu. Allgemein streut der spezifische Energieverbrauch von Forstmaschinen sehr stark und bietet Einsparungspotenziale von bis zu 20 % [197]. Eine Minderung des Kraftstoffverbrauchs bei der Hackschnitzelproduktion verringert dabei nicht nur die Produktionskosten, sondern steigert zusätzlich die ohnehin schon sehr gute Ökobilanz des Brennstoffs [206]. Im Zuge des fortschreitenden Waldumbaus in klimatolerantere Mischwälder ist mit einem steigenden Anteil von Hartlaubhölzern auch beim Hackholz zu rechnen [128]. Inwiefern dies Auswirkungen auf die Anforderungen an eingesetzte Maschinen und den Kraftstoffverbrauch haben kann, ist zu prüfen.

Die energetische Nutzung von Waldholz muss dem Prinzip der Nachhaltigkeit Rechnung tragen. Eine naturnahe Waldbewirtschaftung gehört zu den Grundsätzen der deutschen Forstwirtschaft und wird durch internationale Zertifizierungssysteme (PEFC, FSC) belegt. Eine erhöhte Nutzung von Energieholz wird dabei stellenweise als kritisch angesehen, da es vor allem bei der Nutzung von Ast- und Nadelmaterial zu hohen Nährstoffausträgen aus dem Bestand kommen kann. Ein kategorischer Nutzungsverzicht würde die positiven Effekte der Holznutzung über Gebühr beschränken. Die in anderen Bundesländern verfolgte Ascherückführung in den Wald kann negative Auswirkungen auf das Ökosystem haben und bedeutet immer einen Mehraufwand. Die Entwicklung standortbezogener Entscheidungshilfen und geeigneter Ernteverfahren, bei denen gezielt auf die Nutzung von Feinästen und Nadeln verzichtet wird, muss daher oberste Priorität haben.

Neben einer quantitativ höheren Nachfrage nach Waldhackschnitzeln kommt den qualitativen Anforderungen an den Brennstoff eine zunehmende Bedeutung zu. Gerade kleinere Heizanlagen sind auf hochwertiges Brennmaterial angewiesen und schreiben definierte Wasser-, Asche- und Elementgehalte sowie die Korngrößenverteilungen vor [89]. Qualitativ hochwertigere Hackschnitzel erzielen dabei deutlich höhere Marktpreise [33]. Zudem setzen neue gesetzliche Anforderungen an das Emissionsverhalten von Holzfeu-

erungen, z. B. aufgrund der Novellierung der 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung (1. BImSchV für Anlagen < 1.000 kW) eine hohe Brennstoffqualität voraus. Fest definierte Hackschnitzelqualitäten geben dabei dem Verbraucher die Sicherheit, den richtigen Brennstoff für seine Anlage zu beziehen. Orientierung bieten hier europäische Qualitätsnormen rund um die DIN EN ISO 17225 [58][61]. Die Normen stellen eine Grundlage für das betriebsinterne Qualitätsmanagement [125], aber auch für Gütesiegel und existierende oder derzeit in Entwicklung befindliche Zertifizierungssysteme dar (z. B. RAL Gütesiegel Brennholz [38], EN_{Plus}-Siegel für Hackschnitzel). Zur gezielten Herstellung qualitativ hochwertiger Hackschnitzel existieren bisher jedoch nur wenige Empfehlungen und technische Vorgaben. So fehlen immer noch belastbare Produktionskenndaten zur Abhängigkeit der Hackschnitzelqualität von unterschiedlichen Maschinentypen, Verfahrenseinstellungen oder Rohmaterialien. Auch fehlen Kenndaten für die weitere Aufbereitung des Brennstoffs, z. B. während der technischen Hackschnitzeltrocknung. Ziel solcher Maßnahmen ist die Vermeidung von Energieverlusten durch den mikrobiellen Abbau von Trockensubstanz. In der Praxis wird beispielsweise die Dimensionierung von Trocknungsräumen oder Gebläseleistungen oft ohne belastbare Planungsdaten gelöst, was zu unnötigen Energieverlusten oder zur Überdimensionierung der Anlagen führen kann.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl an Ansatzpunkten für die Optimierung der Hackschnitzelbereitstellung. Langfristig müssen die Prozessketten rationalisiert und der Energieverbrauch bei der Hackschnitzelbereitstellung minimiert werden. Durch ein betriebsinternes Qualitätsmanagement müssen dabei definierte, qualitativ hochwertige Brennstoffe entstehen. Auf aktuelle und geplante gesetzliche Anforderungen (z. B. Novellierung des EEG und der 1. BImSchV, Nachhaltigkeitsnachweise) muss ebenso reagiert werden wie auf Änderungen der Rahmenbedingungen während der Produktion (Vermeidung von Nährstoffentzügen, Waldumbau, Zertifizierung). Langfristig ist eine quantitative Effizienzsteigerung in Kombination mit einer qualitativen Optimierung der Brennstoffe für eine weitere Marktentwicklung ausschlaggebend. Um eine Rationalisierung in den genannten Fällen erzielen zu können, fehlen jedoch belastbare wissenschaftliche Daten. Zunächst muss die gesamte Bereitstellungskette mittels ausführlicher Analysen so umfassend wie möglich abgebildet werden, z. B. durch Literaturrecherche, Expertenbefragungen und Praxismessungen. Erst danach können Rationalisierungspotenziale und Optimierungsmöglichkeiten erkannt werden. Die sich hieraus ableitenden Empfehlungen werden helfen, zukünftigen Ansprüchen an eine ökologisch verträgliche und ökonomisch sinnvolle Hackschnitzelbereitstellung gerecht zu werden.

3 Zielsetzung und Aufbau der Forschungsarbeit

DANIEL KUPTZ, FABIAN SCHULMEYER, HERBERT BORCHERT & HANS HARTMANN

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung innerhalb der Bereitstellungskette aufzuzeigen und damit die Produktion von Waldhackschnitzeln zu rationalisieren. Die angestrebte Optimierung bedarf dabei zunächst der Analyse aller einzelnen Prozessschritte, wobei sowohl unterschiedliche technische Verfahren, als auch rohstoffbedingte Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Hierzu werden umfassende Verfahrensdaten zur Vorbereitung, Herstellung, Aufbereitung und Qualitätssicherung von Waldhackschnitzeln erarbeitet. Aus dieser wissenschaftlichen Grundlage werden jeweils Optimierungsansätze und Empfehlungen für die Praxis formuliert.

Dieser Forschungsbericht enthält fünf Kapitel, die jeweils gezielt auf ausgewählte Fragestellungen für eine optimale Hackschnitzelbereitstellung eingehen. Im Kapitel „Prozessanalyse der Hackschnitzelbereitstellung“ (Kapitel 4) erfolgt eine detaillierte Betrachtung und Bewertung der Verfahrensketten zur Hackschnitzelproduktion im Wald. Dabei werden zunächst gängige Verfahrensketten durch Literaturrecherchen und Expertenbefragungen definiert. Anschließend erfolgt eine Systematisierung der Prozessketten. Veröffentlichte Verfahrenskennzahlen werden durch eigene Zeitstudien ergänzt. Die Zeitstudien umfassen zum einen praxisübliche Verfahren, zum anderen neu entwickelte Prozessketten, die gezielte Fragestellungen bei der Hackschnitzelproduktion, z. B. bei der Jungbestandsdurchforstung oder der Aushaltung von Energierundholz, beantworten sollen. Die Zeitstudien wurden in Zusammenarbeit mit den Bayerischen Staatsforsten (BaySF) und privaten Forstunternehmen durchgeführt. Ausgehend von den veröffentlichten und neu gewonnenen Daten werden Leistungs- und Kostenmodelle zur Unterstützung forstbetrieblicher Entscheidungen erarbeitet.

Das Kapitel „Hackschnitzelqualität (physikalisch)“ (Kapitel 5) befasst sich mit herstellungs- und rohstoffbedingten Einflüssen auf die Brennstoffqualität. Hierzu werden sowohl bei den Feldmessungen zu Kapitel 4 als auch bei stationären Hackversuchen am TFZ Hackschnitzelproben gewonnen, welche aus unterschiedlichen Rohmaterialien und mit unterschiedlichen technischen Verfahren hergestellt wurden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf alternativen Rohmaterialien, z. B. auf Energieholz aus Kurzumtrieb, Pflege von Verkehrswegen und Stromtrassen, sowie auf Holz aus dem Siedlungsraum. Alle Proben werden mittels Normprüfverfahren, aber auch mittels neuartiger Analyseverfahren auf ihre physikalischen und stofflichen Eigenschaften hin untersucht. Die Untersuchungen zu den inhaltstofflichen Hackschnitzelqualitäten werden gesondert im TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“ wiedergegeben. Anschließend werden die Proben auf ihre Tauglichkeit für unterschiedliche Anwendungsbereiche, z. B. für den Einsatz in privaten Feuerungen oder Biomasseheizwerken, bewertet. Aus den gewonnenen Datensätzen werden Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Hackschnitzelqualität erarbeitet, die schon während der Produktion beachtet werden können.

Parallel zu den Feldmessungen und den stationären Hackversuchen werden Messungen zum spezifischen Energieverbrauch und zur Durchsatzleistung während der Hackschnit-

zelproduktion durchgeführt. Die Ergebnisse der Feldversuche werden in Kapitel 4 integriert. Kapitel 6 „Energiebedarf und Durchsatzleistung (stationär)“ gibt die Ergebnisse der stationären Versuche am TFZ wieder. Hierbei zeigen Änderungen einzelner Prozessparameter die Gründe für einen hohen Energieverbrauch und eine geringe Durchsatzleistung auf. Die Ergebnisse werden mit den Daten der Feldversuche verglichen.

In Kapitel 7 „Belüftungswiderstand während der Hackschnitzeltrocknung“ werden Grundlagen zur Dimensionierung der Gebläseleistung für die technische Hackgut-trocknung ermittelt. Mithilfe eines eigens konstruierten Strömungskanals wird die Abhängigkeit des statischen Drucks bei der Belüftung einer Schüttgutmenge von der Schüttgutart und dem Volumenstrom bestimmt. Anhand der Datensätze werden Modelle entwickelt, welche für die jeweiligen Schüttgutarten den zu erwartenden Belüftungswiderstand in Abhängigkeit eines frei wählbaren Volumenstroms wiedergeben. Die Wahl eines geeigneten Gebläses für die Trocknung von Hackschnitzeln wird somit durch die gewonnenen Ergebnisse erleichtert.

In Kapitel 8 „Schätzverfahren und Umrechnungsfaktoren“ werden aus der Literatur bekannte Verfahren und Faktoren für die Volumina und die Masse von Waldhackschnitzeln (z. B. Festmeter in Schüttraummeter) durch praktische Messungen aktualisiert und ergänzt. Die in der Praxis gängigen Verfahren tragen große Unsicherheiten in sich. Umrechnungsfaktoren variieren je nach Ausgangsmaterial und anderen Rahmenbedingungen. Durch Feldstudien im Wald und stationäre Messungen am Betriebshof werden praxistaugliche Verfahren zur Ermittlung der zu erwartenden Hackschnitzelmenge abgeleitet.

In den einzelnen Kapiteln werden gezielt Optimierungsreserven bei der Hackschnitzelbereitstellung identifiziert. Dabei werden Empfehlungen für eine effiziente Hackschnitzelproduktion in der Praxis gegeben. Ausgehend von den wissenschaftlich abgesicherten Ergebnissen wird es somit möglich sein, die Herstellung von Waldhackschnitzeln für eine weitere Marktentwicklung zu rationalisieren und aktuellen und zukünftigen Ansprüchen an die Prozesskette gerechter zu werden.

4 Prozessanalyse der Hackschnitzelbereitstellung

KARL HÜTTL, FABIAN SCHULMEYER, DANIEL KUPTZ, ELKE DIETZ, FLORIAN ZORMAIER & HERBERT BORCHERT

4.1 Stand des Wissens

Noch in den frühen 1990er Jahren wurde in Deutschland Waldrestholz hauptsächlich aus Forstschutzgründen gehackt. Als Energieholzsortiment hatten Waldhackschnitzel nur eine geringe Bedeutung, die hauptsächlich in der Wärmeerzeugung in privaten Kleinanlagen lag. Vor allem mit dem ersten Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 29. März 2000 (EEG 2000) bzw. der dazu erlassenen Biomasseverordnung vom 21. Juni 2001 wurde über die garantierte Einspeisevergütung für regenerativ erzeugten Strom der Einsatz von Waldhackschnitzeln in Heizkraftwerken betriebswirtschaftlich attraktiv. Hinsichtlich der reinen Wärmenutzung liegen die Gründe in der Entwicklung des Rohölpreises ab der Jahrtausendwende.

Die nachfolgende Darstellung reicht von den verwendeten Waldholz-Sortimenten über die Maschinenausstattung bis zur Untersuchung der Bereitstellungskette in Arbeitsstudien.

4.1.1 Grundsätzliches zur Waldholznutzung

Holznutzungskonzepte

In Anlehnung an die grundsätzlichen Überlegungen anderer Studien und darin vorgestellte Verfahrensketten ([64][67][99][176][143][193][201]), lassen sich folgende grundlegende Nutzungskonzepte für Waldholz herausstellen, denen entsprechende forstwirtschaftliche Verfahrensketten zugeordnet werden können:

- **Rein stoffliche Holznutzung:** Bei dieser „klassischen“ Nutzung des Hochwaldes werden Stammholz- und Industrieholzsortimente zur stofflichen Verwertung produziert. Ziel dieser Aushaltungsvariante ist die Maximierung des stofflich verwertbaren Sortimentsanfalls [99]. Hierbei verbleibt der sogenannte „Schlagabraum“ – synonym „Schlagrücklass“ [117] – als technisch ungenutztes Waldrestholz.
- **Reine Energieholznutzung:** Hierbei wird Holz gezielt für die energetische Nutzung eingeschlagen oder das bei vorangegangenen Maßnahmen, z. B. Hiebs- oder Forstschutzmaßnahmen, angefallene Restholzsortiment wird sekundär genutzt.
- **Kombinierte stoffliche und energetische Holznutzung:** Hierbei werden stofflich zu nutzende Sortimente kombiniert mit Energieholz ausgehalten. Je nachdem welche stofflichen Sortimente produziert werden und wie diese definiert sind, variieren die Aushaltungsgrenzen und damit der Anteil des Energieholzes am genutzten Holz.

Als Weiterentwicklungen wird beispielsweise das Konzept der „Stammholz-Plus-Aushaltung“ als eine „zwei-Produktgruppen-Strategie“ für die Nutzung von Nadelstark-

holz beschrieben. Hierbei wird auf die Aushaltung von Industrieholzsortimenten zugunsten des Energieholzes verzichtet [176].

Herkunft, Klassifizierung und Sortierung

Ausgangsmaterial der Waldhackschnitzelproduktion ist das Hackholz, also das ungehackte Waldholz. In der außer Kraft befindlichen ÖNorm M 7132 [158] ist Hackholz als „in manipulierbare Längen eingekürztes, (grob-)entastetes Derby- und/oder Reisholz, das zur Hackguterzeugung bestimmt ist“, definiert.

Bei der Einteilung der Herkünfte gibt es zwei Richtungen im Sprachgebrauch, nämlich nach den einschlägigen Normen und nach den forstwirtschaftlich gebräuchlichen Begriffen.

Die Herkunftseinteilung nach der Brennstoffnorm DIN EN ISO 17225-1 [58] ist auszugsweise in Tabelle 1 dargestellt. Gegenstand der Norm ist die Brennstoffspezifikation fester Biobrennstoffe, wobei „holzartige“ Biomasse ein Teil davon ist.

Tabelle 1: Beispiele für die Herkunft nach DIN EN ISO 17225-1 (Auszug).

1 Holzartige Biomasse

1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz* 1.1.4 Waldrestholz
---	--

**) vgl. Erläuterung zum Begriff „Stammholz“ im Text*

Die verwendeten Begriffe sind in der Norm DIN EN 14588 wie folgt definiert:

- **Vollbaum:** „Gefällter, nichtentasteter Baum unter Ausschluss des Wurzelsystems“
- **Waldrestholz:** „Rückstände von holzartiger Biomasse, die bei der Holzernte erzeugt werden“
- **Stammholz:** „Teil des Baumstamms, von dem die Zweige entfernt sind“

Bei den forstwirtschaftlichen Begriffen und Handelsgebräuchen zeigen sich Abweichungen zu diesen Definitionen. Der Handelsklassensortierung für Rohholz (Forst-HKS) wurde mit Aufhebung der EWG-Richtlinie 68/89 zum 01.01.2009 die gesetzliche Grundlage entzogen [173]. Inzwischen wurde eine privatrechtliche Vereinbarung zwischen Deutschem Forstwirtschaftsrat (DFWR) und Deutschem Holzwirtschaftsrat (DHWR), die Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR), formuliert und befindet sich kurz vor der Einführung [37]. Energieholz wird darin als Rohholz verstanden, das der energetischen Nutzung zugeführt wird.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass der Begriff „Stammholz“ in den oben genannten Normen anders belegt ist als in der Forstwirtschaft üblich. So wird in der RVR darunter Rundholz verstanden, das im Regelfall in die Säge- oder Furnierindustrie fließt [37]. Nach den oben genannten Normen kann unter „Stammholz“ aber auch Energierundholz verstanden werden. Im vorliegenden Bericht wird der Begriff „Stammholz“ im forstwirtschaftlichen Sinne und somit nicht für Energierundholz verwendet.

Die beiden häufigsten Ausgangsmaterialien beim Hackholz sind **Waldrestholz**, **Vollbäume** und **Energierundholz**.

- **Waldrestholz** (Abbildung 1A): Baumkompartimente, die nach Abschluss des Hiebes im Wald, auf der Fläche oder auf der Rückegasse verbleiben [141], wie Wipfel, Kronen und Kronenteile, Äste und das X-Holz (nach Anlage 3 des Tarifvertrages über die Entlohnung von Holzerntearbeiten nach dem Erweiterten Sortentarif (EST) in der Fassung vom 19.12.2000 sind X-Holz „Baumteile oder Bäume ab Brusthöhendurchmesser (BHD) 7 cm, die bearbeitet, jedoch nicht verwertet werden“. Dies sind z. B. rotfaule Stammabschnitte der Fichte, Kappholzstücke bei Überlängen, Bruchstücke u. Ä.).
- **Vollbäume**: Gefällte, komplette Bäume. Sie beinhalten damit die oberirdische Biomasse ohne den Wurzelstock [140] und ggf. bei Fällen, Vorliefern und Rücken abgebrochene Baumteile.
- **Energierundholz** (Abbildung 1B): Energierundholz ist kein Restholzsortiment, also kein Koppel- oder Nebenprodukt der Holzernte, sondern ein gezielt hergestelltes Sortiment. Die Norm DIN EN 844-2 [57] versteht Rundholz als „gefällter, entasteter und entwipfelter Baum, der auch in kurze Abschnitte geschnitten sein kann“ [141]. Durch die Entscheidung zur energetischen Verwendung wird es zu Energieholz [37] bzw. zu Energierundholz. In der Praxis werden dem Energierundholz auch X-Holz-Abschnitte und minderwertige Stammholzabschnitte und starke Äste (Laubholz) beigegeben.

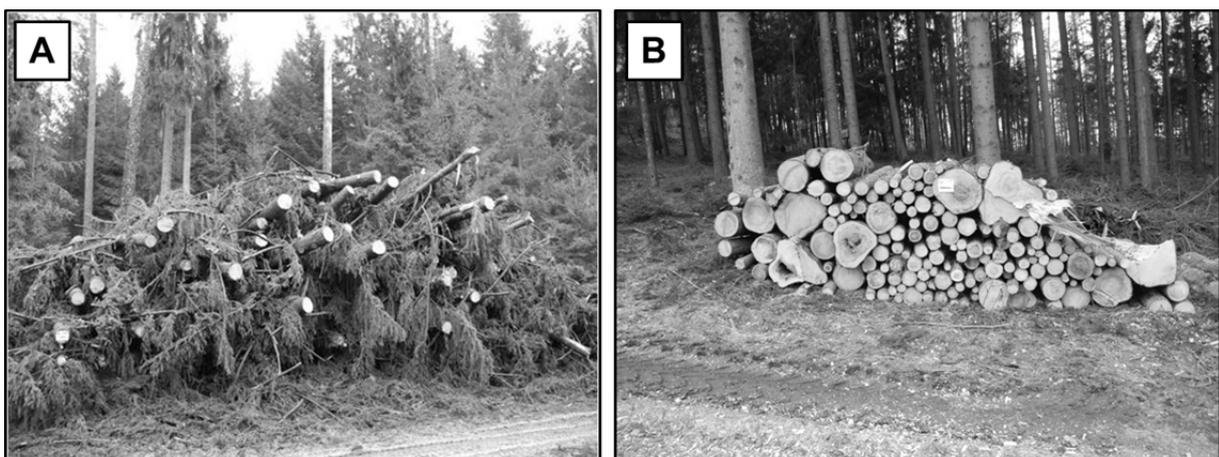


Abbildung 1: Beispielhafte Polter aus Waldrestholz (A) und Energierundholz (B).

Anders als beim Industrieholz ist eine Qualitätssortierung des Energierundholzes ungebrauchlich. Je nach Vereinbarung kann Energierundholz in festen oder freien Längen

bereitgestellt werden. Seitens forstlicher Dienstleister wird von einer neu eingeführten Sortimentsbezeichnung für Energieholz, das sogenannte „ISE“ berichtet [78]. „ISE“ steht dabei für „Industrieschichtholz Energie“, ein Sortiment aus grob geasteten Fichtengipfeln, das in Längen von 4 m und einem Zopf von bis zu 3 cm ausgehalten wird. Eine Variante des Energierundholzes ist bei den Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. unter der Bezeichnung „gestreifte Gipfel“ bekannt. Es handelt sich hierbei um grob entastete („gestreifte“) Hackholzsortimente aus Gipfelmateriale, wobei dieser zusätzliche Verfahrensschritt der Hackschnitzelqualität und der Nährstoffnachhaltigkeit zugleich dient [208].

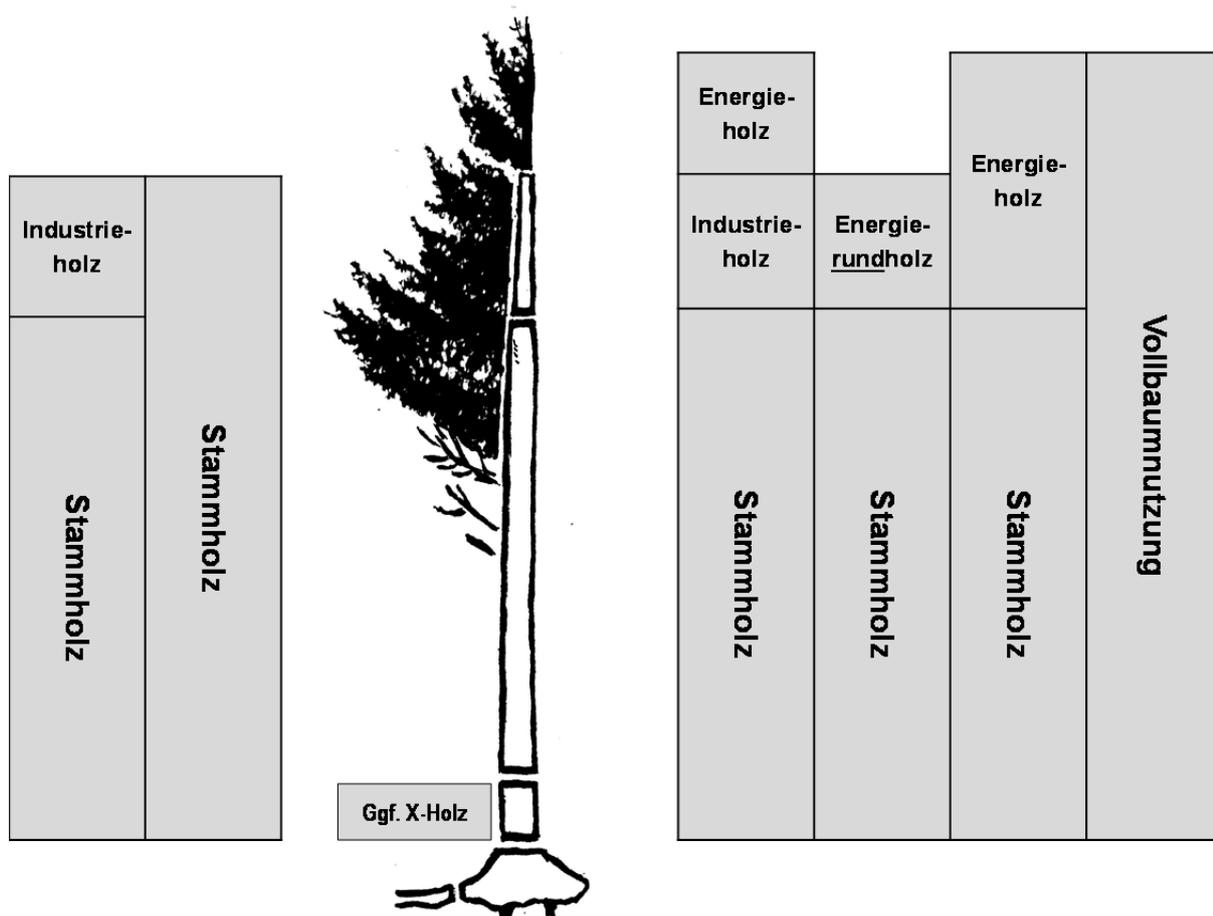


Abbildung 2: Schematische Darstellung alternativer Holzsortimentierung. Die grauen Flächen stellen im Beispiel die technisch genutzten Sortimente dar.

In Anlehnung an die bisherigen Ausführungen lässt sich das Beispiel der Sortimentsauswahl aus Abbildung 2 im Prinzip auf alle wipfelschäftigen Bäume anwenden. Beim Laubholz können, je nach Kronenausformung, mehrere Abschnitte Industrieholz bzw. Energierundholz anfallen.

Da Stammholz, Industrieholz und Energierundholz entastet werden, verbleibt das Astholz bei diesen Aushaltungsvarianten ebenfalls als Schlagrücklass. In der Praxis bleibt meist zudem auch ein Teil des Waldrestholzes im Wald. Die Vollbaumnutzung ist somit

die intensivste Nutzungsvariante, wobei auch hier von Ernteverlusten ausgegangen werden kann [201]. X-Holz wird nur bei mangelhafter Holzqualität (z. B. Fäule) bis zum gesunden Holz ausgehalten. Es kann auch als Zwieselstücke o. Ä. anfallen. Da Stammholz und Industrieholz jeweils in „kurz“ oder „lang“ ausgehalten werden können, ergeben sich zusätzliche Varianten [37].

Polterung des Hackholzes

Hackholz wird üblicherweise in Poltern (auch: Gantern) auf zentralen Plätzen, auf Freiflächen oder im Wald entlang der Forststraße zum Hacken bereitgestellt. In Tabelle 2 sind Anforderungen an die polterweise Bereitstellung von Hackholz dargestellt.

Es empfiehlt sich, das Hackholz entlang schwerlastbefahrbarer, möglichst durchgängiger Forststraßen im Abstand von 1 m, jedoch maximal 4 m mit dem stärkeren Ende (Kronenfuß, „dickkörtig“) im rechten Winkel zur Forststraße abzulegen [11]. Bei Sackwegen sollte linksseitig gelagert werden (bezogen auf die Abfuhrrichtung des Lkw). Dadurch können Hacker und Lkw Heck an Heck aufgestellt werden.

Tabelle 2: Anforderungen an Hackholzpolter für eine effiziente Hackschnitzelbereitstellung in Anlehnung an BAYSF [11]

Anforderungen an Hackholzpolter

Mindestlänge der Vollbäume bzw. 0,5 m
Baumkompartimente

Höchstlänge der Vollbäume bzw. 8 m (Manipulierbarkeit beim Rücken)
Baumkompartimente

Polteraufbau

- kein überwiegendes Reisigmaterial
- kein Altholz, nur chemisch unbehandeltes Waldholz
- keine Verunreinigungen durch Fremdkörper (z. B. Bodenanhafungen)

Mindestmenge pro Auftrag 250 Srm geschätzte Hackschnitzelausbeute

Mindestmenge pro Polter 30 Srm (Erfahrungswert für eine sinnvolle Containerauslastung)*

Standort des Polters

- bei mehreren Teilpoltern: Lagerung im räumlichem Zusammenhang
- am Hang: Polter bergseitig abgelegt

** Da i. d. R. zwei Container auf einem Lkw-Zug eingesetzt werden, wird auch eine Mindestmenge pro Polter von 75 Srm empfohlen [175].*

Holzpotenziale und Mehrmengen

Vor dem Hintergrund des deutlich gestiegenen Energieholzbedarfs und der zahlreichen Förderungs- und Anreizprogramme für Holz als Energieträger wurden mehrere Potenzialanalysen erarbeitet [9][100][144].

Bei der Energieholznutzung wurde mehrfach die Möglichkeit zur Mobilisierung von Mehrmengen im Vergleich zu herkömmlichen, auf die Gewinnung stofflicher Sortimente ausgelegten Ernteverfahren diskutiert. Diese können durch Änderungen in der forstwirtschaftlichen Sortimentsbildung („Aushaltung“), verfahrensbedingt oder durch waldbauliche Maßnahmen, wie die Intensivierung der Durchforstungsstärke oder die Aufnahme planmäßiger Durchforstung in bislang ungepflegten Beständen, generiert werden. Auch hier sollen einige Literaturbeispiele angeführt werden ([2][4][137][176][201]).

Zur Optimierung der Sortimentierung, aber auch zur Hiebskalkulation stehen mehrere Softwarelösungen zur Verfügung [176][193].

Fragen der Humus- und Nährstoffnachhaltigkeit

Bedingt durch die „Energiewende“ gewinnt die energetische Holznutzung als Teil der regenerativen Energieversorgung an Bedeutung. Dadurch wurde die Diskussion über Nährstoffentzüge bei der Energieholznutzung intensiviert, da gerade die Baumkompartimente (Äste, Zweige und Nadeln/Blätter), die einen wichtigen Anteil des Hackschnitzelsortiments stellen, hohe Nährstoffgehalte aufweisen. Zur Nährstoffverteilung in Bäumen und Nährstoffbilanzen liegen umfassende Studien vor ([84][85][110][162]). Die Erhöhung der Ernteentzüge von Nährelementen bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien (Stammholz ohne Rinde, Stammholz mit Rinde, Vollbäume mit Nadeln, Vollbäume ohne Nadeln) wurde in einzelnen Fallstudien untersucht ([123][167]). Dem Nährstoffentzug bei der (Energie-)Holzernte kann auf verschiedene Arten begegnet werden. Wichtig ist hier der Einsatz technischer Verfahren, die es ermöglichen, insbesondere die nährstoffreichen Baumkompartimente im Bestand zu belassen. Eine standortsangepasste Nutzungsentscheidung ist jedoch am effektivsten. Ein Ausgleich der Nährstoffentzüge im Wald (z. B. durch Ascherückführung) ist wegen der Komplexität bodenchemischer [123] und bodenbiologischer Vorgänge kritisch zu bewerten [192] (siehe hierzu auch TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzel aus Bayern“). Auch die bestehenden abfall- und düngerechtlichen Vorgaben lassen eine direkte Rückführung nicht aufbereiteter Holzasche in den Wald nicht zu.

Ein grober bundesweiter Überblick über die Biomassepotenziale und ihre Nutzungsmöglichkeiten, bezogen auf Wuchsregionen, wurde erstellt [120]. Die Bodenzustandserhebung (BZE II) [122][192] und die „Kalkungskulisse“ der LWF [192] geben Auskunft über den Zustand der Waldböden in Bayern. Genauere Daten zur Nährstoffversorgung der Böden liegen im BASIS [15][157], dem Bayerisches Standortinformationssystem der Forstverwaltung, vor. Diese Daten sind wichtiges Hilfsmittel für die Beratung privater und kommunaler Waldbesitzer durch die Bayerische Forstverwaltung.

Handlungsempfehlungen und Entscheidungshilfen zur Energieholznutzung werden für private und kommunale Waldbesitzer aktuell unter anderem auf Grundlage der BASIS-Daten weiterentwickelt. Die Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. (BaySF) haben bereits 2012 als internes Nährstoffmanagementsystem sogenannte Kronennutzungskarten eingeführt.

4.1.2 Forstwirtschaftliche Verfahrenstechnik

4.1.2.1 Die Elemente forstwirtschaftlicher Verfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Im Nachfolgenden werden Elemente praxisüblicher, regulärer Bereitstellungsketten für Waldhackschnitzel vorgestellt. Diese beginnen bei der Fällung des Baums (vgl. Holznutzungs-konzepte unter 4.1.1) oder mit der Aufnahme verwertbarer Restholzsortimente (z. B. Kronen) aus dem Schlagrücklass. Sie enden mit der Lieferung der Hackschnitzel zum Endabnehmer, z. B. zum Heizwerk. Hiervon zu unterscheiden sind besondere, situationsbedingte Bereitstellungsketten, z. B. bei Kalamitätsnutzungen wie Sturmwurf. Bereitstellungsketten für Waldhackschnitzel sind stets eine Kombination forstwirtschaftlicher Verfahrensschritte.

Grundsätzlich sind zwei Verfahrenskettengrundmuster zu unterscheiden (Abbildung 3).

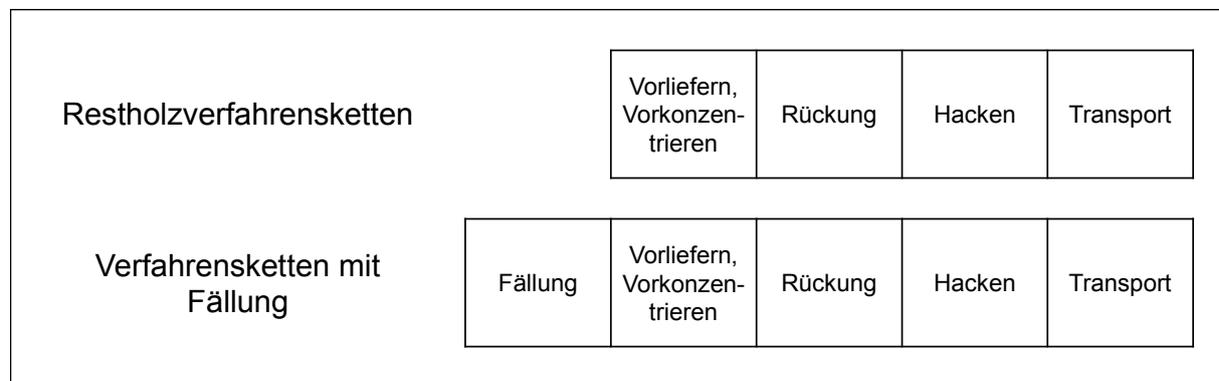


Abbildung 3: Grundmuster der Verfahrensketten (Restholzverfahrensketten und Verfahrensketten mit Fällung) und enthaltene Verfahrensschritte

Die für die Bereitstellungsketten für Waldhackschnitzel typischen Verfahrensschritte sind in mehreren Veröffentlichungen beschrieben ([67][115][140][141][184][201]).

- **Fällung:** Typische Elemente sind das Setzen des Fällschnitts, das Zufallbringen des Baums, die Entastung und Einteilung des Baums in festgelegte Sortimente („Aushalten“) und Nebenarbeiten wie z. B. das Abtrennen schadhafter Stammstücke („Gesundschneiden“) sowie ggf. die Vermessung. Bei Restholzverfahrensketten entfällt dieser Schritt.

- **Vorliefern, Vorrücken, Vorkonzentrieren:** Der erste Transport des ganzen Baums bzw. der bereits im Bestand aufgearbeiteten Stammabschnitte oder Restholzsortimente aus einem vorangegangenen Hieb zur Rückegasse, ggf. Ablage entlang der Rückegasse einzeln oder in Haufwerken („Rauhbeigen“).
- **Rückung:** Nahtransport der vorkonzentrierten Stammabschnitte oder Restholzsortimente, seltener ganzer Bäume entlang einer Rückegasse bis zu einer Lkw-befahrten Forststraße oder einem Sammelplatz („Polterplatz“), in der Regel mit sortimentsweiser Ablage auf Poltern.
- **Hacken:** Zerkleinerung mit mobilen Hackern, meist auf der Forststraße, und Förderung (Wurfgebläse, Förderband) der Waldhackschnitzel in Transportbehälter.
- **Transport:** (Fern-)Transport der Waldhackschnitzel zur Verbrauchsstelle oder in ein Lager.

Bei Transport und Logistik können optional weitere Verfahrensschritte vorkommen:



Abbildung 4: Hackschnitzelshuttle im Einsatz (A), Vortrocknen eines Hackholzpolters auf einer Wiese (B)

- **Shuttle-Transport der Waldhackschnitzel:** Transport durch ein Shuttle vom Hacker in ein Zwischenlager oder zu einem Umladeplatz, an dem die befüllten Container zum Weitertransport auf Lkw umgeladen werden (Abbildung 4).
- **Lagerung und Vortrocknung des Hackholzes:** Gezielte Lagerung der Sortimente vor dem Hacken zur Vortrocknung und zur Sammlung verstreut anfallenden Hackholzes. Die Vortrocknung des Hackholzes ist hauptsächlich auf windhöffigen Freiflächen außerhalb des Waldes und für den Einsatz in Kleinanlagen üblich (Abbildung 4). Die Lagerung dauert üblicherweise vom Einschlag bis zur nächsten Heizperiode [212]. Bei diesem „sommertrockenen“ Hackholz sind Wassergehalte von 25 bis 40 % zu erwarten (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.3.2.1). Bei frischem Hackholz ist mit Wassergehalten von 45 bis 60 % zu rechnen [115]. Für die rasche Abfuhr sprechen Natur- und Waldschutzgründe. Außerdem werden Hackschnitzel zur Verwendung in bestimmten Heizkraftwerken bevorzugt waldfresh bestellt und im Werk (vor)getrocknet. Hackholzpolter

werden im Staatswald i. d. R. an der Forststraße gesetzt und innerhalb von 14 Tagen gehackt [208][209].

- **Lagerung der Waldhackschnitzel:** Hauptzwecke sind hierbei der Ausgleich von Schwankungen bei den verfügbaren Liefermengen im Jahresverlauf, die kontinuierliche Belieferung der Abnehmer oder die Transportoptimierung durch Mengenbündelung. Die Waldhackschnitzel werden auf speziell eingerichteten, festen Lagerplätzen in Mieten (z. T. mit Abdeckung) eingelagert [12]. Empfehlungen zur Optimierung gibt z. B. LWF-Merkblatt 11 [10]. Bisweilen werden zur Lagerung auch landwirtschaftliche Fahrsilos, Maschinenhallen oder speziell errichtete Lagerhallen genutzt. Zusätzlicher Nutzen der Zwischenlagerung kann bei sachgerechter Ausführung eine Absenkung des Wassergehalts sein. Die Einlagerung frischer Waldhackschnitzel kann jedoch in mehrfacher Hinsicht zu einer Qualitätsverschlechterung und einem Masseverlust der Hackschnitzel führen. Der Substanzabbau der Holzhackschnitzel durch Lagerung im waldfrischen Zustand wird dabei ganz überwiegend durch die Aktivität von Bakterien und Pilzen verursacht. Das Ausmaß hängt von unterschiedlichen Bedingungen ab. In einem Fallbeispiel wird von einem Trockenmasseverlust von 20 bis 23 % innerhalb von 7 bis 9 Monaten (monatlich ca. 2,9 %) bei waldfrischer (50 bis 55 % Wassergehalt) Einlagerung feiner Hackschnitzel im unabgedeckten Haufwerk im Freien mit ca. 60 m³ Volumen berichtet [115]. Der Trockenmasseverlust lag bei abgedeckt gelagerten, getrockneten (15 % Wassergehalt) Hackschnitzeln im Verlauf derselben Lagerperiode nur bei 2 % (ca. 0,3 % pro Monat). Auch die inzwischen abgelöste ÖNorm M7133 [159] geht davon aus, dass Hackschnitzel bei einem Wassergehalt von 30 % und weniger „lagerbeständig“ sind, wobei dieser Wert lediglich eine grobe Orientierung darstellt. Neben dem möglichen Masseverlust können von nicht sachgerechten Hackschnitzellagern auch Gesundheitsgefahren ausgehen. Die Fakten zur „Hackschnitzel-Alveolitis“, einer hauptsächlich durch Pilzsporen und Bakterien hervorgerufenen schweren Atemwegserkrankung, wurden von der LWF veröffentlicht [79].
- **Trocknung der Waldhackschnitzel:** Hauptzweck ist die Verringerung des Wassergehalts, möglich durch die Ausnutzung der Eigenerwärmung im Lager [27] oder durch Zuführung von Fremdenergie [146][20], z. B. durch Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage. Neben der Hackschnitzeltrocknung an Biogasanlagen besteht die Möglichkeit der Nutzung solarer Energie (z. B. in der Referenzanlage zur „Photovoltaik-Abwärme-basierten Schüttgut-Trocknung“ (PHAST) in Altdorf bei Nürnberg). Unabhängig vom Verfahren ist die Trocknung von Hackschnitzeln zu empfehlen, wenn die Anforderungen des Verbrennungsanlagenherstellers an den Wassergehalt der Hackschnitzel es erfordern bzw. eine längerfristige Lagerhaltung vorgesehen ist. Großanlagen können jedoch verfahrenstechnisch so ausgelegt sein, dass getrocknete Hackschnitzel keinen Vorteil bringen oder sogar zu Überhitzungen führen.
- **Absiebung der Waldhackschnitzel:** Durch die Absiebung in mobilen oder stationären Siebanlagen wird eine gewünschte Korngrößenverteilung erzielt [26].

Folgende weitere Entwicklungen seien beispielhaft genannt:

- **Verdichten und Bündeln des Hackholzes:** Mit speziellen Bündlern [201] oder Aufbauten auf Rückefahrzeugen oder Lkw [155] kann Hackholz zum Transport verdichtet werden.

- **Verdichten und Verpacken der Waldhackschnitzel:** Mit einer Biomasse-Pressen können die mit dieser Maschine produzierten Hackschnitzel zu Ballen verdichtet und verpackt werden [113].

4.1.2.2 Maschinenausstattung für die Holzernte und die Holzbringung

Praxisgängige, hochmechanisierte Verfahrensketten mit Harvesterinsatz zum Fällen wurden umfangreich beschrieben ([4][16][35][67][68][130][132][133][201][202][203]). Hinsichtlich der auch heute noch bestehenden umfassenden Bedeutung motormanueller Verfahren in der Holzernte sind ebenso Quellen verfügbar ([140][184], siehe auch Kapitel 4.3.1).

Holzernte

Neben den **Standard-Fällaggregaten** am Harvesterkran werden speziell für die Energieholzernte Energieholzaggregate, sogenannte **Fäller-Sammler-Aggregate** oder **Fäller-Bündler-Aggregate** (engl. „Feller-Buncher“), angeboten. Ein Beispiel zeigt Abbildung 5. Diese Aggregate sind durch Sammeleinrichtungen (Sammelarme) für mehrere Stämme gekennzeichnet und wurden im deutschsprachigen Raum bereits 1989 beschrieben [140]. Ihre weitreichende Verbreitung haben sie jedoch erst in der ersten Hälfte der 2000er Jahre erlangt [67].

Der wesentliche Vorteil der Fäller-Bündler-Technik liegt in der Möglichkeit, mehrere Stämme aufeinanderfolgend zu fällen und gesammelt vorzuliefern. Die Kranarbeit wird dadurch stark rationalisiert. Modelle mit Vorschubwalzen können die Stämme zudem gebündelt grob entasten und ablängen.

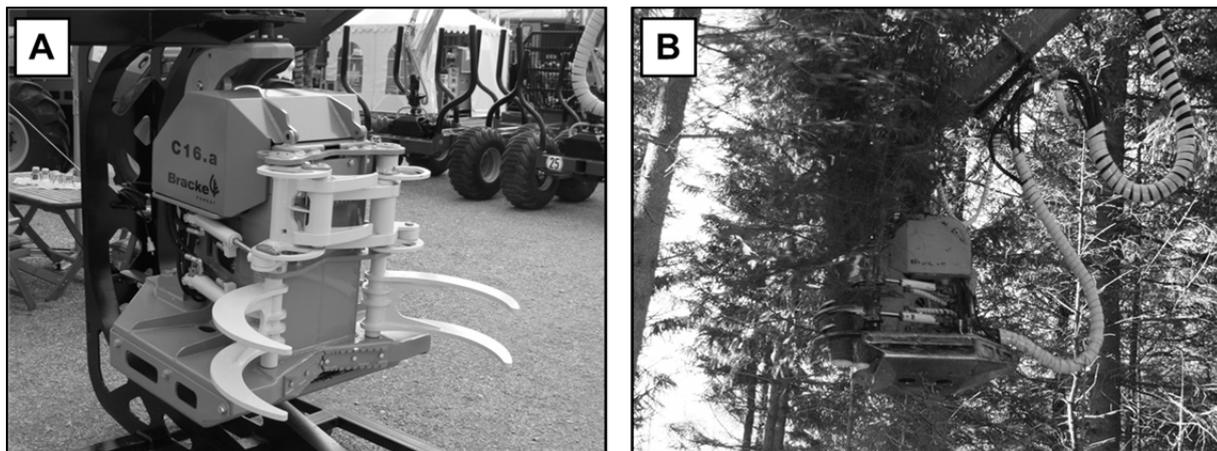


Abbildung 5: Beispiele für ein Fäller-Bündler-Aggregat (A = Nahaufnahme, B = im Einsatz)

Fäller-Bündler-Aggregate können anhand des Aggregataufbaus, der Anbauvarianten und der Einsatzbereiche beschrieben werden [96]. Typische Fäller-Bündler-Aggregate ohne Vorschubeinrichtung ermöglichen das Fällen und Kappen sowie das Sammeln mehrerer

Stämme, das stehende (also vertikale) Vorliefern und das Ablegen durch Kippen („Tilt“) des Aggregats. Die Schneideinrichtung ist eine Kettensäge auf einem Schwert oder Rundblatt, ein Sägeblatt, ein feststehendes (Amboss-Schere) bzw. bewegliches hydraulisches Messer (Bypass-Schere oder Guillotine) oder eine Fräseinrichtung. Außerdem sind Fäller-Bündler-Aggregate mit Vorschubeinrichtung und Entastungsmessern verfügbar [96][97]. Eine neuere Entwicklung sind aggressive Vorschubwalzen, die das Holz teilweise entrinden.

Seit einiger Zeit werden vermehrt **Fällgreifer** angeboten. Das sind kombinierte Holzladezangen mit Schnitteinrichtung (Messer). Diese relativ leichten Aggregate haben z. T. Astungsmesser bzw. können mit Sammeleinrichtungen ausgerüstet werden.

Baumscheren aus der Landschaftspflege, sogenannte „Zwicker“, können ebenfalls zu den Energieholzaggregaten gezählt werden.

Holzkräne an Traktoren sind heute weit verbreitet. Hier stellt sich bisweilen das Problem ausreichender Hydraulikanschlüsse für den Betrieb von Fällaggregaten an diesen Ladegeräten. Als Besonderheit kann ein Energieholz-Fällkopf bezeichnet werden, dessen Halte- und Fällfunktion nur einen Steuerkreis der Hydraulik beansprucht [19]. Das ermöglicht beispielsweise die Verwendung an Forstkränen mit standardmäßiger Hydraulikbelegung. Den gleichen Vorteil bietet z. B. der Schwachholz-Harvesterkopf NAARVA S23/S25 (Hersteller: Pentin Paja Oy). Das Gerät kann Durchforstungsholz fällen, entasten und auf vorgegebene Länge schneiden.

Die beschriebenen Energieholzaggregate dienen im Forst hauptsächlich der selektiven Läuterung und Durchforstung sowie der Anlage einer Feinerschließung. Wegen der meist relativ geringen Gerätemasse bzw. der Mehrbaumeinrichtung ergibt sich eine Fokussierung auf Schwachholz.

Einige Standard-Harvesteraggregate verschiedener Hersteller können durch die Nachrüstung von Sammelarmen zu Energieholzaggregaten ergänzt werden.

Als **Trägersysteme** für Energieholzaggregate kommen Harvester, Forstspezialschlepper oder landwirtschaftliche Schlepper bzw. Systemtraktoren mit Anbaukränen, Forwarder (dann „Harwarder“), Kranrückewagen, Bagger und sonstige Ladekräne am Lkw oder Unimog infrage.

Holzbringung (Vorliefern, Rückung)

Bei vollmechanisierten Verfahren erfolgt das Vorliefern meist durch die Kranbewegung des Harvesters oder eines anderen Trägerfahrzeugs (z. B. Schlepper, Forwarder), die Rückung durch Forwarder (Tragschlepper).

Bei Teilmechanisierung sind Forstspezialschlepper unterschiedlicher Bauarten (z. B. Seilschlepper, Zangenschlepper) und landwirtschaftliche Schlepper oder Systemtraktoren mit Forstausrüstung (z. B. Seilwinde, Rückezange) sowie Kranrückewagen (Anhänger) gebräuchlich.

Im Hochgebirge und zunehmend auch in Steillagen der Mittelgebirge werden bevorzugt Seilkransysteme eingesetzt. Seltener wird händisch oder mit Rückepferden vorgeliefert bzw. gerückt.

4.1.2.3 Maschinenausstattung des Verfahrensschritts „Hacken“

Hacker können anhand ihres Funktionsprinzips oder der Maschinenbauart eingeteilt werden. Alle Hacker zeichnen sich durch schneidende Werkzeuge (Messer) aus und sind daher empfindlich gegenüber Störstoffen (z. B. Bodenanhaftungen, metallische Fremdkörper). Hierin liegt der wesentliche Unterschied zu den Schreddern, die mit stumpfen, brechenden Werkzeugen ausgestattet sind und „Schredderholz“ produzieren. Schredder sind für die Waldhackschnitzelproduktion untypisch, sie werden überwiegend im Garten- und Landschaftsbau sowie bei der Aufbereitung von Altholz eingesetzt.

Einteilung der Hacker anhand ihres Funktionsprinzips

Die drei grundlegenden Funktionsprinzipien Scheiben-, Trommel- und Schneckenhacker sind unter 5.1.2.1 beschrieben. Schebenhacker haben tendenziell einen geringeren Leistungsbedarf, wodurch sie für den Einsatz als Anbauhacker an Traktoren der niedrigen und mittleren Leistungsklassen geeignet und am häufigsten im Eigenbetrieb zu finden sind. Der Leistungsbedarf von Trommelhackern liegt tendenziell höher, wobei die Maschinenhersteller in der Regel die zulässige Leistung am Antrieb modellspezifisch auch nach oben begrenzen. Trommelhacker werden im Inland am häufigsten in professionellen Lohnbetrieben verwendet. Schneckenhacker sind in Deutschland seltener.

Einteilung der Hacker aufgrund der Maschinenbauart

Die für die Produktion von Waldhackschnitzeln gängigen Hacker können in Anbauhacker, Anhängerhacker, Lkw-Aufbauhacker, selbstfahrende Hacker sowie Spezial- und kombinierte Maschinen eingeteilt werden.

- **Anbauhacker:** Meist handbeschickte Scheiben- oder Trommelhacker (seltener Schneckenhacker), die an die genormte Traktor-Dreipunkt-Heckhydraulik angebaut und durch die Heckzapfwelle angetrieben werden. Hacker zum Frontanbau sind seltener. Die Hubkraft der Hydraulik setzt der Hackergröße Grenzen, die Geräte sind daher tendenziell leichter (ab 200 kg) und der Leistungsbedarf (Zapfwelle) liegt schwerpunktmäßig zwischen 20 und 50 kW. Überwiegend sind es Schebenhacker [95].
- **Anhängershacker:** Durch die Heckzapfwelle eines Traktors oder eigenen Motor angetriebene Hacker. Das eigene Fahrwerk ermöglicht schwerere Konstruktionen. Bei den Anhängerhackern überwiegen die Trommelhacker [95]. Spezialausführungen mit drehbarem Turm oder angebautem Hackschnitzelbunker und Überladefunktion sind verfügbar. Abbildung 6 zeigt einen zapfwellenbetriebenen Anhängershacker im Einsatz und eine Nahaufnahme der Hackertrommel, das Einzugsband und die Einzugswalze eines Trommelhackers.

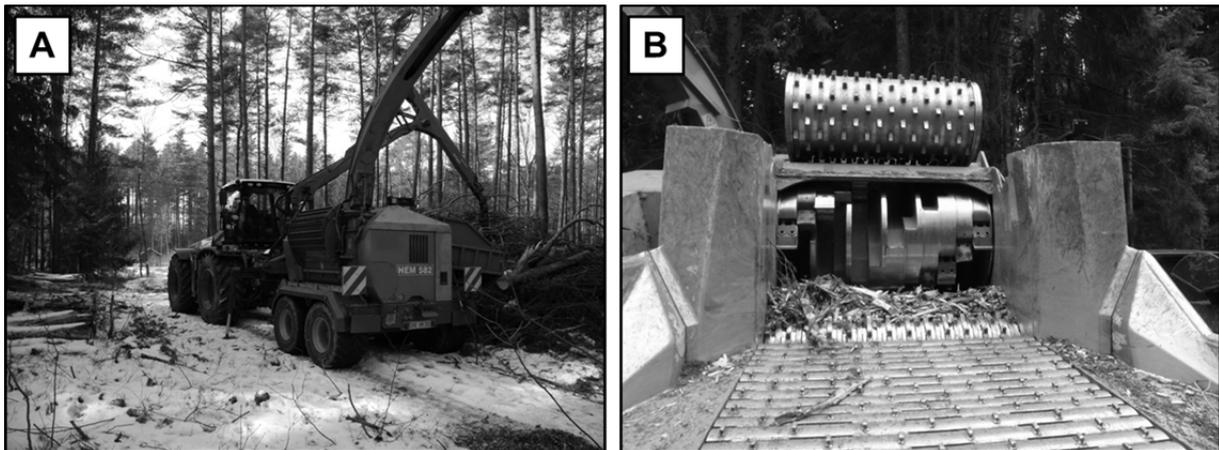


Abbildung 6: Beispiel eines Anhängers (A), Hackertrommel und Einzugstisch mit Einzugsband und Einzugstrommel (B)

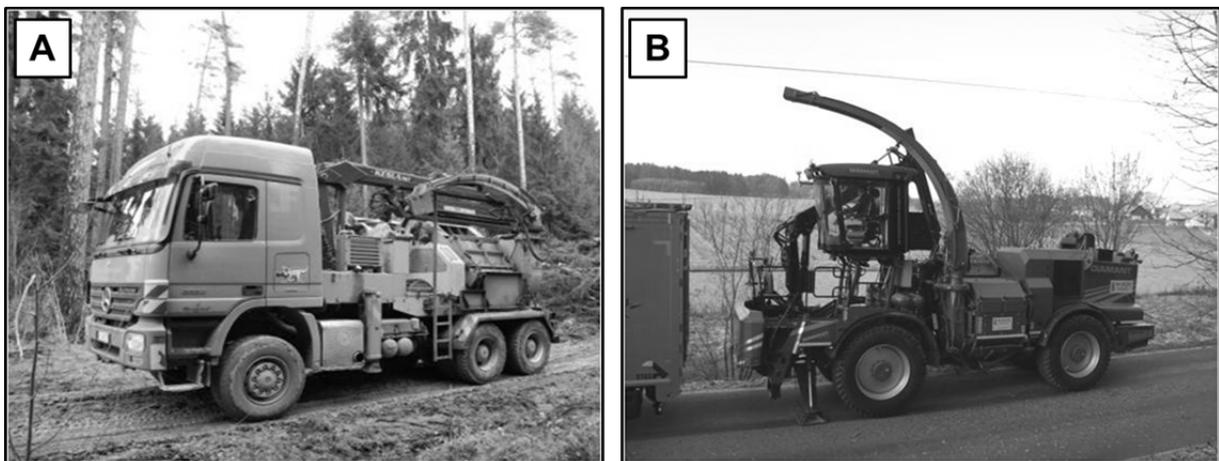


Abbildung 7: Lkw-Aufbauhacker (A) und selbstfahrender Hacker (B)

- **Lkw-Aufbauhacker:** Spezialfahrzeuge auf Basis von Lkw-Fahrgestellen mit aufgebauten Hackeraggregaten, die durch einen eigenen Dieselmotor oder direkt vom Lkw-Motor angetrieben werden (Abbildung 7). Es handelt sich i. d. R. um Trommelhacker im höheren Leistungsbereich (ab 300 kW Antriebsleistung).
- **Selbstfahrende Hacker:** Großhacker mit eigens entwickeltem oder adaptiertem Fahrantrieb (Abbildung 7). Wie bei den Lkw-Aufbauhackern handelt es sich i. d. R. um Trommelhacker im höheren Leistungsbereich (ab 300 kW Antriebsleistung). Einzelne Modelle erreichen bereits Fahrgeschwindigkeiten von 70 km/h.
- **Spezial- und kombinierte Maschinen:** Neben den genannten Standardmaschinen gibt es Hacker mit Sonderausstattungen (z. B. Raupenfahrwerk) und Sonder- bzw. Einzelanfertigungen mit eigenen Bauarten, wie z. B. der Hackschnitzel-Harvester [201], der die Fällung und das Vorliefern sowie das Hacken (Rückegasse) mit einer Spezialmaschine leistet. Diese Bauart hat sich jedoch in der Praxis nicht durchgesetzt. Eine Hacker-Mulden-Kombination auf der Basis eines Rückewagens wird von einem leistungsfähigen landwirtschaftlichen Traktor über ein eigenes Hydrauliksystem angetrieben [19]. Die Hackschnitzel werden in eine aufgebaute Hoch-Abkippmulde

gehackt, die als Shuttlesystem zum Überladen in Standard-Container oder zum direkten Transport (Höchstgeschwindigkeit 40 km/h) zum Verbraucher geeignet ist.

4.1.2.4 Transportfahrzeuge

Waldhackschnitzel werden in der Regel als loses Schüttgut transportiert. Dafür kommen landwirtschaftliche Anhänger an Traktoren und verschiedene Lkw-Systeme zum Einsatz.

Landwirtschaftliche Anhänger an Traktoren

Landwirtschaftliche Anhänger werden in unterschiedlichen Größen eingesetzt. Kleinere Kippanhänger mit Ladevolumen bis 20 m³ werden hauptsächlich für die Eigenversorgung mit Hackschnitzeln (Transport in Eigenleistung) eingesetzt (Abbildung 8A). Zu den landwirtschaftlichen Anhängern an Traktoren zählen auch die Abschiebewagen, die mit typischen Ladevolumina von 20 bis 50 m³ gebaut werden (Abbildung 8B). Sie finden hauptsächlich Verwendung beim Transport von Maishäckseln, werden aber zunehmend auch für den Hackschnitzeltransport eingesetzt. Das Gleiche gilt für Containeranhänger mit Hakenliftaufbau. Hintergrund ist hierbei, dass viele Hackerunternehmen auch landwirtschaftliche Lohndienste anbieten und daher entsprechende Fahrzeuge vorhalten.

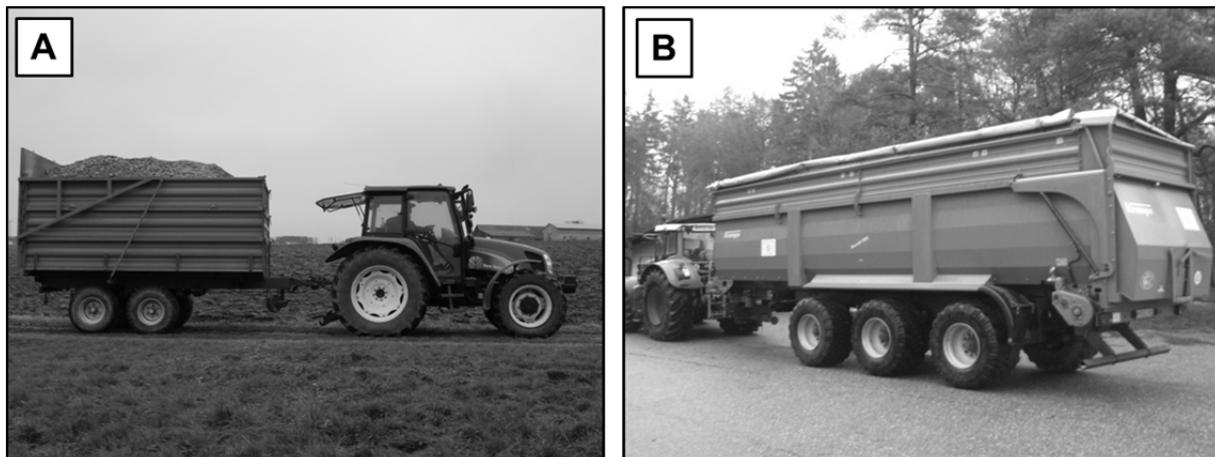


Abbildung 8: Landwirtschaftlicher Kippanhänger (17 m³) an Traktor (A), Abschiebewagen (45 m³) an Traktor (B)

Lkw-Systeme

Bei den praxisüblichen Systemen zum Lkw-Transport von Waldhackschnitzeln können Abrollcontainer-Transportsysteme, Sattelschlepper mit Aufliegern und seltenere sonstige Systeme unterschieden werden.

- **Abrollcontainer-Transportsysteme (ACTS):** Dabei handelt es sich um Lkw mit Aufbauten für Abrollbehälter nach DIN 30722-1 [41], die als Wechselcontainer auf dem

Motorwagen bzw. auf dem Anhänger transportiert werden. Beide Fahrzeuge sind mit einem genormten Schienensystem für die Aufnahme ausgerüstet, das einen Tausch der Standardcontainer ermöglicht. Die Container werden mit dem Motorwagen über ein Hakenlift-System bzw. ein Seil- oder Kettensystem geladen bzw. gekippt (Abbildung 9). Über diese Ladesysteme werden auch die Lkw- Anhänger mit den Behältern beladen. Lkw-Anhänger mit eigenen Ladeeinrichtungen für Container sind selten. Die Standard-Container haben üblicherweise Volumina von 32 bis 40 m³ (seltener bis 50 m³). Abrollcontainer können mit unterschiedlichen Spezialeinrichtungen für den Hackschnitzeltransport ausgerüstet sein. Beispiele sind integrierte Austragseinrichtungen wie Schnecke oder Schubboden. Außerdem sind Container mit doppeltem Lochblechboden oder aufwendigeren Trocknungseinrichtungen im Einsatz, in denen Hackschnitzel ohne Umladen transportiert und an externen Wärmequellen (z. B. Abwärme einer Biogasanlage) getrocknet werden können. Solche Container werden sowohl von Containerherstellern angeboten als auch in Eigeninitiative umgebaut.

- **Lkw-Sattelschlepper mit Schubboden-Auflieger (Walking-Floor):** Hierbei handelt es sich um Lkw-Auflieger auf Sattelschleppern (Abbildung 10). Die Zugmaschinen sind mit einer einzelnen angetriebenen Achse oder als Allradausführung verfügbar. Die Aufbauten sind meist mit festen Bordwänden, Hecktüren und Planendach ausgeführt. Durch hydraulisch verschiebbare Lamellen im Boden können die Behälter horizontal, also ohne Kippen, entladen werden. Die Systeme sind universal für Schüttgüter und Stückgut einsetzbar. Schubboden-Auflieger haben üblicherweise Volumina von 90 bis 94 m³.
- **Sonstige Lkw-Systeme:** Eine spezielle Form der Lkw-Anhänger sind Anhänger mit Seitenkippaufbauten und Planendach. Spezielle Kurzholz-Rungenwägen können durch Umbau der Bordwände als Hackschnitzelcontainer eingesetzt werden (Kombi-aufbauten oder Kombicontainer).

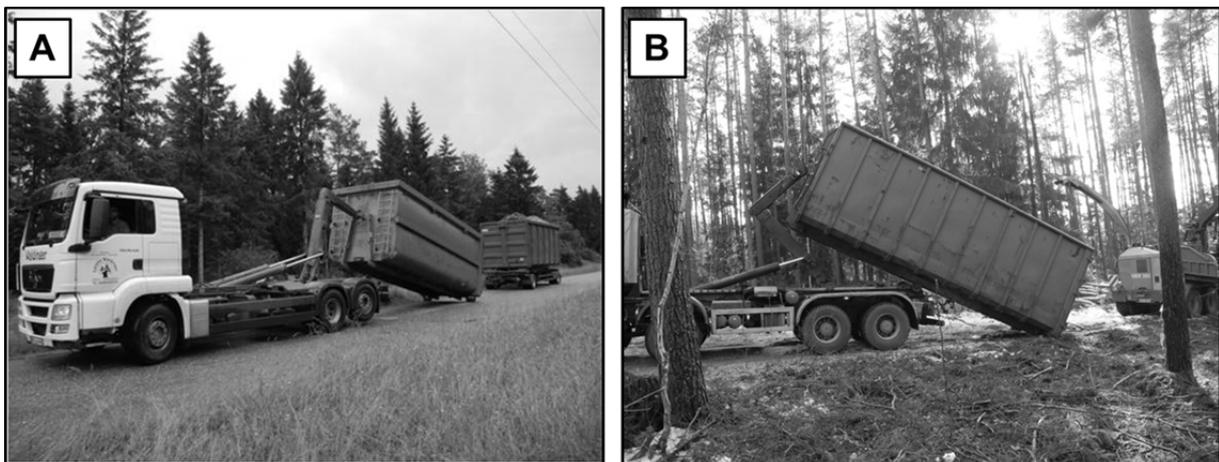


Abbildung 9: Lkw-Motorwagen mit Hakenlift beim Absetzen eines Containers am Umladepplatz (A) und in typischer Beladestelle am Hacker im Wald (B)

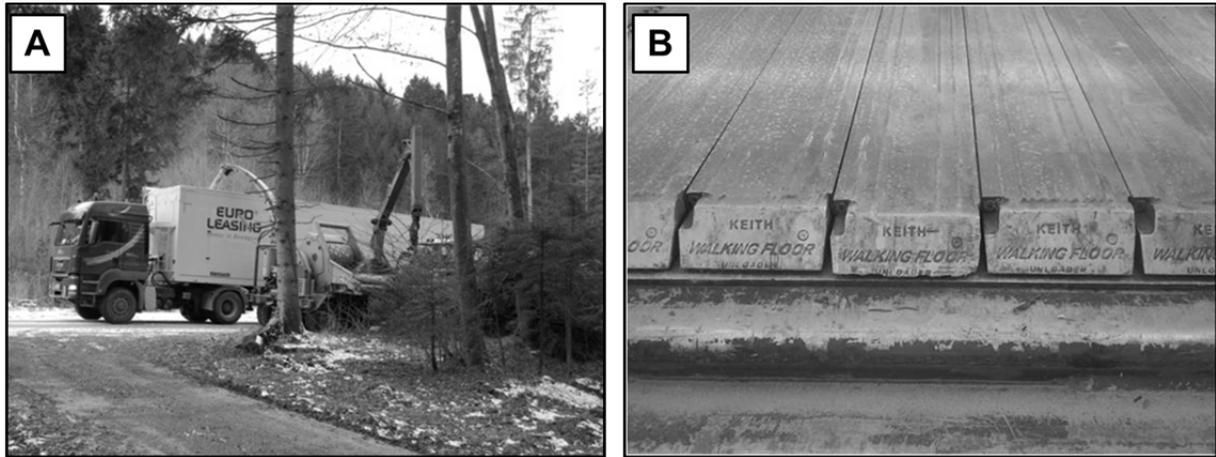


Abbildung 10: Sattelschlepper mit Schubboden-Auflieger bei der Befüllung am Hacker (A), Detailansicht der Schubbodenelemente im Aufliegerboden (B)

4.1.3 Kombination und Kopplung forstwirtschaftlicher Verfahrensschritte

Waldhackschnitzel werden durch eine forstwirtschaftliche Verfahrenskette in einer Kombination aus mehreren Arbeits- bzw. Verfahrensschritten bereitgestellt. Sind zwei oder mehrere Verfahrensschritte aus technischen und organisatorischen Gründen zeitlich und betriebstechnisch verbunden, spricht man von einer Kopplung der Verfahrensschritte. Ein anschauliches Beispiel ist die Kopplung von Hackereinsatz und Lkw-Transport.

Abbildung 11 illustriert eine typische Bereitstellungskette (Modellverfahrenskette IIIa, vgl. Abschnitt 4.3.2) als Kombination bzw. Kopplung der Verfahrensschritte. Während der Harvester und der Forwarder unabhängig voneinander arbeiten können, arbeiten der Hackerfahrer und der Transporteur zeitlich zusammen.

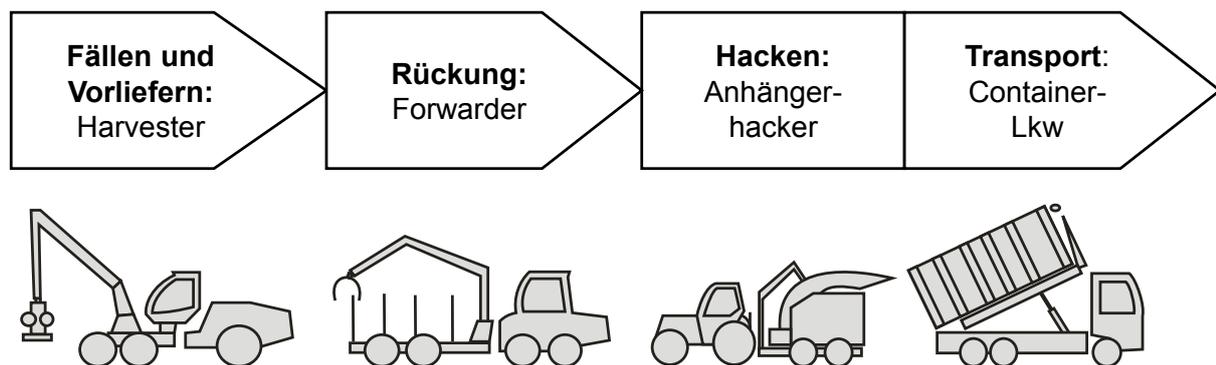


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der Kopplung innerhalb einer Bereitstellungskette. Harvester und Forwarder arbeiten voneinander und vom Hacker unabhängig (entkoppelt), während Hacker und Lkw aufeinander abgestimmt werden müssen (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet).

Demzufolge können die einzelnen Verfahrensschritte der Bereitstellungskette von Waldhackschnitzeln entkoppelt oder gekoppelt sein. Betrachtet man vollständige Bereitstellungsketten für Waldhackschnitzel vom Fällen bis zum Transport, sind diese meist nicht durchgängig gekoppelt, sondern werden an einer oder mehreren Stellen entkoppelt. Die Frage der Organisation und damit auch des (zeitlichen) Zusammenwirkens der Arbeitsschritte ist entscheidend für die Prozessanalyse. Wichtig ist dabei, dass z. B. gekoppelte Maschinen und Fahrzeuge nicht nur eine kompatible Schlagkraft haben. „Schlagkraft“ bedeutet in diesem Zusammenhang eine Kombination von Leistung, Arbeitsqualität und Effizienz einer Maschine bzw. eines Systems [179]. Ebenso wichtig sind die Auswirkungen von Standzeiten oder Arbeitsverzögerungen eines Kettenglieds auf das andere. Die Entkopplung der Prozesse Hacken und Transport stellt durch die Vorkonzentration des Hackholzes auf zentralen Hackplätzen eine Möglichkeit zur Rationalisierung dar [204].

4.1.4 Forstwissenschaftliche Arbeitsstudien

Methoden der Arbeitsforschung sind die Arbeitsplatzstudie, die Arbeitsablaufstudie und die Arbeitszeitstudie, wobei Arbeitsplatz- und die Arbeitsablaufstudie als sehr ähnlich beschrieben werden können [139]. Die meisten veröffentlichten forstlichen Arbeitsstudien sind als Kombination aus Arbeitsablauf- und Arbeitszeitstudien anzusehen. Sie haben drei Zielstellungen [139]:

- Erfassung der für den jeweiligen Arbeitsauftrag benötigten Gesamtdauer sowie deren Gliederung in einzelne **Ablaufabschnitte**, deren jeweilige Dauer die **Zeiten** ergeben. Ablaufabschnitte können Tätigkeiten, aber auch die Ursachen von Arbeitsunterbrechungen beschreiben.
- Registrierung des in der ermittelten Zeit erbrachten Arbeitsergebnisses in Form geeigneter **Bezugsmengen**. Diese sind bei Arbeitsstudien, welche die Hackschnitzelproduktion zum Gegenstand haben, das Volumen-Schüttmaß, ausgedrückt in Schüttraummeter (Srm), oder die Liefer tonnage unter Angabe des Wassergehalts. Daneben sind weitere Bezugsgrößen möglich.
- Erfassung der **Einflussfaktoren** auf den Zeitbedarf bzw. auf die Leistung.

Hinsichtlich der Zielstellung kann zwischen vergleichenden Studien, die untersuchen, ob und ggf. wie sich operationelle Alternativen (z. B. zwei unterschiedliche Maschinen) auf den Zeitaufwand bzw. die Produktivität auswirken, sowie modellierenden Studien, die die Einflussgrößen und ihr Zusammenwirken untersuchen, unterschieden werden [142].

Methoden forstwissenschaftlicher Arbeitsstudien

Innerhalb der Organisation REFA (Darmstadt) besteht die REFA-Branchenorganisation Forstwirtschaft. Inländische forstliche Arbeitsstudien sind meist im System REFA bzw. in Anlehnung daran verfasst. Nachfolgend wird das System in vereinfachter Form dargestellt [168][169]:

Grundbegriffe

Das **Arbeitsverfahren** beschreibt die Art der Erledigung einer Arbeitsaufgabe. Sie ist „vornehmlich gekennzeichnet durch die dazu benutzten Arbeits- und Hilfsmittel“ [169].

Die **Arbeitsmethode** legt fest, „in welcher Art und Weise der Mensch bei einem bestimmten Arbeitsverfahren beteiligt sein soll“ (ebenda).

Die **Arbeitsweise** „ist gekennzeichnet durch die individuelle Ausführung des Arbeitsablaufs im Anhalt an die Arbeitsmethode“ (ebenda).

Grundlage einer Arbeitsstudie ist der **Arbeitsauftrag**.

An Daten sind zu erheben: Arbeitsverfahren und eingesetzte Werkzeuge und Maschinen, Zeiten, Bezugsmengen sowie Arbeitsbedingungen und Einflussfaktoren.

Die Datenermittlung erfolgt i. d. R. nach zuvor festgelegten **Ablaufabschnitten** und **Arbeitszyklen**. **Ablaufabschnitte** sind die eigentlichen Buchungseinheiten der Arbeitszeitstudien. Der Ablauf wird bei der Planung in sinnvolle und der Zielsetzung der Studien entsprechende Ablaufabschnitte eingeteilt. Diese sollen ein Anfangs- und Endereignis haben und können zudem in Ablaufarten (Tätigkeit des Menschen, Nutzung des Betriebsmittels und Veränderung des Arbeitsgegenstands) unterteilt werden. Ein **Arbeitszyklus** ist die sich wiederholende, abgeschlossene Bearbeitung eines Arbeitsgegenstands, die solange wiederholt wird, wie Arbeitsgegenstände vorhanden sind. Die Zyklen sind somit eine zielgerichtete, systematische Abfolge von Ablaufabschnitten.

Die Ablaufabschnitte müssen vor Beginn der Studie eindeutig nach Anfang, Ende und Inhalt definiert werden. Anfangs- und Endereignisse sind eher typisch für manuelle bzw. motormanuelle Arbeiten. Bei Arbeitsstudien höher mechanisierter Verfahren können häufig keine Anfangs- und Endereignisse festgestellt werden, alternativ werden Trennpunkte zwischen den Ablaufabschnitten definiert (vgl. Abschnitt 4.2.4.1). Zudem besteht eine Tendenz zur Betrachtung der Maschine mit der Bedienperson als Einheit.

Zeiten und Zeitarten

Unter **Zeiten** wird die jeweilige Dauer der Ablaufabschnitte verstanden. Die Zeiten sind in Zeitarten kategorisiert (siehe weiterführend die Abschnitte 4.1.5 und 4.2.4.1).

Die Zeitart „**Reine Arbeitszeit**“ (**RAZ**) besteht aus „Zeiten, die ausschließlich durch den betreffenden Arbeitsgegenstand eines Zyklus verursacht werden und somit den Bezugsmengen zuzuordnen sind“ [169].

Die Zeitart „**Allgemeine Zeiten**“ (**AZ**) umfasst Zeiten, die sachlich unabhängig vom Arbeitsgegenstand bzw. vom eigentlichen Arbeitszyklus entstehen und daher zur Produktion der jeweiligen Bezugsmenge nicht oder nur mittelbar beigetragen haben. Die AZ können in **Rüst-, Pausenweg-, Verteil- und Erholungszeiten** untergliedert werden [169]. Besondere Bedeutung hat dabei die Zeitart „**Verteilzeiten**“ (**VZ**). Das sind Zeitarten innerhalb der AZ, die zur sachgemäßen Betrachtung „verteilt“ werden müssen, da sie an-

denfalls wegen der Zufälligkeit ihres zeitlichen Auftretens die Auswertung eines Zyklus bzw. die Berechnung der Leistung verfälschen würden.

Die „**Gesamtarbeitszeit**“ (**GAZ**) ist die Summe aus RAZ und AZ.

„**Nicht auswertbare Zeiten**“ (**NA**) bleiben in der Regel bei der Datenauswertung unberücksichtigt. Entscheidend dafür ist jedoch, dass die NA tatsächlich nichts mit dem Arbeitsauftrag zu tun haben und auch von der arbeitenden Person selbst (auftragswidrig) verursacht wurden.

Aufnahmeverfahren

Die Zeitaufnahme kann auf drei Arten erfolgen [168]:

- **Fortschrittszeitverfahren (FZV):** Hierbei werden die Ablaufabschnitte chronologisch hintereinander verbucht. Das bedeutet, dass der Beendigung eines Ablaufabschnitts sofort der Beginn des nächsten folgt. Die Buchung erfolgt jeweils zum Ende an einem Messpunkt, der ein Endereignis innerhalb des Ablaufabschnitts (z. B. Ablegen des Werkzeugs) oder die eindeutig erkennbare Beendigung voraussetzt. Die Ablaufabschnitte sind exakt und schriftlich zwecks Reproduzierbarkeit der Messungen festzulegen. Die jeweilige Dauer eines Ablaufabschnitts ist durch Differenzbildung mit den vorangegangenen zu ermitteln. Berechnungsgrundlage ist somit die Dauer, d. h. die Zeit des Ablaufabschnitts.
- **Einzelzeitverfahren (EZV):** Beim EZV beginnt jede Zeitmessung von Null. Die Ablaufabschnitte und deren Definition unterscheiden sich aber nicht vom Fortschrittszeitverfahren. Der Vorteil der Einzelzeitmessung liegt darin, dass die jeweilige Dauer sofort ablesbar ist und nicht erst durch Differenzbildung ermittelt werden muss.
- **Multimomentverfahren (MMV):** Hierbei wird nicht die tatsächliche Dauer eines Ablaufabschnitts, sondern die beobachtete Tätigkeit zu periodisch wiederkehrenden Zeitintervallen registriert. Die beobachteten Zeiten können bei ausreichender Datenlage aufgrund ihrer Häufigkeit statistisch berechnet werden.

Forstliche Arbeitsstudien im internationalen Kontext

Internationale Forschergruppen haben sich unter anderem im Rahmen der Kooperation in der International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) zu Methoden und Systemen forstwissenschaftlicher Arbeitsstudien ausgetauscht. Bereits 1991 wurde eine grundlegende Arbeit über Konzepte für international vergleichbare, forstliche Zeitstudien veröffentlicht [21], die feststellte, dass weder Terminologie noch Methodik die hauptsächlichen Probleme hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Studien darstellen, sondern vielmehr die unterschiedlichen Maße und Bezugsgrößen. Von der IUFRO wurde eine Arbeit zur Nomenklatur forstlicher Arbeitsstudien im Entwurfsstand vorgelegt [22]. Die Systeme nach REFA und IUFRO bestehen in Deutschland parallel. Aufbauend auf dem System IUFRO hat eine Arbeitsgruppe im Rahmen des europäischen Wissenschaftsförderprogramms COST (European Cooperation in Science and Technology) einen Leitfaden für Arbeitsstudien zur Bereitstellung von Biomasse herausgegeben [142]. Hierin werden

Empfehlungen zum Studiendesign, zur Datenaufnahme und zur Datenauswertung gegeben.

4.1.5 Ermittlung von Produktivität und Kosten

Produktivität

Eine gängige Kennziffer für die Produktivität eines Verfahrens ist die **Technische Arbeitsproduktivität (TAP)**. Sie gibt das Verhältnis des Arbeitsergebnisses (produzierte Leistungseinheiten LE) zur hierfür aufgewendeten Arbeitszeit (Anzahl der Zeiteinheiten ZE) an (Formel [4-1]).

$$TAP = \frac{LE}{ZE}$$

Formel [4-1]

Die TAP stellt den Kehrwert des **spezifischen Arbeitszeitbedarfs** dar, der als Zeitbedarf pro Leistungseinheit definiert ist [140].

Bezugseinheiten (Leistungseinheiten LE) sind üblicherweise Schüttraummeter Srm Hackschnitzel (LE: 1 Srm). Das Schüttmaß wird grundsätzlich mit Rinde verstanden [37][201]. Für Containerinhalte sind m³ zu verwenden. Bei der Holzernte finden die Bezugseinheiten Festmeter Fm (ohne Rinde) bzw. Erntefestmeter Efm Anwendung [35]. Zum Teil wird auch das Festmaß der Holzernte auf Srm Hackschnitzel unter Verwendung der ÖNorm M7133 [159] umgerechnet. Stückzahlen, z. B. Anzahl der Kronen [131] oder Flächenmaße sind seltener. Massenangaben sind nur bei Kenntnis des Wassergehalts sinnvoll. Gleiches gilt für die Bezugnahme auf den Energieinhalt.

Bezugseinheiten werden in der Regel durch weitere Angaben ergänzt, wie z. B. den mittleren BHD des ausscheidenden Bestands [67], die BHD-Klassen oder den Kronenfußdurchmesser, der analog zum Zopfdurchmesser verwendet wird [201]. Weitere Parameter sind beispielsweise die mittlere Baumbiomasse in kg atro [67] und das mittlere Baumvolumen des ausscheidenden Bestands [2]. Diese Parameter können in den Feldstudien gemessen oder mittels Biomassefunktionen (z. B. aus dem Waldwachstumssimulator SILVA) modelliert werden.

Entscheidend für die Aussagekraft und Vergleichbarkeit forstlicher Leistungsermittlung ist neben den Bezugseinheiten der **Zeitbezug**, d. h. die verwendete Zeiteinheit ZE.

Aus der Maschinenkostenrechnung wurde die in Deutschland gebräuchliche Maschinenarbeitsstunde MAS als zentraler Zeitbegriff für die produktiven Einsatzzeiten entwickelt. Sie basiert auf einem Zeitbuchungsraster von 15 Minuten, sodass Unterbrechungen der Maschinenarbeitszeit von weniger als 15 Minuten nicht erfasst werden. Die MAS wird heute im Allgemeinen als eine Maschinenarbeitsstunde mit Maschinenführer/-in verstanden [134].

Das Forest Engineering Institute of Canada verwendet die Productive Machine Hour (PMH) [171]. Dabei werden PMH_0 und PMH_{15} unterschieden. Die PMH_0 schließt keine Unterbrechungen mit ein und kann analog zur RAZ verstanden werden. Die PMH_{15} umfasst Unterbrechungen bis 15 Minuten und ist somit analog zur MAS zu sehen [160]. Hinsichtlich der Unterbrechungen analog zur RAZ/MAS bzw. zur PMH_0/PMH_{15} wird die Productive System Hour PSH_0/PSH_{15} verwendet [82][117][191].

Meist bildet eine Arbeitsstudie nur einen Teil des Arbeitsauftrags ab. Sofern Ablaufabschnitte der Zeitart RAZ beobachtet werden, ist das akzeptabel, wenn dabei eine im Einzelfall ausreichende Anzahl repräsentativer Ablaufabschnitte und ggf. auch Zyklen erfasst werden. Problematischer ist bei kürzeren Studien das Auftreten längerer AZ. Da sie definitionsgemäß nicht oder nicht unmittelbar zur Leistungserbringung beitragen, kann dadurch eine Verfälschung der Produktivität entstehen. Der einfachste Lösungsansatz ist hier die alleinige Bezugnahme auf die RAZ (bzw. PMH_0 oder PMH_{15}). Jedoch gehören AZ, unabhängig von ihrer Dauer, zur Arbeitszeit und sind oft auch unvermeidbar. Diesem Problem kann beispielsweise mit einem pauschalen Zuschlag für die AZ auf die PMH_{15} begegnet werden, um eine über die einzelne Studie gültige GAZ zu erhalten [160].

Aus in Studien gewonnenen Daten können Produktivitätsmodelle erstellt werden [35][172][191]. Als praxisorientiertes Rechenprogramm wurde von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) HeProMo, eine Software zur Kalkulation von Produktivität und Kosten bei Holzerntearbeiten, entwickelt [72].

Kosten

Die Kosten eines Verfahrens beziehen sich auf dieselben Einheiten wie die Produktivität. Gebräuchlich ist eine Ermittlung der Verfahrenskosten je Zeiteinheit (ergibt z. B. €/h (MAS)), die dann zur ermittelten Produktivität in Bezug gesetzt werden (ergibt z. B. €/Fm oder €/Srm). Die Kosten können beim Einsatz von Unternehmern als real in der Studie angefallene Kosten mit erfasst werden. Dadurch ist allerdings eine Vergleichbarkeit mit weiteren Einsätzen des Verfahrens nicht gegeben. Zudem wird die zugrunde liegende Kalkulation i. d. R. vom Unternehmer nicht öffentlich gemacht. Eine Alternative wäre die Ermittlung üblicher Marktpreise, die allerdings auch nicht systematisch zu erfassen sind. In der Konsequenz bietet sich an, die Maschinen- und Personalkosten eigens zu kalkulieren. Hierfür stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) hat ein Kalkulationsschema zur Vorkalkulation von Forstmaschinen veröffentlicht [134], ebenso die Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen [107]. Nicht nur in Anbetracht der aktuellen Diskussion in der Branche um die Verlässlichkeit der verschiedenen Kalkulationsschemata empfiehlt sich, Eingangsgrößen und kalkulierte Kostensätze mit einzelnen Forstunternehmern und Waldbesitzern zu diskutieren.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Expertenbefragung

Die Expertenbefragung wurde als telefonisches Leitfadeninterview realisiert. Insgesamt wurden 36 Interviews mit fünf identisch gewichteten Befragungsgruppen geführt:

- Waldbesitzervereinigungen (WBV) und Forstbetriebsgemeinschaften (FBG),
- Ansprechpartner für Holzenergie an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AELF),
- Forstbetriebe der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R (BaySF) und das Zentrum für Energieholz (ZfE) der BaySF,
- Hackerunternehmen,
- Forstdienstleistungsunternehmen ohne Hackerbetrieb.

Für jeden Regierungsbezirk Bayerns wurde hierzu zunächst jeweils ein Ansprechpartner/Betrieb ausgewählt. Für die BaySF wurde das ZfE zusätzlich mit einem Teil der Fragen interviewt, die für den gesamten Energieholzbereich der BaySF zentral treffender zu beantworten waren. Da die befragten Forstdienstleister nicht zugleich auch Hacker betreiben, wurden ihnen entsprechende Fragen nicht gestellt. Die Fragen und die jeweiligen Adressaten sind in Anhang 9.1 zusammengefasst.

Eine Vorbereitung seitens der Befragten war nicht nötig, jedoch wurden die Fragebögen auf Wunsch in zwei Fällen vorab zugesendet. Die 36 abgeschlossenen Telefoninterviews fanden von Mai bis August 2011 durch zwei Interviewer statt. Ein Interview dauerte im Durchschnitt ca. 20 Minuten. Da die Fragen offen und teilweise auch weit gehalten waren, wurden die zum Teil komplexen und bisweilen auch umfangreichen Antworten gutachtlich zusammengefasst und zu Antwortkategorien in einer Auswertungstabelle thematisch gruppiert. Bei Unklarheiten wurden die Fragen mithilfe dieser Antwortkategorien näher erläutert. Die Fragen und die Grundstruktur der Auswertung (Fragenkomplexe) sind aus Anlage 9.1 ersichtlich.

Die Befragungsergebnisse wurden zur Definition typischer Bereitstellungsketten (Abschnitt 4.3.2) verwendet. Sofern sie als Grundlage für weitere Bewertungen in diesem Bericht dienen, wurde das jeweils gesondert angemerkt.

4.2.2 Definition von Modellverfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Auf Grundlage der Literatursauswertung, der Befragungsergebnisse und eigener laufender Beobachtungen und Erfahrungen wurden typische Techniken und Abläufe bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln zu Modellverfahrensketten (MVK) zusammengeführt. Ziel war es, in den MVK die aktuelle Praxis repräsentativ abzubilden. Die MVK

werden nach Zielsortiment, Mechanisierungsgrad, Kopplungsgrad, Maschinenausstattung, Standort des Hackers und Einsatzbereich charakterisiert.

4.2.3 Ermittlung von Leistungs- und Kostenwerten für die Modellverfahrensketten

Für die Ermittlung von Leistungswerten für die Modellverfahrensketten (MVK, siehe Abschnitt 4.2.2) wurden Fallstudien aus der Literatur ausgewertet und die Daten um die Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Arbeitsstudien ergänzt. Kostenwerte wurden aus der Literatur sowie aus eigenen Maschinenkostenkalkulationen und veröffentlichten Sätzen von Maschinenringen und forstlichen Dienstleistungsunternehmen gewonnen (Abschnitt 4.2.4 „Verfahrenskosten, Maschinenkostenkalkulation“). Die Daten wurden für die Verfahrensschritte Fällen und Vorliefern, Rückung und Hacken ausgewertet. Leistung und Kosten der Logistik wurden in diesem Rahmen nicht verwertet, da nur wenige Studien diese explizit ausweisen bzw. konkrete Angaben zu Transportentfernungen und sonstigen Rahmenbedingungen machen [103][118].

Literaturauswertung von Leistungs- und Kostenwerten

Aus 17 Publikationen wurden 50 Fallstudien ausgewertet und die angegebenen Kosten- und Leistungswerte erfasst. Eine Übersicht hierzu in tabellarischer Form gewährt Anhang 9.2. Neben den Leistungs- und Kostenwerten wurden auch die wesentlichen Angaben zu den Verfahren und deren Rahmenbedingungen mit erfasst. Konkret sind dies:

- eine Kurzbeschreibung der Verfahrensschritte,
- das Ausgangssortiment (Laub- oder Nadelholz, Mischungen),
- der dendrometrische Bezug der Leistung (durchschnittlicher BHD bzw. BHD-Klasse, mittleres Baumvolumen, Kronenfußdurchmesser),
- die Bezugsgröße der Leistung (z. B. Srm/h (GAZ)) und der Kosten (z. B. €/Srm).

Die Fallstudien aus der Literatur wurden zunächst in sieben Verfahrenstypen gruppiert (Tabelle 3). Unter Restholzverfahrensketten (Typ 1) werden in diesem Zusammenhang Verfahrensketten verstanden, die mit der Aufnahme von Schlagrücklass aus vorangegangenen Hieben beginnen. Es sind somit Verfahrensketten ohne Fällung.

In einer zweiten Stufe wurde geprüft, inwieweit sich die Fallstudien den in Abschnitt 4.3.2 definierten Modellverfahrensketten zuordnen lassen. Entscheidende Kriterien waren dabei die Vergleichbarkeit der Verfahren, der Rahmenbedingungen und (soweit bekannt) der Methodik, die Übertragbarkeit sowie die verwendeten Bezugseinheiten.

Tabelle 3: Verfahrenstypen, in die die Fallstudien aus der Literatur eingruppiert wurden

Standardverfahrenstypen

Typ 1	Restholzverfahrensketten (ohne Fällung)
Typ 2	Teilmechanisierte Verfahrensketten (mit Fällung)
Typ 3	Vollmechanisierte Verfahrensketten (mit Fällung)

Spezialverfahrenstypen

Typ H	Hochgebirgsverfahrensketten
Typ P	Teilmechanisierte Kleinprivatwaldverfahrensketten
Typ L	Pflege und Freischnitt mit Aggregat am Bagger

Sonstige Verfahrenstypen

Typ S	Verfahrensketten mit Prototypen und Maschinen geringer Stückzahl
-------	--

Weitere Quellen für Leistungswerte

Die im Rahmen des Projekts in Arbeits- und Fallstudien (Abschnitte 4.2.4.3 und 4.2.4.4) ermittelten Leistungswerte wurden zur Ergänzung der Literaturwerte für die Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten sowie Rückung herangezogen. Für den Verfahrensschritt Hacken sind sehr umfangreiche eigene Arbeitsstudien durchgeführt worden (Abschnitt 4.2.4.1), auf deren Ergebnisse hier zurückgegriffen wurde.

Weitere Quellen für Kostenwerte

Für die in den Arbeitsstudien eingesetzten Maschinen wurden eigene Maschinenkostenkalkulationen in Anhalt an gängige Kalkulationsschemata [107][134] durchgeführt. Die ermittelten Stundensätze enthalten die Kosten für die Maschine und das notwendige Bedienpersonal. Die kalkulierten Werte wurden mit Maschinenringsätzen sowie realen Preisen forstlicher Dienstleistungsunternehmen abgeglichen. Die wichtigsten Eingangsparameter (u. A. Veralterungszeit, Abschreibungsdauer, technische Gesamtnutzungsdauer, jährliche Auslastung, Reparaturkostenfaktor) für die Kalkulationen wurden jeweils mit Unternehmern auf ihre Plausibilität hin diskutiert. Zur Ermittlung der Anschaffungspreise der kalkulierten Maschinen wurden Maschinenhändler befragt. Kosten für Kraftstoff wurden mit 1,35 €/l (Diesel) veranschlagt, Personalkosten inklusive Lohnnebenkosten mit 31 €/h (MAS) angesetzt. Die Maschinenkosten werden jeweils auf dieselbe Bezugseinheit wie die Produktivität bezogen (also z. B. €/Srm).

Zusammenführung der ermittelten Leistungs- und Kostenwerte

Die gesammelten Daten werden je Modellverfahrenskette angegeben. Sofern in den Fallstudien Wertebereiche angegeben wurden, wurden diese gemittelt. Bei Angabe von Leistung bzw. Kosten in Abhängigkeit eines Einflussfaktors (z. B. BHD) wurden die Einzelwerte mitberücksichtigt. Da in den ausgewerteten Studien unterschiedliche Bezugs-

einheiten angegeben waren, wurden diese soweit möglich auf Srm/h (MAS) für die Leistung und auf €/Srm für die Kosten umgerechnet. Dazu wurde bei Volumenangaben in Festmetern mit dem Faktor $1 \text{ Fm} \triangleq 2,5 \text{ Srm}$ umgerechnet. Bei den Zeiten wurden PMH_{15} und PSH_{15} als gleichwertig zur MAS betrachtet. Sofern nur Angaben zur Leistung mit Bezug auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) oder die Gesamte Arbeitszeit (GAZ) vorhanden waren, wurden diese überschlägig auf die Maschinenarbeitsstunde umgerechnet. Dabei wurde abgeleitet aus mehreren Studien ([67][160][186][201]) vereinfacht ein pauschaler Zuschlag von 5 % auf die RAZ bzw. ein Abschlag von 10 % von der GAZ verwendet, um den Zeitbedarf in h (MAS) zu erhalten.

Soweit möglich wurden die Fallstudien BHD-Klassen zugeordnet. Bei Angabe des Baumvolumens des ausscheidenden Bestands wurde mit einfachen Funktionen [201] auf den BHD umgerechnet.

Da die Kostenwerte aus der Literatur aus unterschiedlichen Jahrgängen stammen, wurde je vergangenem Jahr seit der Veröffentlichung bis zum Bezugsjahr 2013 eine jährliche Preissteigerung von 2 % vorgenommen.

4.2.4 Methodik der Arbeitsstudien

Die im Folgenden beschriebenen Fallstudien umfassen, von einigen im Einzelfall beschriebenen Ausnahmen abgesehen, jeweils produktions- und materialkundliche Erhebungen mit Probenahmen (vgl. Kapitel 5 ff.) sowie eine Arbeitsstudie. Neben der Aufnahme der jeweils betrachteten Maschinen und Fahrzeuge und der Rahmenbedingungen der Arbeit waren dabei Zeitstudien ein wesentlicher Bestandteil.

Zeitstudien

Die Arbeitszeitstudien wurden in Anlehnung an die bei forstlichen Arbeitsstudien in Deutschland übliche REFA-Methode im Fortschrittszeitverfahren [168] durchgeführt. Dabei wird die gesamte Arbeitszeit in einzelne, exakt voneinander trennbare Ablaufabschnitte gegliedert (vgl. Abschnitt 4.1.4). Sie werden in den nachfolgenden Kapiteln bei den speziellen Methodikbeschreibungen jeweils differenzierter dargestellt. Die Zeitstudien wurden ausschließlich beschreibend angefertigt, unvermeidbare Störungen des Ablaufs durch die Zeit- und Probenehmer/-innen blieben bei den Ergebnissen unberücksichtigt. Bei der (hoch-)mechanisierten Holzernte und beim Hacker und der Logistik stellt der überwiegende Teil der Ablaufabschnitte die Betrachtung des Mensch-Maschine-Systems dar. Die Zeitangaben sind folglich immer als Maschine bzw. Fahrzeug mit Maschinenführer/-in bzw. Fahrer/-in zu verstehen.

Ablaufabschnitte und Zyklen

Bei der jeweiligen Planung der Studien wurden Ablaufabschnitte definiert, beschrieben und mit Trennpunkten voreinander abgegrenzt. Ausschließlich für motormanuelle Tätigkeiten (vgl. Abschnitt 4.2.4.5) wurden abweichend Anfangs- und Endereignisse zur Ab-

grenzung der Ablaufabschnitte bestimmt. Zusammenfassend sind Trennpunkte entweder durch den Eintritt eines Zustands, der i. d. R. Ergebnis des zu messenden Ablaufabschnitts ist, oder durch die Aufnahme einer anderen Tätigkeit bzw. eines anderen Betriebszustands bestimmt. Beides ist von dem/der Zeitnehmer/-in eindeutig und leicht zu erkennen. Die Reaktionszeit, die von diesem Moment bis zur Buchung vergeht, ist unerheblich, da sie stets ähnlich ausfallen wird.

Für alle Zeitstudien dieser Arbeit wurden innerhalb der Allgemeinen Zeiten (AZ) die in der nachfolgenden Tabelle 4 dargestellten Verteilzeiten (VZ) und Pausenzeiten sowie die nicht auswertbaren Zeiten (NA) unterschieden.

Tabelle 4: Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Allgemeinen Zeiten (AZ) und der nicht auswertbaren Zeiten (NA).

Ablaufabschnitt Beschreibung (AZ bzw. NA)	Trennpunkte
VZ mech Verteilzeiten – mechanisch bzw. sachlich: durch den Hacker bedingte Verteilzeiten, z. B. kleine Reparaturen	Aufnahme anderer Tätigkeiten
VZ pers Verteilzeiten – persönlich: durch das Bedienpersonal des Hackers bedingte Verteilzeiten	
VZ orga Verteilzeiten – organisatorisch: durch die Organisation bzw. andere Maschinen der Prozesskette bedingte Verteilzeiten	
VZ Dritte Verteilzeiten – Dritte bzw. Störung: durch außenstehende Personen, Maschinen oder Fahrzeuge verursachte Verteilzeiten. Durch die Zeitnehmer bedingte Störungen wurden nachträglich aus der VZ Dritte ausgebucht	
Pause Erholungspausen	Wiederaufnahme der Arbeit
NA Nicht auswertbare Zeiten	Aufnahme auswertbarer Tätigkeiten

Zur mobilen Datenerfassung dienten zwei Handheld-PCs Timba-Tec Recon (Abbildung 12). Diese waren ausgestattet mit der Zeitstudiensoftware UmtPlus der Firma Laubrass. Mit dieser Software können flexible Zeitstudienmasken erstellt werden, in denen die definierten Ablaufabschnitte als anwählbare Felder auf dem Bildschirm dargestellt werden (Abbildung 12).

Die Aufnahmen erfolgten ausschließlich im Fortschrittszeitverfahren, d. h., der jeweils beobachtete Ablaufabschnitt wird nach dessen Beendigung eingebucht und es schließt sofort der nächste Ablaufabschnitt an. Die Zeitbuchung geschieht in Normalzeit (Stunden, Minuten und Sekunden [h:min:sec]). Neben den Zeiten wurden auch die jeweils

relevanten Rahmenbedingungen aufgenommen, teilweise durch automatisierte Abfragen in der Zeitstudienmaske, teilweise einzelfallbezogen durch Notizen. Die so gewonnenen Rohdaten wurden mit der Software UmtManager aufbereitet und in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2007 zur weiteren Datenaufbereitung und -auswertung exportiert.

Die Datenerfassung berücksichtigte bereits die zyklensweise Zuordnung der Ablaufabschnitte. Detailliert ist die Zyklenauswertung jeweils im Zusammenhang mit der Methodik der nachfolgenden Zeitstudien beschrieben. Die Zyklen werden dabei in der Regel über ein Anfangsereignis und ein Endereignis begrenzt. Ein Zyklus bezieht sich auf einen Arbeitsgegenstand oder eine abgrenzbare Reihe von Arbeitsgegenständen.

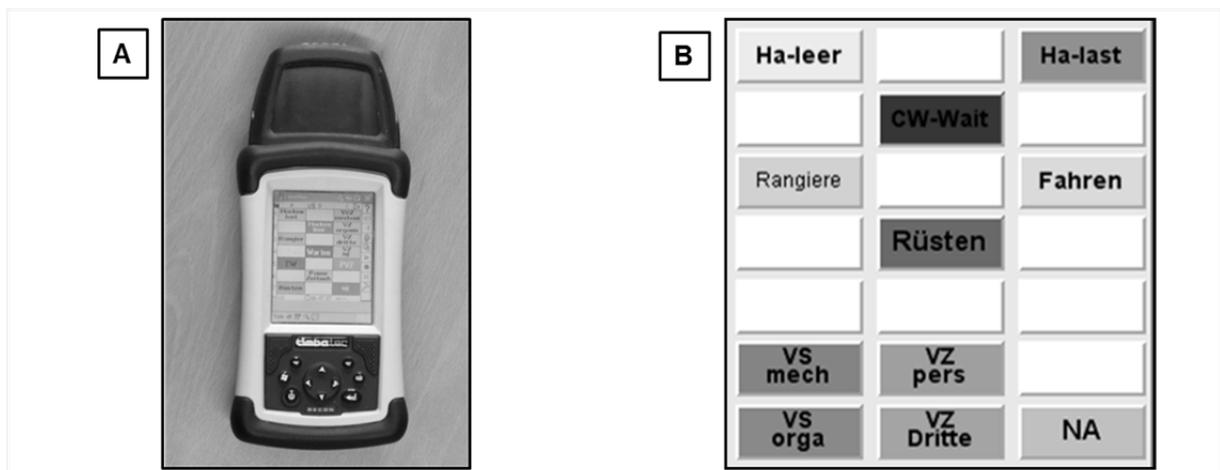


Abbildung 12: Zeitaufnahmegerät Timba-Tec Recon (A) und Beispiel einer Zeitstudienmaske (B)

Zeitarten

Die Ablaufabschnitte wurden in Anlehnung an [139] und [169] den Zeitarten in Tabelle 5 zugeordnet (siehe auch Abschnitt 4.1.4).

Die reine Arbeitszeit **RAZ** besteht aus Ablaufabschnitten, die ausschließlich durch den betreffenden Arbeitsgegenstand (ggf. eines Zyklus) verursacht werden und somit direkt zugeordnet werden können. Unter die RAZ fallen somit ausschließlich produktive Ablaufabschnitte. Unter die allgemeinen Zeiten **AZ** fallen Ablaufabschnitte, die nicht einem konkreten Arbeitsgegenstand zuordenbar sind, aber zum Arbeitsumfang gehören. Die AZ sind in Rüstzeiten **RZ**, Verteilzeiten **VZ** sowie in Erholungs- und Pausenwegzeiten unterteilt. Rüstzeiten sind als Arbeitsvorbereitung für den gesamten Auftrag zu verstehen und somit einem speziellen Arbeitsgegenstand nicht zuordenbar (z. B. Schleifen der Hackermesser). Bestimmte Rüstzeiten im weiteren Sinne treten aber auch im Zusammenhang mit einem einzelnen Arbeitsgegenstand auf. Das wurde dadurch berücksichtigt, dass der Arbeitsgegenstand in die Bezeichnung des Ablaufabschnitts aufgenommen wurde (z. B. Ablaufabschnitt „Rüsten am Polter“: Der Hacker wird durch Ausfahren des

Tisches und der Stützen und Positionieren des Krans in Arbeitsstellung gebracht). Verteilzeiten sind ebenfalls Ablaufabschnitte, die keinem Arbeitsgegenstand direkt zugeordnet werden können und folglich „verteilt“ werden müssen.

Tabelle 5: Übersicht der Zeitarten in Anlehnung an [139] und [169]

GAZ Gesamtarbeitszeit	RAZ reine Arbeitszeit
	AZ allgemeine Zeiten
	RZ Rüstzeiten
	VZ Verteilzeiten
	Erholungs- und Pausenwegzeiten
NA nicht auswertbar	

Die Gesamtarbeitszeit **GAZ** ist die Summe aus RAZ und AZ. Wird sie aus den tatsächlichen Messungen berechnet, ist zuvor gutachterlich zu bewerten, ob im Ergebnis das Verhältnis von RAZ zu AZ charakteristisch ist und der Beobachtungszeitraum ausreichend lang war; andernfalls ist die GAZ wegen der zufälligen Verteilung der AZ als Verfahrenskennzahl nicht geeignet. Die GAZ kann auch über einen pauschalen Zuschlag für die AZ auf die RAZ hochgerechnet werden. Die Verwendung eines pauschalen Zuschlags für die AZ ist für kurze Arbeitszeitstudien möglich, insbesondere wenn keine ganzen Aufträge oder Arbeitstage beobachtet werden konnten. Allerdings ist dazu notwendig, dass entsprechend vergleichbare Studien vorliegen, aus denen der Zuschlag abgeleitet werden kann.

NA (nicht auswertbare Zeiten) sind Ablaufabschnitte, Tätigkeiten oder Zeiten, die bei der Zeitaufnahme nicht zugeordnet werden konnten, weil ihr Auftreten nicht vorhersehbar war oder weil sie sachfremd waren. Durch die Anlage von Reservefeldern innerhalb der Aufnahmemaske war eine nachträgliche Korrektur und Ergänzung unvorhergesehener Ablaufabschnitte ohne Änderung der Methode möglich.

Bei den Zeitstudien wurde jeweils nur der Einsatz vor Ort bzw. der Lieferverkehr betrachtet. Anfahrts- und Umsetzzeiten zwischen mehreren Aufträgen hängen stark von den Gegebenheiten des Hackerauftrags und dem Einsatzradius der einzelnen Unternehmen ab und wurden deshalb nicht erfasst. Hinweise zu deren Berücksichtigung in der Maschinenkostenkalkulation gibt beispielsweise das KWF [134].

Bezugseinheiten

Die Zeiten wurden für die Datenauswertung in metrische Stunden umgerechnet. Bei der Zeitaufnahme und der Darstellung der Ergebnisse wird die Normalzeit verwendet (Stunden, Minuten und Sekunden [h:min:sec]). Neben der Betrachtung der RAZ wird unter Einbeziehung von Unterbrechungen unter 15 Minuten Dauer die Maschinenarbeitsstunde (MAS, [h (MAS)]) verwendet (siehe Abschnitt 4.1.5).

Weiteres zu den verwendeten Bezugseinheiten ergibt sich aus den speziellen methodischen Beschreibungen der nachfolgenden Zeitstudien. Hierin sind außerdem auch die weiteren Parameter der Außenaufnahmen aufgelistet.

Wenn im weiteren Verlauf des Kapitels 4 von „Durchschnitt“ oder „Mittelwert“ gesprochen wird, ist damit das arithmetische Mittel gemeint, sofern nichts anderes angegeben ist.

Verfahrenskosten, Maschinenkostenkalkulation

Zur Ermittlung der Verfahrenskosten wurden die ermittelte Produktivität und die Kosten für die anfallenden Arbeiten gegenübergestellt. Die eingesetzten Maschinen wurden dazu in Anhalt an gängige Kalkulationsschemata [107][134] kalkuliert (vgl. Abschnitte 4.1.5 und 4.2.3).

4.2.4.1 Arbeitsstudien zum Verfahrensschritt Hacken

Der Verfahrensschritt „Hacken“ wurde im Rahmen von 38 Praxiseinsätzen begleitet.

Rahmenbedingungen

Die forstwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Maßnahme, Maschinen der Vorkette, Besonderheiten) wurden bei den örtlich zuständigen Personen (Einsatzleiter, Revierleiter) erfragt. Die Rahmenbedingungen der Hackereinsätze wurden vor Ort erfasst (Maschinen- und Fahrzeugausstattung, Hackholz, vgl. Abschnitt 5.2.1).

Charakterisierung der Hackholzpolter

Hackholz aus dem Wald wird vor dem Hacken in Holzpoltern vorkonzentriert. Die Polter wurden in drei Poltertypen eingeteilt:

- **Poltertyp I – Waldrestholz (Wrh):** Hackholz, das ganz oder überwiegend aus Waldrestholzsortimenten wie ganzen Gipfeln oder Bruchstücken besteht. Es können Anteile von Vollbäumen, X-Holz und minderwertigem Stammholz („D-Stücke“) enthalten sein. Vollbäume aus Ersteingriffen (Rückegassenauftrieb) wurden ebenfalls hinzugezählt.
- **Poltertyp II – Energierundholz (Er):** Hackholz aus Energierundholz. Kennzeichnend ist, dass die Sortimente gezielt aufgearbeitet (abgelängt, entastet) wurden. Anteile von X-Holz und Stammholz sind möglich.
- **Poltertyp III – Kurzumtriebsplantage (KUP):** Hackholz (Vollbäume) aus Kurzumtriebsplantagen.

Die in den jeweiligen Hackholzpoltern vorgefundenen Baumarten wurden erfasst und in vier Baumartengruppen eingeteilt:

- **Fichte** (inkl. Tanne und Douglasie),
- **Kiefer** (inkl. Lärche und Strobe),
- **Hartlaubholz** (Buche, Eiche, Edellaubholz und weitere),
- **Weichlaubholz** (z. B. Weide, Pappel).

Jedes einzelne Polter wurde derjenigen Holzart und Baumartengruppe zugeteilt, die überwiegend im Polter vorkam, d. h., die einen Anteil von $\geq 75\%$ am Polter hatte. Sofern keine überwiegende Holzart bzw. Baumartengruppe vorhanden war, wurde das Polter als „Buntmischung“ bezeichnet. Diejenigen Polter, die einer Gruppe zuordenbar waren, wurden im zweiten Schritt nach ihrer Darrdichte (entnommen aus [119]) eingeteilt. Baumarten mit einer Darrdichte $< 0,55 \text{ g/cm}^3$ wurden den Weichhölzern, solche mit einer Darrdichte $\geq 0,55 \text{ g/cm}^3$ den Harthölzern zugerechnet.

Daneben wurden Besonderheiten der Polter verbal erfasst (u. a. Frische, Art der Maßnahme, besondere Aushaltungsvarianten).

Zeitstudie

Der Verfahrensschritt „Hacken“ wurde in die in Tabelle 6 dargestellten Ablaufabschnitte unterteilt.

Unter dem Sammelbegriff „Hacker“ sind in diesem Zusammenhang alle Hackerbauarten und somit auch Maschinen-Kombinationen über die Heckzapfwelle angetriebener Anhängerhacker an Traktoren zu verstehen. Der Ablaufabschnitt „Rüsten am Polter“ ist innerhalb der RAZ definiert und einem jeweiligen Arbeitsgegenstand (Polter) zugeordnet und somit keine Rüstzeit im engeren Sinne. Der Arbeitsgegenstand ist in allen Fällen das Hackholzpolter bzw. der Teil des Hackholzpolters, der zur Produktion des gemessenen Hackschnitzelvolumens gehackt wurde. Der Arbeitszyklus ist somit das Hacken eines Polters.

Die Zeitstudien wurden jeweils von einem Zeitnehmer mit der unter Kapitel 4.2.4 beschriebenen Ausrüstung durchgeführt.

Die Datenauswertung wurde auf zwei Ebenen durchgeführt:

- **1. Untersuchungsebene:** beobachtete Zeiten und ihre Korrelationen,
- **2. Untersuchungsebene:** technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Einflussfaktoren auf die Verfahrensleistung.

Tabelle 6: *Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudien „Hacken“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.*

Ablaufabschnitt (Zeitart)	Beschreibung	Trennpunkte
Hacker_last (RAZ)	Hackerlastlauf: Hacken, Hackholz wird durchgeführt, einschließlich kurzer Phasen zur Erhöhung der Trommeldrehzahl	Betriebszustand Leerlauf
Hacker_leer (RAZ)	Hackerleerlauf: Werkzeuge laufen leer, Hoch- und Herunterfahren der Hackwerkzeuge	Lastlauf oder Aufnahme anderer Tätigkeiten
Rüsten (RAZ)	Rüsten am Polter, wie Absenken der Stützen, Ausklappen des Hackertisches und Positionieren des Ladekrans	Hacker ist betriebsbereit bzw. abfahrbereit
Rangieren (RAZ)	Rangieren des Hackers am Polter	Räder stehen
CW-Wait (AZ)	Warten Containerwechsel: Der Hacker wartet, während ein voller Container/Behälter abtransportiert bzw. ein leerer zugestellt wird	Behälter steht bereit
Fahren (AZ)	Fahrten/Umsetzen der Hackereinheit zwischen den Hackholzpoltern, ohne An- und Abfahrt	Räder stehen

Beobachtete Zeiten und ihre Korrelationen

Auf dieser Ebene werden die Zeiten und Zeitarten (einschließlich der MAS) und ihre Korrelation zueinander ohne Bezugnahme auf die angefallenen Volumina an Hackschnitzeln und damit ohne Bezugnahme auf die Leistung bzw. auf die sie beeinflussenden Faktoren betrachtet. Ziel dieser ersten Untersuchungsebene waren Erkenntnisse zum Aufbau des Verfahrensschritts „Hacken“. Betrachtet wurden Zusammenhänge der Ablaufabschnitte untereinander sowie der Zeitarten (RAZ, GAZ, MAS) zueinander.

Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Einflussfaktoren auf die Verfahrensleistung

Die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) ist im Fall der Arbeitsstudien zum Verfahrensschritt „Hacken“ das Verhältnis der produzierten Hackschnitzelmenge [Srm] zur eingesetzten Arbeitszeit [h (MAS)].

Der **Zeitbedarf** wurde in den Zeitstudien ermittelt. Bei 32 Fallstudien wurde das **Hackschnitzelvolumen** durch Aufmaß des Containerinhalts im Wald zusammen mit der Probenahme zu den Untersuchungen nach Abschnitt 5.2.1 ermittelt. Für die Zeitstudien, die im Zusammenhang mit den Studien zur Logistik (Abschnitt 4.3.4.2) stattfanden, war eine

Probenahme nicht vorgesehen. Um die laufenden Zeitstudien nicht zu unterbrechen, wurden für vier dieser Studien die Werkseingangstonnagen aus den Wiegeprotokollen der belieferten Heizkraftwerke verwendet. Aus den vorangegangenen Studien wurden acht dem Ausgangsmaterial und der Verarbeitung nach vergleichbare Proben ausgewählt und ihre Schüttdichten im Lieferzustand gemittelt. Es ergibt sich eine mittlere Schüttdichte von $343 \text{ kg/m}^3 \pm 28 \text{ kg/m}^3$ bei einem Wassergehalt von $51,2 \% \pm 1,9 \%$. Mit diesem Wert wurde in den vier genannten Fällen die gemeldete Tonnage auf das Volumenmaß umgerechnet. Weitere zwei der gekoppelten Studien zu Hacken und Logistik waren reine Lagerlieferungen, d. h., es lag kein Werkseingangsprotokoll vor. Hier wurden die Mengen aus der Lagereingangsmeldung verwendet.

Die TAP wurde hinsichtlich der in Tabelle 7 dargestellten Einflussfaktoren untersucht.

Tabelle 7: Untersuchte Einflussfaktoren auf die TAP

Einflussfaktor	Kategorisierung
Ausgangsmaterial (Poltertyp)	Waldrestholz Energierundholz Kurzumtriebsplantage
Holz (überwiegend, Anteil $\geq 75 \%$)	Weichholz (Darrdichte $< 0,55 \text{ g/cm}^3$) Hartholz (Darrdichte $\geq 0,55 \text{ g/cm}^3$) Buntmischung
Siebeinsatz im Hacker	Fein (Sieblochung $< 80 \times 80 \text{ mm}$) Standard (Sieblochung $= 80 \times 80 \text{ mm}$) Grob (Sieblochung $> 80 \times 80 \text{ mm}$)
Antriebsleistung (kontinuierliche kW-Werte sowie gruppiert in Leistungsklassen)	Leistungsklasse 0: 1–99 kW Leistungsklasse 1: 100–199 kW Leistungsklasse 2: 200–299 kW Leistungsklasse 3: 300–399 kW Leistungsklasse 4: $\geq 400 \text{ kW}$

Wartezeiten auf den Wechsel des Transportbehälters

Die Wartezeiten auf den Wechsel von Transportbehältern wurden separat für fünf Gruppen ausgewertet. Unterschieden wurden Anhänger an landwirtschaftlichen Traktoren, Anhänger an Lkw, Rollbandauflieger, Container und Schubboden-Auflieger.

4.2.4.2 Fallstudie: Gekoppelte Verfahrensschritte Hacken und Logistik

Die Zusammenarbeit von Hacker und Logistik wurde im Rahmen von sechs Praxiseinsätzen näher untersucht. Bei diesen Fallstudien war es das Ziel, Arbeitsstudien für die bislang nur hinsichtlich der Rahmenbedingungen untersuchte Hackschnitzelloistik anzufertigen. Es wurden zugleich fünf weitere Arbeitsstudien zum Hacken mit bisheriger Methodik und im bisherigen Umfang (Abschnitt 4.2.4.1) durchgeführt.

Beschreibung der Transportsysteme und weiterer Rahmenbedingungen

Wie bei den vorangegangenen Fallstudien Hacken wurden die jeweils angetroffenen Maschinen- und Fahrzeugausstattungen aufgenommen. Die Bauarten und die jeweilige Anzahl an Fahrzeugen wurden erfasst. Das Gleiche gilt für die angetroffenen Transportbehälter bzw. deren Kapazität sowie für die Einsatzbereiche der Fahrzeuge.

Zeitstudien

Hinsichtlich der Hackschnitzellogistik wurden bei den gegenständlichen Fallstudien die vor Ort beobachteten Abläufe analysiert. Dabei wurden die Prozessschritte Hacken und Logistik in Verfahrenskopplung betrachtet. Ein Zeitnehmer begleitete den Arbeitsablauf des Hackers. Ein zweiter Zeitnehmer erfasste alle Hackschnitzeltransporte mit einer speziellen Anwendung der in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Software, deren Studiendesign für die simultane Aufnahme mehrerer der gängigen Hackschnitzel-Transportfahrzeuge ausgelegt wurde. Für jedes beteiligte Fahrzeug wurde damit eine separate Zeitstudie zeitgleich aufgenommen. Ein Teil der Aufnahmen erfolgte davon abweichend händisch.

Die Zeitnehmer der Logistik wurden in drei Fällen am Umladeplatz (Abstellplatz für Container und Anhänger) positioniert, in einem Fall pendelte der Zeitnehmer zwischen zwei Umladeplätzen. Bei den übrigen Terminen war das aus örtlichen und organisatorischen Gründen nicht möglich, an diesen Tagen befanden sich beide Zeitnehmer beim Hacker. Der Logistikprozess wurde in möglichst wenige Ablaufabschnitte eingeteilt (Tabelle 8). Die Abschnitte „Fahrt Werk“ bzw. „Fahrt Lager“ wurden nicht näher aufgeschlüsselt, da eine Mitfahrt von Zeitnehmern organisatorisch nicht möglich war. Die Fahrer wurden gebeten, über Wartezeiten und Verzögerungen (Stau, Wartezeiten am Heizkraftwerk) ab jeweils 15 Minuten Dauer zu berichten. Wartezeiten unter 15 Minuten wurden in Anlehnung an die Maschinenarbeitsstunde (MAS) bei diesen beiden Abschnitten nicht getrennt erfasst.

Die Logistikzyklen sind wie folgt definiert:

- bei **Container-Lkw mit Anhänger**: Der Logistikzyklus beginnt bzw. endet mit dem Eintreffen des unbeladenen Fahrzeugs auf dem Umladeplatz (Ende des Ablaufabschnitts „Fahrt Werk“, Beginn des Ablaufabschnitts „Waldfahrt“),
- beim **Container-Lkw ohne Anhänger** und **Schubboden-Lkw**: Der Logistikzyklus beginnt bzw. endet mit dem Eintreffen des unbeladenen Fahrzeugs im Wald (Ende des Ablaufabschnitts „Fahrt Werk“, Beginn des Ablaufabschnitts „Waldfahrt“),
- beim **Hackschnitzelshuttle**: Der Logistikzyklus beginnt, wenn das unbeladene Fahrzeug den Umladeplatz Richtung Wald verlässt (Beginn des Ablaufabschnitts „Waldfahrt“).

Tabelle 8: Ablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudien zur Logistik. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt (RAZ)	Beschreibung	Trennpunkte
Hänger an/ab	Der Anhänger (ggf. mit Container) wird vom Motorwagen bzw. Traktor abgekuppelt und geparkt bzw. zur Fahrt angekuppelt, einschließlich aller Nebenarbeiten und ggf. Abfahrtskontrolle	Abkuppeln: Der abgestellte Anhänger ist gesichert, Ankuppeln: Der Zug ist abfahrtsbereit (ggf. Abfahrtskontrolle durchgeführt)
Tausch Container	Tausch des Containers leer/voll am Umladeplatz, Abstellen und Wiederaufnehmen von Containern am Umladeplatz, Umladen von Containern, einschließlich aller Rangier- und Nebenarbeiten (ohne Ladungssicherung)	Aufnahme anderer Tätigkeiten
Waldfahrt	Fahrten im Wald, speziell zwischen Polter und Umladeplatz, sowie Beladezeiten am Polter, einschließlich evtl. Umsetzen, Warten (< 15 min) sowie aller Nebenarbeiten, z. B. Öffnen der Abdeckungen und der Ladetür am Schubbo-den-Lkw	Eintreffen am bzw. Verlassen des Umladeplatzes bzw. Eintreffen im Wald bzw. Verlassen des Waldes. Die Trennpunkte gelten für Aufnahmen am Umladeplatz bzw. am Waldrand.
Fahrt Werk	Fahrt zur Lieferung in das Heiz(kraft)werk, einschließlich Anlieferung (Anmelden, Wiegen, Rangieren, Abladen, Sonstiges), einschließlich Wartezeiten (z. B. im Stau oder am Werk) < 15 min	
Fahrt Lager	Fahrt zur Lieferung in ein Zwischenlager, einschließlich Abladen und Sonstiges, einschließlich Wartezeiten im Stau oder am Werk < 15 min	
Ladung sichern	Die Hackschnitzel werden im Container glattgezogen, eine Plane oder ein Netz werden über den Container gezogen	Aufnahme anderer Tätigkeiten

Berechnung vereinfachter Modellzyklen für Container-Lkw-Züge

Die Ergebnisse der Logistikzeitstudien wurden zur Bildung vereinfachter Modellzyklen für Container-Lkw mit Anhängern verwendet. Für die anderen Transportfahrzeuge war dies aufgrund der geringen Anzahl auswertbarer Fälle nicht sinnvoll. Für einen typischen Logistikzyklus mit Container-Lkw-Zügen wurden die einzelnen Ablaufabschnitte über alle Zeitstudien betrachtet.

Die geografischen Koordinaten der jeweiligen Polter und die Lieferadressen waren aus den Aufträgen bekannt. Die Umlade- und Lagerplätze wurden bei den Außenaufnahmen in die entsprechenden Karten eingezeichnet. Die Koordinaten dieser Orte wurden aus der Luftbildansicht des Internetdienstes Google Maps übernommen. Die Adressen der Heiz(kraft)werke waren in den Aufträgen verzeichnet. Alle Wegepunkte wurden in die Routing-Funktion von Google Maps übertragen und die entsprechenden Wegstrecken der Werksfahrten entnommen. Da in der Hackschnitzellogistik meist nur ein/e Fahrer/-in je Fahrzeug eingesetzt ist, sind die Lenk- und Ruhezeiten beim Lkw-Verkehr nach EG-Verordnung Nr. 561/2006, insbesondere die vorgeschriebene Lenkzeitunterbrechung nach 4,5 Stunden (Artikel 7) und die Maximaldauer von 9 Stunden (Artikel 6), auch bei der Modellrechnung zu beachten. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die nach 4,5 Stunden Lenkzeit fällige 45-minütige Pause ohne Unterbrechung genommen wird.

4.2.4.3 Fallstudie Sailershausen: Erstdurchforstung und Feinerschließung mit Harvester und nachgerüsteter Sammeleinheit

In der Fallstudie Sailershausen wurde ein Praxisbeispiel für die Modellverfahrenskette IIIb „Vollmechanisierte, teilgekoppelte, primäre Energieholz-Verfahrensketten mit Harvester (Aggregat mit Sammelfunktion) und mit Forwarder, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport“ (vgl. Abschnitt 4.3.2) untersucht. Die Studie wurde im Universitätsforstamt Sailershausen bei Haßfurt durchgeführt und von der LWF organisiert. Kooperationspartner waren das Universitätsforstamt Sailershausen (Bereitstellung der Versuchsflächen) und das Forstunternehmen TTW Waldpflege GmbH (Planung und Organisation der Maßnahmen).

Versuchsflächen

Auf 15 % der Gesamtfläche des Bestands wurden zehn Probeflächen eingerichtet. Die Probeflächen waren quadratisch mit 30 m Seitenlänge und lagen mittig auf den Rückegassen. Die erfasste Fläche betrug somit rund 15 % der gesamten Bestandsfläche. Da der Gassenabstand ebenfalls 30 m betrug, wurde so eine Stichprobe mit entsprechender Erschließungsdichte erreicht. Die Probeflächen wurden mit ausreichendem Abstand zu den Gassenmündungen und zueinander schachbrettartig angelegt. Eingemessen wurden die Probeflächen mithilfe von Kompass, Maßband und Fluchtstäben. Auf den Probeflächen wurde der gesamte Bestand gekluppt. Neben der Baumart und dem Brusthöhendurchmesser (BHD) wurde je Baum erfasst, ob dieser zum verbleibenden Bestand, zum Kollektiv der Z-Bäume, zu den ausscheidenden Bäumen auf der Rückegasse oder zu den ausscheidenden Bäumen auf den Zwischenfeldern (Bedränger der Z-Bäume) gehörte. Anschließend wurden die ausscheidenden Bäume mit einer BHD-Codierung versehen, um während der Zeitstudie auf größere Entfernung (unter Einhaltung des vorgeschriebenen Sicherheitsabstands) den BHD zu erkennen. Dazu wurden jeweils auf Augenhöhe ein, zwei oder drei kräftige Punkte in sechs verschiedenen Farben von drei Seiten am Stamm aufgetragen. Bäume unter 7 cm BHD erhielten keine Markierung. Bäume über 24 cm BHD wurden mit einem weißen „X“ markiert und der entsprechende

BHD in den Unterlagen vermerkt. Außerdem wurden Beginn und Ende der Probeflächen jeweils auf der Rückegasse markiert.

Zeitstudie

In der Zeitstudie wurden die Verfahrensschritte Ernte, Rückung und Hacken untersucht und dazu in exakt trennbare Arbeitsablaufabschnitte eingeteilt.

Tabelle 9: Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Holzernte“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt (RAZ)	Beschreibung	Trennpunkte
FAHRT leer	Fahrt mit leerer Greifzange	Stillstand des Kettenlaufwerks
FAHRT bündeln	Fahrt mit Stammabschnitten in der Greifzange, also während des Bündelns	Stillstand des Kettenlaufwerks
KRAN leer	Kranbewegung mit leerer Greifzange (i. d. R. also zum Baum hin)	Kranarm steht still, Zange umgreift Stamm
KRAN bündeln	Kranbewegung mit Stammabschnitten in der Greifzange, also während des Bündelns	Kranarm steht still, Zange umgreift weiteren Stamm(abschnitt)
KRAN Krone	Kranbewegung in den Kronenbereich hinein (zur Kappung der Krone)	Kranarm steht still, Zange umgreift Krone
CUT Fichte	Zange umgreift eine Fichte am Stammfuß und sägt sie ab	Fällschnitt abgeschlossen
CUT andere	Zange umgreift einen Baum anderer Baumart am Stammfuß und sägt ihn ab	Fällschnitt abgeschlossen
CUT Krone	Zange umgreift Baum im Kronenraum und trennt diese ab	Fällschnitt abgeschlossen
AUSHALTEN einzeln	Nach abgeschlossenem Fällschnitt wird der einzelne Baum in Sortimente aufgeteilt und zeitgleich entastet	Trennschnitt des Stammabschnitts abgeschlossen
AUSHALTEN Bündel	Nach abgeschlossenem Fällschnitt des letzten Baums eines Bündels wird das Bündel abgelängt und zeitgleich entastet	Trennschnitt abgeschlossen
ABLEGEN Rauheige	Kranbewegung, um Abschnitte auf Rauheigen abzulegen (also Manipulieren der fertig ausgehaltenen Stammabschnitte zu Rauheigen oder Ablage der nicht entasteten Krone)	Sortiment ist abgelegt, Zange offen und leer

Die **Holzernte** wurde auf den beschriebenen Versuchsflächen von zwei Beobachtern (Zeitnehmer und Assistentin) begleitet. Der Verfahrensschritt wurde im Wesentlichen eingeteilt in die Arbeitsablaufabschnitte „Fahrt“, „Kran“, „Cut“ (Sägen), „Aushalten“, „Ablegen“ sowie Verteilzeiten verschiedener Art (Tabelle 9). Zur detaillierteren Auswertung wurden bei jedem Abschnitt „CUT“ (Sägen) die Baumart und der BHD (zu erkennen am angebrachten BHD-Code) erhoben. Diese Daten wurden bei Auswahl eines der „Cut“-Felder auf dem Hauptbildschirm automatisch abgefragt. In unklaren Fällen bestand jeweils die Möglichkeit, „nicht erkannt“ auszuwählen. Bäume, die ursprünglich nicht zur Fällung vorgesehen waren und daher keine BHD-Codierung trugen, wurden beim BHD mit „nicht markiert“ gebucht.

Die Arbeitsablaufabschnitte wurden Fällzyklen zugeordnet. Jeder Zyklus endet mit dem letzten Aushaltvorgang bzw. mit einem Ablegevorgang, der unmittelbar auf einen Aushaltvorgang folgt. Der folgende Zyklus beginnt immer mit „Fahrt leer“. Die Zyklen wurden bei der Auswertung in Bündelzyklen und Einzelbaumzyklen aufgeteilt.

Der Verfahrensschritt **Rückung** wurde auf drei kompletten Rückegassen mit einer Gesamtlänge von 574 lfm begleitet. Bei der Rückung wurden im Wesentlichen die Arbeitsablaufabschnitte „Fahrt“ und „Laden“ bzw. „Abladen“ sowie Verteilzeiten unterschieden (Tabelle 10). Der Abschnitt „Fahrt“ wurde je nach Zuladung (leer, teil, voll) unterteilt. Hinzu kamen die Verteilzeiten und nicht auswertbaren Zeiten. Um die Fahrt- und Ladezeiten in der Auswertung den einzelnen Sortimenten zuordnen zu können, wurden bei jedem Abschnitt „Abladen“ die Baumart und das Sortiment durch eine automatische Abfrage in der Software erfasst. Zusätzlich wurde bei jedem Poltervorgang die Stückzahl der abgeladenen Hölzer notiert. Beim Hackholz wurde nicht die Stückzahl, sondern die Anzahl der Zangen beim Abladen gezählt.

Tabelle 10: Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Rückung“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt (RAZ)	Beschreibung	Trennpunkte
FAHRT leer	Leerfahrt	Stillstand
FAHRT Teil	Fahrt mit Teilladung	Stillstand
FAHRT voll	Fahrt mit voller Ladung vom letzten Ladepunkt zum Polterpunkt an der Forststraße	Stillstand
LADEN	Ladevorgang	Kranarm steht still
ABLADEN	Abladen an der Forststraße	Kranarm steht still

Der Verfahrensschritt **Hacken** wurde mit der auch für die anderen Hackerstudien verwendeten Methodik untersucht (vgl. Abschnitt 4.2.4.1).

Weitere Erhebungen

- **Länge und Lage der Rückegassen, Rückeentfernung:** Länge und Lage der Rückegassen sowie der Holzpolter je Sortiment wurden nach dem Hieb detailliert aufgenommen. Dazu wurden ein Kompass, ein 50-m-Maßband, Fluchtstäbe sowie ein Laser-Entfernungsmesser des Herstellers Nikon (Modell Forestry Pro) eingesetzt.
- **Auswertung der Aufzeichnungen von Waldbesitzer, Unternehmer und Kunden:** Zur Ermittlung der Holzmengen nach Sortimenten wurden die Hiebsprotokolle, Holzlisten, Hackerprotokolle und Rückläufe der Werkseingangsvermessung ausgewertet.
- **Modellierung der Bestandsbiomasse:** Die gesamte Biomasse des Bestands wurde im Programm SILVA modelliert. Zur Ermittlung der Eingangsgrößen wurden Probefällungen mit anschließender Vermessung der gefälltten Bäume durchgeführt. Erhoben wurden dabei unter Verwendung von Maßband und Kluppe (in Anhalt an [104]) neben BHD, Gesamtlänge, Länge Derbholz und Alter (Jahrringe) auch der Ansatz des ersten Totastes (über 2 cm), des ersten lebenden Astes sowie der Kronenansatz. Die gefälltten Bäume waren allesamt Gassenbäume außerhalb der Probeflächen. Die Bäume wurden möglichst diagonal zur Gasse gelegt und unaufgearbeitet liegen gelassen. Die Aufarbeitung erfolgte dann durch den Harvester im Zuge der eigentlichen Erntemaßnahme. Die Auswahl der zu fällenden Bäume erfolgte nach der Vorbereitung der Versuchsflächen. Zusätzlich zu den Probefällungen wurden Höhenmessungen mit einem Baumhöhenmesser des Herstellers Haglöf (Modell Vertex IV) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur Erstellung von Höhenkurven verwendet. Für die Hauptbaumart Fichte wurden neu entwickelte Funktionen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München verwendet [162]. Für die Mischbaumarten wurde das bestehende SILVA-Modell des Lehrstuhls eingesetzt. Da die angefallene Energieholzmenge nur im gehackten Zustand in Schüttraummetern eindeutig vermessen werden konnte, wurde das Energieholz anhand der Biomassefunktionen in Derbholz und Nichtderbholz aufgeschlüsselt.

4.2.4.4 Fallstudie Eurasburg: Altdurchforstung mit Harvester – Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“

In der Fallstudie Eurasburg wurde ein Praxisbeispiel für die Modellverfahrenskette IIIa „Vollmechanisierte, teilgekoppelte Kombinations-Verfahrensketten (stofflich/energetisch), mit Harvester mit herkömmlichem Harvester-Aggregat und Forwarder, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport“ (vgl. Abschnitt 4.3.2) untersucht. Die Studie wurde auf Flächen der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. durchgeführt und von der LWF organisiert. Kooperationspartner war der Forstbetrieb Landsberg am Lech (Bereitstellung der Versuchsflächen und Planung und Organisation der Maßnahme). Ein Teil der Studie, insbesondere die Aspekte der Nährstoffnachhaltigkeit, wurde im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität München untersucht [76].

Eine Besonderheit stellte die Aushaltungsvariante dar. Geerntet wurde neben stofflichen Sortimenten auch Hackholz, das bis in den Kronenbereich hinein ausgehalten und entastet wurde.

Versuchsflächen

Auf einer Fläche von 4 ha (63 % der gesamten Bestandsfläche) wurden die Brusthöhen-durchmesser des ausscheidenden Bestands gemessen und die Bäume mit Forstmarkier-farbe durchnummeriert. Daten zum Gesamtbestand wurden aus der aktuellen Forstein-richtung übernommen.

Zeitstudie

In der Zeitstudie wurden die Verfahrensschritte Ernte, Rückung und Hacken untersucht. Dazu wurden die Verfahrensschritte in exakt trennbare Arbeitsablaufabschnitte eingeteilt.

Tabelle 11: Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Holzernte“. Zu-sätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten, Verteilzeiten und nicht auswertbare Zeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt	Beschreibung	Trennpunkte
FAHRT leer	Fahrt mit leerer Greifzange	Stillstand
Gasse einbauen	Kranbewegung mit voller Greifzange, Einbau von Ast- und Zweigmaterial in die Rückegasse	Kranarm steht still, Zange ist offen und leer
CUT Baum	Aggregat fährt auf einen Baum zu, umgreift ihn am Stammfuß, sägt ihn ab und bringt ihn zu Fall	Krone und Baum schlagen auf dem Boden auf
AUSHALTEN stofflich	Nach abgeschlossenem Fällvorgang wird der einzelne Baum in stoffliche Sortimente aufgeteilt und zeitgleich entastet	Trennschnitt des letzten stofflich sortierten Stammabschnitts abgeschlossen
AUSHALTEN Energie	Ein Baum(abschnitt) wird als Energie-rundholz ausgehalten	Gipfel bricht oder kein Holz mehr im Aggregat; Trennschnitt (nach max. 6 m Länge) abgeschlossen

Die **Holzernte** wurde auf der gesamten Versuchsfläche (4 ha) von zwei Beobachtern begleitet. Erfasst wurden die Arbeitsablaufabschnitte „Fahrt“, „Cut“, „aushalten stofflich“, „aushalten energetisch“, „Einbau von Reisigmaterial in die Rückegasse“ sowie Verteilzeiten verschiedener Art (Tabelle 11). Die ursprünglich geplante separate Erfassung der Aufarbeitungszeiten zugefallter Bäume entfiel, da keine Bäume zugefällt wurden. Zur detaillierteren Auswertung wurde bei jedem Abschnitt „CUT“ (Sägen) die Nummer des gefällten Baums automatisch auf dem Hauptbildschirm der Zeitstudie abgefragt. Damit wurde die spätere Verknüpfung mit Baumart und BHD aus der Flächenvorbereitung ermöglicht. Konnte die Baumnummer nicht klar gesehen werden, bestand die Möglichkeit, „nicht erkannt“ zu buchen. Bäume, die ursprünglich nicht zur Fällung vorgesehen waren

und daher keine Baumnummer trugen, wurden mit „nicht markiert“ gebucht und die Baumart durch Zeitstudiennehmer händisch festgehalten.

Die Arbeitsablaufabschnitte wurden Fällzyklen zugeordnet. Jeder Zyklus endet mit dem letzten Aushaltungsvorgang bzw. mit einem Ablegevorgang, der unmittelbar auf einen Aushaltvorgang folgt. Der folgende Zyklus beginnt immer mit „Fahrt leer“.

Die Zeitstudie zum Verfahrensschritt **Rückung** war analog zur Fallstudie Sailerhausen (Abschnitt 4.2.4.3) aufgebaut. Die Rückung wurde auf der gesamten Versuchsfläche (4 ha) gemessen. Insgesamt wurden 1568 lfm Rückegasse begleitet.

Der Verfahrensschritt **Hacken** wurde mit der auch für die anderen Hackerstudien angewandten Methodik untersucht (vgl. Abschnitt 4.2.4.1).

Weitere Erhebungen

Neben der eigentlichen Zeitstudie wurden analog zur Fallstudie Sailerhausen noch weitere Parameter erhoben (vgl. Abschnitt 4.2.4.3). Die Modellierung der Biomasse erfolgte abweichend zur Zeitstudie Sailerhausen nur für den ausscheidenden Bestand, da im Fokus der Untersuchung der Effekt der Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ auf den Entzug von Biomasse und damit Nährstoffen stand. Es wurden ebenfalls Biomassefunktionen der Technischen Universität München verwendet [162]. Die Nährstoffgehalte im Nichtderbholz wurden durch eigene Laboranalysen bestimmt [76]. Die Probenahmen erfolgten an drei Fichten und Kiefern. Die Kronen wurden vor dem Abstreifen der Äste gewogen. Es wurden jeweils anteilig Proben des Astmaterials aus dem oberen, mittleren und unteren Kronenbereich gewonnen. Zur Berechnung der Nährstoffgehalte im Derbholz wurden Werte aus einer aufgrund der geografischen Nähe und der relativen Vergleichbarkeit der Standorte ausgewählten Studie verwendet [84]. Aus den Messdaten der Entnahmebäume wurde der Nährstoffentzug bei der Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ mit der Vollbaumnutzung und der ausschließlichen Nutzung von Derbholz verglichen.

4.2.4.5 Fallstudien: Hackschnitzelproduktion aus Flurholz

Die Hackschnitzelbereitstellung aus Flur- und Siedlungsholz spielt eine zunehmende Rolle. Bislang ungenutzte Energieholzpotenziale können so mobilisiert werden. Im Fokus der vorliegenden Prozessanalyse liegt die Produktion von Waldhackschnitzeln. Dennoch wurden in zwei Fallstudien Ernte und Verarbeitung von Straßenbegleitholz bzw. Stromtrassenholz begleitet.

Fallstudie Straßenbegleitholz B13

Entlang der Bundesstraße B13 zwischen Fahrenzhausen (S) und Hohenkammern (N) im Landkreis Freising wurde die Verfahrenskette der Hackschnitzelproduktion aus Straßenbegleitholz durch Zeitstudien untersucht. Es wurden zwei Probeflächen angelegt, die durch eine Feldwegeinfahrt voneinander getrennt waren.

Die erste Probefläche umfasste die Böschung auf einer Länge von 149 lfm, die zweite von 89 lfm. Innerhalb beider Probeflächen wurden Abschnitte von je 20 lfm ausgewiesen und hinsichtlich der Baum- und Straucharten bestimmt. Zudem wurde die durchschnittliche Tiefe der Fläche gemessen und die Durchschnittshöhe der Bestockung ermittelt. Wegen der Vergleichbarkeit wurden in Abschnitten mit deutlich niedrigerem Bewuchs bzw. bei deutlich geringerer Tiefe auch Abschnittslängen ausgenommen, die weniger als 20 lfm lang waren. Das Gleiche gilt für die jeweiligen Reststrecken.

Tabelle 12: Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Straßenbegleitholz B13 Bagger“ Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt (RAZ)	Beschreibung	Trennpunkte
FAHRT	Fahrbewegungen des Baggers	Räder stehen
SCHNITT Stock	Bewegung des Auslegers bzw. Aggregats, erfassen und Schnitt des ganzen Triebs/Aufwuchses am Stock	Durchtrennung
SCHNITT Ast/Krone	Bewegung des Auslegers bzw. Aggregats, erfassen und Schnitt des Triebs/Aufwuchses deutlich oberhalb des Stocks bzw. in der „Krone“; der Strauch wird dadurch (in etwa) halbiert	
SCHNITT Stammrest	Bewegung des Auslegers bzw. Aggregats, erfassen und Schnitt des zuvor durch den Ablaufabschnitt „Schnitt Ast/Krone“ gekürzten Triebs/Aufwuchses am Stock	
ABLEGEN	Das sich in der geschlossenen Haltezange befindliche Schnittgut wird vom Bagger abgelegt	Schnittgut ist abgelegt
Vorkonzentrieren	Abgelegtes Schnittgut wird wieder aufgenommen bzw. verschoben und so zu Rauhbeigen vorkonzentriert	Aufnahme anderer Tätigkeiten

Die Verfahrensschritte Fällen und Vorkonzentrieren wurden mit der Zeitstudie „Straßenbegleitholz B13 Bagger“ über die zweite Probefläche begleitet (Tabelle 12).

Die Schneidarbeit wurde zu Zyklen zusammengefasst und hinsichtlich der beobachteten Einzel- und Mehrschnittzyklen ausgewertet. Ein Zyklus beginnt mit einem Schnittvorgang, darauf folgen ggf. weitere Schnittvorgänge und ggf. Fahrtzeiten, der Ablaufabschnitt Ablegen beendet den jeweiligen Arbeitszyklus. Hierbei entstehen Einzelzyklen mit einem Schnitt oder Mehrschnittzyklen.

Parallel zur dieser Zeitstudie wurde über die motormanuellen Nebenarbeiten durch einen zweiten Zeitnehmer die Studie „Straßenbegleitholz B13 motomanuell“ aufgenommen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Arbeitsablaufabschnitte und Trennpunkte der Zeitstudie „Straßenbegleitholz B13 motomanuell“. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Allgemeinen Zeiten und Verteilzeiten ausgeschieden worden.

Ablaufabschnitt (RAZ)	Beschreibung	Trennpunkte
Baum aufsuchen	Der Motorsägenführer sucht den zu bearbeitenden Baum auf	Anfangsereignis: Der Motorsägenführer nimmt die Motorsäge zur Hand; Endereignis: Der Motorsägenführer erreicht den Baum
SCHNITT Baum/Strauch	Der Motorsägenführer fällt einen Baum oder Strauch (z. B. Zufällung zum Bagger)	Anfangsereignis: Start Motorsäge; Endereignis: Durchtrennung
Hochastung	Ein stehender Baum wird mit der Motorsäge oder mit einem Hochentaster geastet (z. B. Lichtraumfreischnitt)	

Fallstudie Stromtrassenaufrieb

Unter einer Stromtrasse nahe der Ausfahrt Lauf Süd der Bundesautobahn A9 wurde eine ca. 1,3 ha große Aufriebsfläche besichtigt und ein Hackereinsatz zeitweise beobachtet. Detaillierte Studien waren aufgrund des Projektfortschritts und wegen der naturschutzrechtlichen Einschränkungen ab 1. März (Vogelbrutzeit) nicht möglich. Hintergrundinformationen wurden vom Auftraggeber (Netzbetreiber N-ERGIE Netz GmbH Nürnberg) eingeholt.

4.2.5 Messung des Kraftstoffverbrauchs und der Durchsatzleistung der Maschinen

Der Kraftstoffverbrauch für den Prozessschritt „Hacken“ wurde direkt während der Feldstudien (Abschnitt 4.3.4) aufgenommen. Der Bedarf an Kraftstoff (in l) wurde ins Verhältnis zum Volumen (in Srm) und zur Masse (in t_{atro}) der produzierten Hackschnitzel sowie zur Maschinenarbeitszeit (MAS in h) und der reinen Hackzeit (in h, siehe Abschnitt 4.1.4) gesetzt (d. h. angegeben als l/Srm , l/t_{atro} , l/h (MAS) bzw. l/h). Daneben wurde die Durchsatzleistung der Maschinen über das Volumen und die Masse der Hackschnitzel sowie über die benötigte Hackzeit aus den Datensätzen bestimmt (Srm/h , t_{atro}/h). Die Berechnung der Technischen Arbeitsproduktivität (TAP) erfolgt gesondert in Abschnitt 4.2.4.1.

Zur Analyse des Kraftstoffbedarfs und der Durchsatzleistung wurden während der Feldstudien komplette Containerladungen gemessen. Idealerweise wurde dabei der Kraft-

stoffverbrauch als die Differenz der Tankfüllmenge vor und nach dem Hacken über den Maschinenführer erfragt. In Einzelfällen musste auf Durchschnittswerte der Maschinen (i. d. R. Verbrauch in l/h) zurückgegriffen werden. Die zum Hacken benötigte Zeit (Hackzeit in h) wurde dabei als Summe der Hackerlastzeit und der Leerlaufzeit des Hackers gemessen (siehe Abschnitt 4.1.4). Die Maschinenarbeitszeit (MAS) ist analog zu Abschnitt 4.1.4 als die Summe der Hackzeiten, Rüstzeiten, Rangieren und Verteilzeiten < 15 min definiert.

Das Volumen an Schüttraummetern wurde vor Ort für jede Containerladung bestimmt (siehe auch Abschnitt 8.2.2.4). Hierzu wurden zunächst die frisch produzierten Hackschnitzel im Container mithilfe eines Rechens und mit Maisgabeln nivelliert. Anschließend wurde das verbleibende Leervolumen mithilfe eines Maßbands und eines Meterstabs von der Oberkante des Containers aus gemessen. Das Volumen an Hackschnitzeln ergibt sich dabei aus der Differenz des kompletten Containervolumens, abgelesen vom Typenschild, und dem gemessenen Leervolumen. Das Volumen pro Ladung wurde somit vor dem Transport ins Heizwerk bzw. zum Lagerplatz bestimmt und war dementsprechend nicht durch die Transportbewegung weiter verdichtet worden.

Die Masse der frischen Hackschnitzel wurde mittels Fahrzeugwaage am Heizwerk bestimmt und dem TFZ und der LWF schriftlich (ggf. auch mündlich) mitgeteilt. In Einzelfällen wurde sie nicht gemessen, wenn z. B. das Schüttgut auf einen Lagerplatz im Wald gefahren wurde oder für private Kunden ohne Fahrzeugwaage gehackt wurde. In diesen Fällen wurde die Masse der Hackschnitzel über die Schüttdichte einer repräsentativen Teilprobe aus dem Lkw und über das zugehörige vor Ort ausgemessene Hackschnitzelvolumen berechnet (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.2.3). Zur Bestimmung der Trockenmasse der jeweiligen Lkw-Ladung wurde am TFZ aus einer während der Feldstudien gewonnenen repräsentativen Hackschnitzelprobe der Wassergehalt analysiert (siehe Abschnitt 5.2.4.4). Die Masse der Ladung wurde um diesen Wert reduziert.

Zu jeder Hackschnitzelprobe/Zeitstudie wurden die Produktionsbedingungen vor Ort aufgenommen (Rohmaterial) und von den Maschinenführern erfragt (Maschineneinstellungen, vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Ergebnisse zum Kraftstoffverbrauch und zur Durchsatzleistung wurden differenziert nach Leistung der Trägermaschine, den Maschineneinstellungen und dem Rohmaterial ausgewertet.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Expertenbefragung

4.3.1.1 Erster Fragenkomplex: Verfahrensketten und Maschinenausstattung (Fragen 1, 2 und 11)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, einen Überblick über die typischen Verfahrensketten der Hackschnitzelbereitstellung bzw. der Vorkette sowie über die eingesetzten Maschinen zu erhalten.

Die häufigsten Verfahrensketten (Frage 1) sind mit der Hälfte der Nennungen vollmechanisierte Verfahrensketten (vgl. Abbildung 13). Es folgen teilmechanisierte Verfahrensketten (10 von 36 Nennungen). Vier von 36 Befragten sehen verschiedene Verfahrensketten als gleichbedeutend an. Bei den sonstigen Verfahrensketten handelt es sich überwiegend um die Seilkranbringung (2 Nennungen).

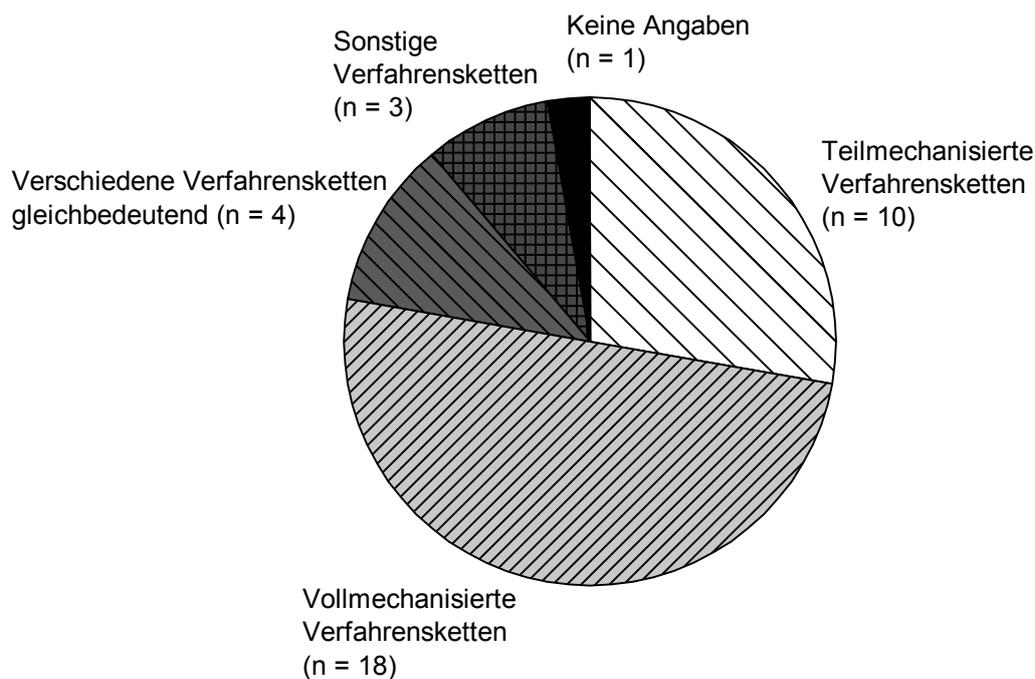


Abbildung 13: Häufigste Verfahrensketten bei der Waldhackschnitzelbereitstellung (n = 36)

Frage 2 thematisiert die am häufigsten eingesetzte Maschinenausstattung. Die jeweiligen Antworten wurden differenziert nach den einzelnen Modulen der gesamten Verfahrenskette ausgewertet. Mit der Hälfte der Nennungen sind Harvester die am häufigsten zur Fällung eingesetzten Maschinen (Abbildung 14). Es folgt das motormanuelle Fällen mit 13 von 36 Nennungen.

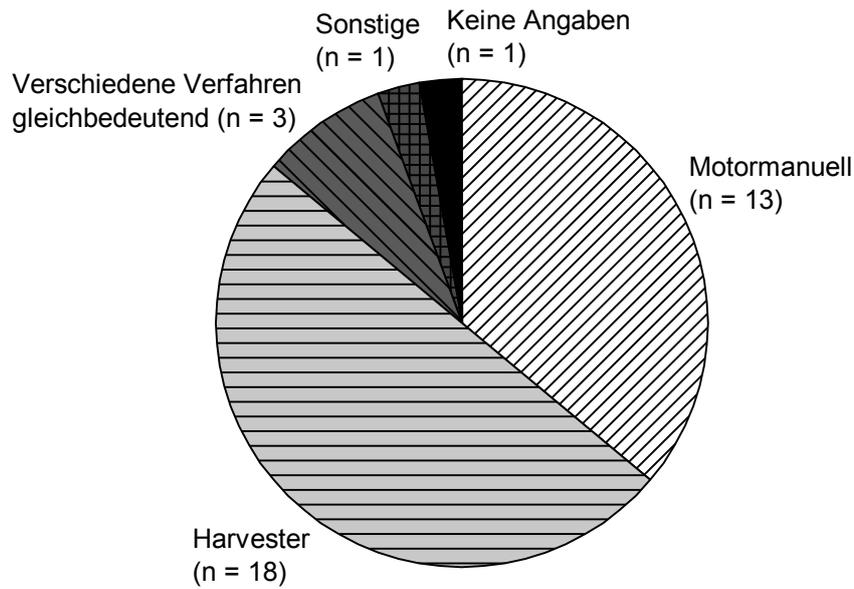


Abbildung 14: Verwendete Maschinen beim Verfahrensschritt „Fällen“ (n = 36)

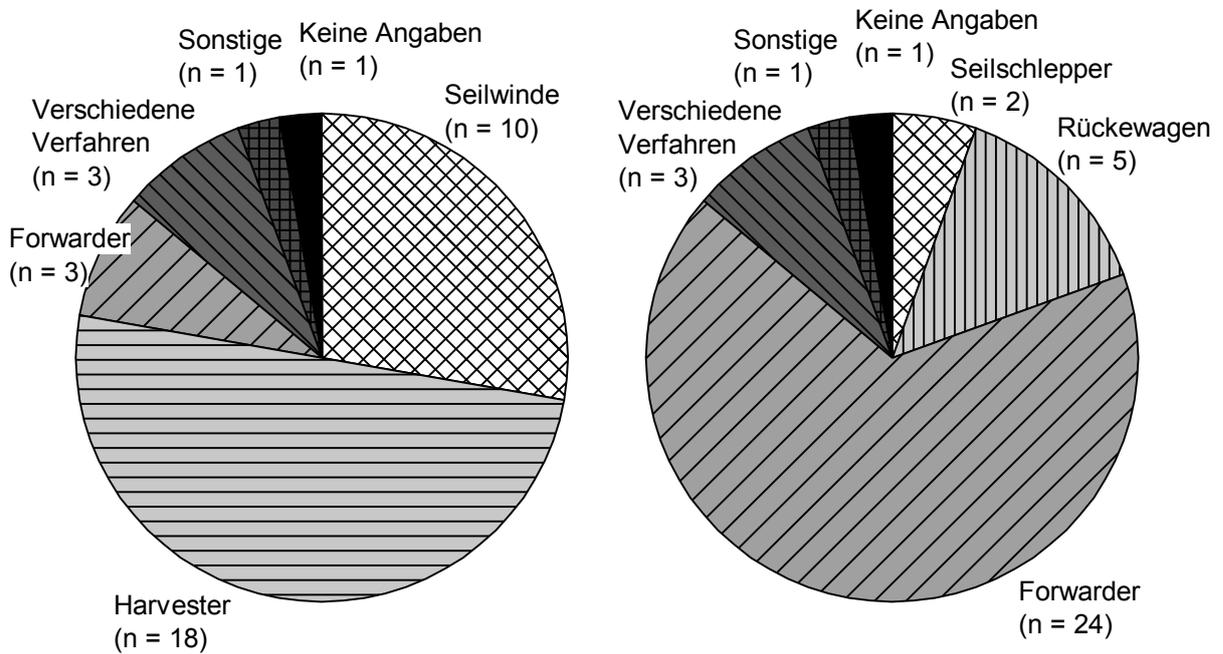


Abbildung 15: Verwendete Maschinen beim Verfahrensschritt „Vorliefern/Vorkonzentrieren“ (links) und beim Verfahrensschritt „Rücken“ (n = 36)

Analog zum Fällen wurde in der Hälfte der Fälle die Vorlieferung/das Vorkonzentrieren durch Harvester angegeben (Abbildung 15 links). Dem folgte das Vorliefern mittels Seilwinde mit 10 von 36 Nennungen. In drei Fällen wurde berichtet, dass überwiegend mittels Forwarder vorgeliefert wird.

Hinsichtlich des Verfahrensschritts Rückung waren Forwarder mit 24 von 36 Antworten die weitaus bedeutendsten Fahrzeuge (Abbildung 15 rechts). Es folgte der Rückewagen (Rückeanhänger an Traktor) mit fünf Nennungen. Seilschlepper wurden von zwei der Befragten als das wichtigste Rückefahrzeug benannt.

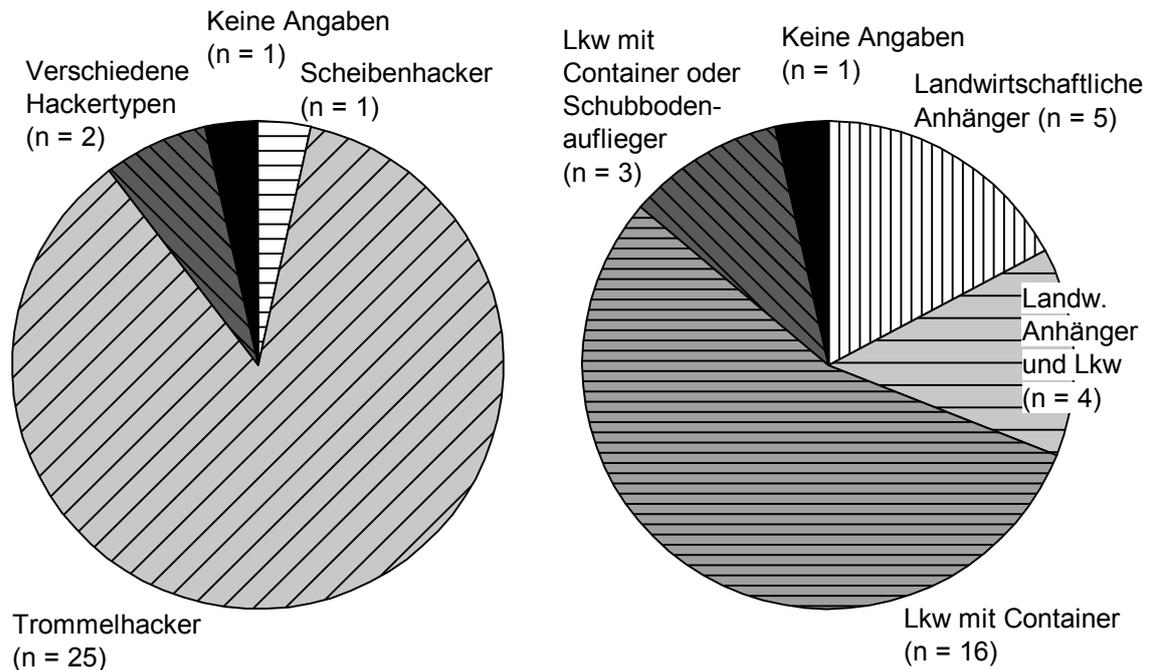


Abbildung 16: Verwendete Hacker (links, Einteilung nach Bauweise) und Fahrzeuge beim Verfahrensschritt „Transport“ (n = 29)

Bei den Angaben zu den verwendeten Hackern bzw. zu der Hackschnitzellogistik ist das Gesamtkollektiv von 36 auf 29 Befragungen reduziert, da die Gruppe der Forstdienstleistungsunternehmen ohne Hackerbetrieb hier ausgenommen wurde. Beim Verfahrensschritt Hacken spielen die Trommelhacker die wichtigste Rolle. Die übrigen Bauweisen sind weniger bedeutend (Abbildung 16 links).

Der Transport der Hackschnitzel erfolgt zu mehr als 50 % durch Lkw mit Containern (Abbildung 16 rechts). In fünf Fällen wurden landwirtschaftliche Anhänger als überwiegendes Transportmittel benannt, vier der Befragten sprachen in diesem Zusammenhang den landwirtschaftlichen Anhängern und den Lkw-Systemen gleiche Bedeutung zu. In 3 von 29 Antworten wurde angegeben, dass neben dem Container-Lkw alternativ auch Schubboden-Lkw zum Einsatz kommen.

Waren die beiden obigen Fragestellungen nach den typischen und häufig verwendeten Verfahrensketten bzw. Maschinen sehr konkret, stellt die Frage nach der persönlichen Einschätzung der Zukunftschancen neuer Techniken in der Produktions- und Bereitstellungskette für Waldhackschnitzel (Frage 11) eine weitreichende und eher spekulative Frage dar. Hier waren Mehrfachnennungen zugelassen. Insgesamt wurden 56 Angaben erfasst.

Bei 19 Antworten wurde die grundsätzliche Ansicht vertreten, dass Energieholzaggregate an Bedeutung gewinnen werden. Hiervon sahen zehn Antworten die Fäller-Bündler-Technik im Allgemeinen im Aufschwung, fünf Teilnehmer vermuteten Zukunftschancen speziell für Aggregate mit scherenden Werkzeugen („Zwicker“) und vier Befragte konstatierten einen Bedeutungsgewinn bei den Nachrüstsyste-men (Sammelarme) für Standard-Harvesteraggregate. Allerdings waren auch vier Interviewpartner explizit der Ansicht, dass sich die Fäller-Bündler-Technik nicht durchsetzen werde.

Drei Experten nannten Marktchancen für Trägersysteme auf der Basis konventioneller Bagger. Acht der Befragten waren der Meinung, der Status quo bei der Hackschnitzelproduktion werde bleiben bzw. die Technik sei ausgereift. Hinsichtlich einer möglichen Entwicklung bei den Hackern sagten je drei Interviewpartner eine weitere Tendenz zu Großhackern bzw. zur Verwendung von Schreddern für Waldhackschnitzel voraus.

Ergebnisdiskussion zum ersten Fragenkomplex

Die dargestellten Befragungsergebnisse zu den Fragen 1 (Verfahrensketten) und 2 (Maschinenausstattung) entsprechen den Beobachtungen aus den Feldversuchen (Abschnitt 4.3.4). Bei der Waldhackschnitzelbereitstellung werden weit überwiegend Standardverfahren mit etablierter Maschinenausstattung eingesetzt. Sie zeigen im Umkehrschluss, dass „exotische“ Verfahren wie Kronenbündler keine Marktbedeutung erlangen konnten. Bereits 2005 wurde ein Kronenbündelaggregat im Einsatz in Bayern untersucht und angemerkt, dass diese Maschinen hauptsächlich in Skandinavien geeignet sind [201]. Das dort übliche Bündeln auf der Rückegasse wird wegen des deutlich geringeren Anfalls an Schlagrücklass als für mitteleuropäische Verhältnisse weniger geeignet beschrieben. Die forstwirtschaftlichen Verhältnisse in Bayern, insbesondere die relativ kleinen Hiebsflächen, verstärken diese Tendenz. Auch die vollmechanisierte Bereitstellung mittels Hackschnitzel-Harvesters konnte sich nicht etablieren [81].

Eine Einschätzung der Häufigkeit der Verfahrensketten in den verschiedenen Waldbesitzarten ist auf Grundlage der Befragungsergebnisse nicht möglich. Aus den offenen Fragen und den Beobachtungen aus den Feldstudien ergibt sich jedoch der Eindruck, dass der Grad der Mechanisierung nicht direkt von der Waldbesitzart abhängig ist. Es ist jedoch zu beachten, dass im Privatwald kleinere, separate Energieholztriebe üblicherweise nicht über die FBG bzw. WBV, sondern direkt von den Waldbesitzern organisiert und somit durch Befragung der Zusammenschlüsse und Unternehmer nur bedingt erfasst werden.

Eindeutig ist das Ergebnis hinsichtlich der eingesetzten Hackerbauarten, wobei auch hier zu beachten ist, dass die Befragten tendenziell den professionellen Hackschnitzelmarkt im Fokus haben. Scheibenrad- und Schneckenhacker werden auch von den Herstellern eher für den Einsatz am eigenen Hof und im Privatwald entwickelt und Maschinen für den professionellen forstwirtschaftlichen Einsatz nur vereinzelt angeboten.

Beim Transport spielen Container-Lkw und landwirtschaftliche Anhänger die wichtigste Rolle. Zwar setzen einzelne professionelle Hackerunternehmen auch Schubboden-Lkw ein, allerdings wurden sie in keinem Fall separat als das wichtigste Transportmittel benannt, sondern kommen in der Regel in Kombination mit Container-Lkw zum Einsatz.

Eine besondere, in der Praxis verwendete Variante der vollmechanisierten Standard-Verfahrensketten wurde von einem Befragten unabhängig von der Frage der Häufigkeit beschrieben. Hierbei werden Kronen der Fichte über die übliche Derbholzgrenze hinaus bis ca. 5 cm Durchmesser grob entastet. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 4.3.4.4 im Rahmen der Fallstudie Eurasburg näher untersucht.

4.3.1.2 Zweiter Fragenkomplex: Verwendete Waldrestholzsortimente, Herkünfte der Waldhackschnitzel 2010 (Fragen 3 und 16)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, einen Überblick über die für die Produktion von Waldhackschnitzeln typischen Hackholzsortimente und über die häufig verwendeten Baumarten(gruppen) zu erhalten.

Auf die Frage nach den wichtigsten Hackholzsortimenten werden Nadelholz-Mischungen mit 16 von 36 Nennungen am häufigsten angegeben (Abbildung 17). Dem folgen Fichten-Gipfel mit 10 Nennungen. Speziell Fichten-Gipfel mit höherem Derbholzanteil stellen bei drei Interviewpartnern das wichtigste Sortiment dar. In Zusammenhang mit der Verwendung von Fichtengipfeln im Allgemeinen war in mehreren Fällen von einer Tendenz zur Erhöhung des Zopfdurchmesser die Rede, in einem Fall wurde dieser mit im Durchschnitt 12 cm definiert.

Mögliche Beimischungen von X-Holz oder anderen Baumarten wurden bei allen Sortimenten als geringfügig (max. 10 %) angegeben.

Kiefer- und Fichten-Energierundholz wurde zweimal als das wichtigste Sortiment bezeichnet, in beiden Fällen durch eine FBG/WBV. Daneben nannten mehrere Befragte Energierundholz als ein praxisrelevantes Sortiment.

Die Frage 16 thematisierte die im Jahr 2010 produzierte bzw. vermarktete Menge an Waldhackschnitzeln hinsichtlich der Baumarten. Die Antworten sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

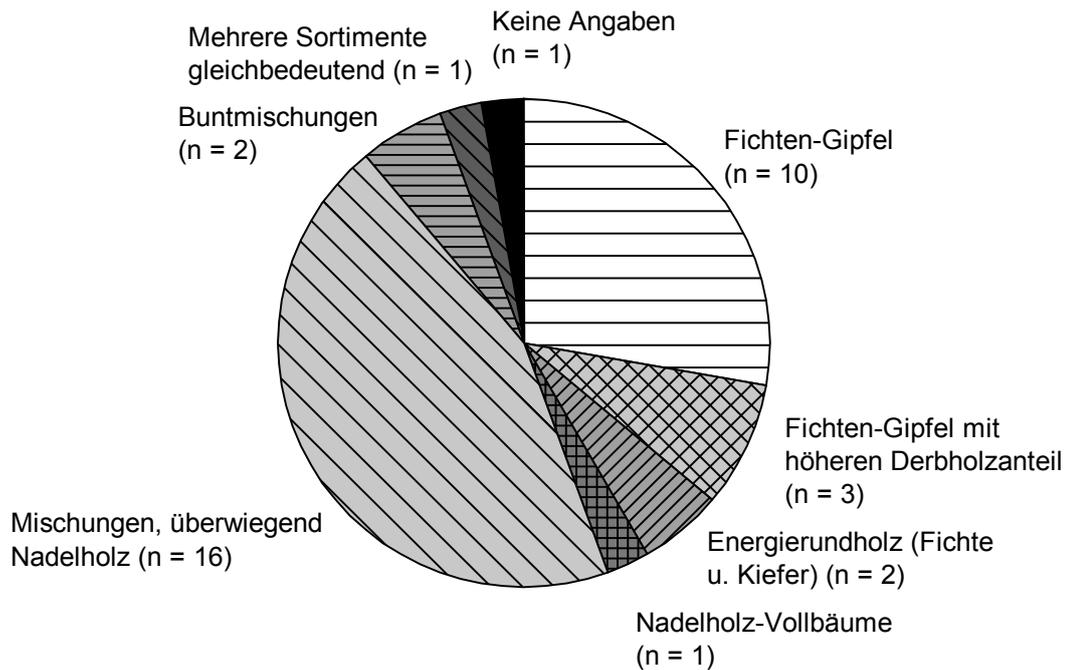


Abbildung 17: Zur Produktion von Waldhackschnitzeln am häufigsten verwendete Hackholzsortimente (n = 36)

Tabelle 14: Ausgangsmaterial bei der Hackschnitzelproduktion (n = 29)

Baumartenanteile	Nennungen
Fichte 76–100 % mit Laubholzanteil ≤ 10 %	13
Nadelholz-Mischungen mit Laubholzanteil 10–20 %	6
Nadelholz-Mischungen mit Laubholzanteil ≥ 20 %	4
Fichte-Buche-Mischungen mit überwiegendem Fichtenanteil, Buchenanteil 11–40 %, Anteil sonstiger Baumarten bis 10 %	2
Fichte 50–75 %, Laubholzanteil bis 10 %, Rest sonstiges Nadelholz	1
Laub- und Nadelholz zu je 50 %	1
Sonstige Mischungen	1
Keine Angaben	1

Ergebnisdiskussion zum zweiten Fragenkomplex

Bei der Frage nach der Bedeutung der Sortimente war für viele Interviewpartner eine genaue Angabe zu einzelnen Baumarten nicht möglich. Mitunter wurden mehrere Sortimente in unterschiedlichen Abhängigkeiten als wichtig angegeben. Zudem fiel die Einschätzung auf das gesamte Jahr bezogen teils schwer. Trotzdem ist die bestimmende

Rolle der Nadelholzsortimente am Hackholz klar zu erkennen, wobei ein merklicher Laubholzanteil in nadelholzdominierten Hackschnitzelsortimenten deutlich ist.

Bei der Befragung 2011 war der Begriff „Energierundholz“ noch nicht bei allen Befragten hinreichend bekannt, um von einer einheitlichen Definition ausgehen zu können. Die Nutzung von Energierundholz ist hauptsächlich auf die Nachfrage nach „Premiumhackschnitzeln“ für private Hackschnitzelheizungen zurückzuführen. Auch über die Befragung hinaus waren dem „Energierundholz“ sinngemäß ähnliche Begriffe wie „Premiumware“, „weiße Ware“ und „Stammholz“ häufig von Praktikern zu hören.

Im Energieholzmarktbericht 2012 der LWF wurden Hackerunternehmer nach den von ihnen produzierten Mengen und Sortimenten befragt [83]. Demnach sind 70 % der produzierten Waldhackschnitzel aus Fichte, 12 % aus anderen Nadelhölzern und 18 % aus Laubholz. Waldrestholz (inkl. Vollbäume) macht 89 % des Aufkommens an Waldhackschnitzeln aus, Energierundholz spielt mit 11 % eine untergeordnete Rolle. Auch die Auswertung des Holzeinschlags im Staatswald sowie der Holzeinschlagserhebung der LWF im Privat- und Körperschaftswald kommt mit 82 % Nadelholzanteil an den produzierten Hackschnitzeln zu einer ähnlichen Größenordnung [83].

4.3.1.3 Dritter Fragenkomplex: Betriebsablauf Hacken (Fragen 4 bis 8)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, Erkenntnisse über den praktischen Betriebsablauf bei der Waldhackschnitzelbereitstellung zu erhalten.

Überwiegend wurde die Forststraße als Standort des Hackers angegeben (27 von 29 Nennungen). Die Rückegasse als Hackerstandort wurde nicht genannt, das Hacken am Heiz(kraft)werk bzw. an anderen Orten ist mit jeweils einer Nennung unbedeutend.

Die Antworten auf die Frage der üblichen Lagerdauer des Hackholzes weisen drei Grundrichtungen auf, die jeweils für den Normalbetrieb außerhalb akuter Forstschutzsituationen gelten:

- Bei 18 von 29 Nennungen wird eine möglichst schnelle Weiterverarbeitung angestrebt. Die gezielte Vortrocknung des Holzes ist nicht gewünscht. Die Betriebe sind z. B. aus Naturschutzgründen bestrebt, das Hackholz so schnell wie möglich, d. h. nach ca. zwei bis drei Wochen, zu hacken.
- Vier der Befragten berichteten von einer planmäßigen Zwischenlagerung des Hackholzes zur Reduzierung des Wassergehalts bzw. Nadel- und Blätteranteils der Hackschnitzel. Lagerdauern von durchschnittlich einigen Monaten bis zu eineinhalb Jahren wurden hierbei genannt.
- Drei Befragte gaben an, die Lagerdauer des Hackholzes sei abhängig von der Verfügbarkeit der Maschinen, der Nachfrage nach Hackschnitzel, der Jahreszeit und der Witterung und daher stark schwankend. Zudem würden wirtschaftlich zu hackende Poltergrößen angesammelt.

Auf die Frage nach der Zwischenlagerung antworteten 12 von 29 Befragten, dass üblicherweise maximal ein Viertel der Waldhackschnitzelproduktion zwischengelagert wird, bei weiteren 6 Nennungen sind es zwischen einem Viertel und der Hälfte der Hackschnitzelmenge. Drei der Befragten gaben an, dass die gesamte Produktion zunächst ins Lager oder an Zwischenhändler geht.

Die Frage nach der Art der Zwischenlagerung ergab, dass Waldhackschnitzel überwiegend (21 von 36 Nennungen) in unabgedeckten Mieten gelagert werden. Daneben ist die Lagerung in Scheunen bzw. Hallen (9 Angaben) und in abgedeckten Mieten (6 Nennungen) bedeutend. In einem Fall wurde von einem zum Hackschnitzellager umgebauten Fahrsilo berichtet.

Zur Qualitätsverbesserung trocknen 6 von 36 Befragten nennenswerte Anteile ihrer Waldhackschnitzelproduktion technisch, wobei überwiegend die Abwärme von Biogasanlagen Verwendung findet. Etwa die Hälfte der Befragten hat bislang nur kleine Mengen oder lediglich versuchsweise Hackschnitzel technisch getrocknet.

Ergebnisdiskussion zum dritten Fragenkomplex

Die Entwicklung zu von professionellen Unternehmen betriebenen Großhackern erklärt die Forststraße als bedeutendsten Standort des Hackers. Auf der Rückegasse können diese Maschinen mangels Geländegängigkeit nicht sinnvoll eingesetzt und auch nicht ausgelastet werden. Durch ihre hohe Mobilität ermöglichen sie eine wirtschaftliche Umsetzung von Einsätzen im Wald (im Gegensatz zu zentralen Hackplätzen).

Bei der Frage nach der üblichen Lagerdauer zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Auf der einen Seite stehen Bestrebungen nach einer möglichst schnellen Verarbeitung des Hackholzes. Auf der anderen Seite können auch ungehackte Mengen zur Versorgung im Winter bzw. zur Mengenpufferung während Revisionsarbeiten an den belieferten Heizkraftwerken verwendet werden. Zu möglichen positiven Effekten auf den Wassergehalt des Hackholzes siehe auch Abschnitt 5.3.2.1.

Die Zwischenlagerung von Hackschnitzeln spielt bei mehr Befragten eine Rolle. Jedoch konnte über die Hälfte der Befragten keine Angaben zur üblichen Lagerdauer der Hackschnitzel im Zwischenlager machen. Es zeichnet sich jedoch ab, dass gerade bei großen Heiz(kraft)werken überwiegend direkt nach dem Hacken zum Verbraucher geliefert wird und die Zwischenlager primär zur Mengenpufferung dienen.

4.3.1.4 Vierter Fragenkomplex: Brennstoffspezifikationen, Qualität, Normung und Zertifizierung (Frage 9 und 10)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, Informationen über die vom Markt geforderten Brennstoffspezifikationen und über die Qualitätsorientierung, über die Verwendung von Brennstoffnormen sowie über die Verbreitung von Zertifizierungen und Qualitäts- und Gütezeichen zu erhalten.

Im Allgemeinen berichteten 9 von 29 Befragten von Qualitätsanforderungen für Waldhackschnitzel in ihren Lieferverträgen. Bei weiteren 5 Nennungen sind nur bestimmte Brennstoffspezifikationen vertraglich vorgegeben. In vier Fällen richtet sich die Vergütung nach der Qualität, insbesondere dem Wassergehalt, was sich in Preisstufen oder Zu- und Abschlägen ausdrückt.

Bei den Partikelgrößenklassen erfolgt in 15 Fällen eine Bezugnahme auf Normen, insbesondere auf die G-Klassen nach der ehemaligen ÖNorm M7133 „Holzhackgut für energetische Zwecke“ [159]. In 17 Fällen ist ein definierter Wassergehalt nach den Wassergehaltsklassen der genannten ÖNorm oder durch vorgegebene Werte einzuhalten. Bei vier Befragten galten verbal formulierte Vertragsbedingungen, wie z. B. „frische Hackschnitzel“. In lediglich einem Fall wurde von einer Vorgabe hinsichtlich des Ascheanteils ohne konkreten Normenbezug berichtet. Zwei Interviewpartner verwenden die DIN EN 14961-1 [48] „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen“ im Tagesgeschäft.

Sieben der Befragten gaben ausdrücklich als Tendenz an, dass mit steigender Anlagengröße die Anforderungen an die Hackschnitzelqualität sinken.

Bei den Nachhaltigkeitszertifikaten wurde das PEFC-System von 20 Befragten als relevant im Tagesgeschäft genannt. Bei den Gütezeichen wurde einzig das RAL-Gütezeichen für die Wald- und Landschaftspflege von drei Interviewpartnern genannt. Neun sagten aus, dass keinerlei Zertifizierung oder Gütezeichen für Hackschnitzel angewendet werden.

Ergebnisdiskussion zum vierten Fragenkomplex

Die Ergebnisse dieses Fragenkomplexes unterstreichen die Bedeutung der Qualität von Waldhackschnitzeln. Es wurden sowohl allgemein gehaltene als auch komplexere Qualitätsvorgaben genannt. Da gezielt nach den Lieferbedingungen gefragt wurde, blieben allerdings die besonders beim Eigenverbrauch zu beachtenden Vorgaben der Kessel- bzw. Anlagenhersteller an die Brennstoffspezifikationen (meist Wassergehalt und Partikelgrößenklassen) unbeachtet.

Zumindest der Wassergehalt und die Größen(klasse) der Hackschnitzel sind somit bei der energetischen Verwendung von Waldhackschnitzeln in der Regel zu beachten. Hinsichtlich des Wassergehalts bestehen gesetzliche Vorgaben aus der 1. BImSchV, die auf die Vorgaben der Kesselhersteller verweist. Die hohe Zahl der Nennungen des Größensystems und der Wassergehaltsstufen der ehemaligen ÖNorm M7133 [159] zeigt die nach wie vor bestehende Praxisbedeutung dieser Norm. Sie wurde bereits im Sommer 2011 durch die DIN EN 14961-1 [48] normativ ersetzt. Die DIN EN 14961-1 wurde wiederum im Sommer 2014 durch die international gültige DIN EN ISO 17225 [58] ersetzt.

Aus den Ergebnissen zur Zertifizierung kann eine Marktbedeutung des PEFC-Siegels abgeleitet werden, wenngleich kein direkter Bezug zu Fläche und vermarkteter Menge

besteht. Eindrücklich ist jedoch, dass neun der Befragten angegeben haben, dass weder Zertifikate noch andere Gütesiegel eine Rolle spielen.

4.3.1.5 Fünfter Fragenkomplex: Probleme und Schwachstellen, Forschungsbedarf, Hilfsmittel (Fragen 12 bis 14)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, bei Praktikern Bedenken, Probleme und Schwachstellen bei der Waldhackschnitzelbereitstellung direkt zu erfragen. Die gleiche Zielsetzung gilt hinsichtlich des Forschungsbedarfs und des Hilfsmittelbedarfs der Praxis. Wegen Mehrfachnennungen und Unschärfen bei der Beantwortung werden im Folgenden nur Tendenzen (ab 3 Nennungen) wiedergegeben.

Mehrfach wurden Bedenken hinsichtlich der Übernutzung und der Nachhaltigkeit bei der Nutzung von Hackholz im heute üblichen Umfang vorgebracht. Waldbauliche und naturschutzfachliche Bedenken standen damit im Zusammenhang.

- Bezüglich des Problemfelds Technik und Logistik stellte sich im Privatwald die mangelhafte Wegeerschließung als das dringendste Problem dar. Die Waldwege wurden als zu schmal für Hacker und Lkw beschrieben. Das Fehlen geeigneter Wendeplätze erschwerte den Einsatz von Schubboden-Lkw. Am zweithäufigsten waren fehlende oder unzureichende Lagerkapazitäten zu bemängeln. Es folgte die Logistik im Allgemeinen, wobei dieser Kritikpunkt in Verbindung mit den ebenfalls mehrfach beklagten engen Terminvorgaben und Lieferverpflichtungen zu sehen ist.
- Die Konkurrenz der Verwendungswege stofflich/energetisch wurde als problematisch erkannt. „Kampfpreise“ am Dienstleistermarkt und Konkurrenz durch „Billighackschnitzel“ wurden ebenso wie geringe Margen und Verdienstmöglichkeiten bemängelt.
- Forschungsbedarf wurde hinsichtlich der Optimierung der Verfahren und der Logistikkette, der Umrechnungs- und Schätzzahlen sowie der Lagerung gesehen. Gleiches gilt für die Übernahme und Validierung von Entwicklungen aus der Praxis (z. B. Holzfeuchtemessgeräte für Hackschnitzel) und die Information der Praxis.
- Hinsichtlich der verwendeten Hilfsmittel erklärten 15 von 36 Befragten, dass sie die von den Bayerischen Staatsforsten veröffentlichten Umrechnungsfaktoren (Volumen Hackholzpolter zu erzeugte Hackschnitzel) verwenden [11]. Sieben Interviewpartner nutzen alternativ Faktoren aus eigener Erfahrung.

Ergebnisdiskussion zum fünften Fragenkomplex

Die Antworten in diesem Fragenkomplex entsprechen den Beobachtungen der Autoren, z. B. hinsichtlich der oftmals unzureichenden Wegeerschließung im Privatwald und der Probleme bei der Hackschnitzellogistik. So war bei mehreren Hacker-Studien die Anfahrt der Transportfahrzeuge zu Hackaufträgen im Staatswald durch die mangelhafte Wegeerschließung im Privatwald erschwert, wobei zum Teil größere Umwege in Kauf genommen werden mussten.

Die von den Bayerischen Staatsforsten veröffentlichten Schätzmethode sind in der Praxis weit verbreitet [11]. Die Umrechnung des angenäherten Quadervolumens eines Hackholzpolters mittels des Faktors 0,6 auf das Schüttvolumen an Hackschnitzeln kann

als das Standardverfahren bezeichnet werden, wobei dieser Faktor mitunter infrage gestellt wurde. Teilweise werden deshalb eigene Methoden und Faktoren verwendet. Die Praxistauglichkeit der verwendeten Umrechnungsfaktoren wird in Kapitel 8 im Detail untersucht.

4.3.1.6 Sechster Fragenkomplex: Vermarktungsstrukturen (Fragen 15 und 17)

Ziel dieses Fragenkomplexes war es, einen groben Überblick über die Vermarktungsstrukturen der Befragten zu erhalten. Dabei konnten nur die Gruppen FBG/WBV und Hackerunternehmen sowie für die BaySF zentral das Zentrum für Energieholz (ZfE) berücksichtigt werden. Die jährlichen Vermarktungsmengen sind in Abbildung 18 dargestellt.

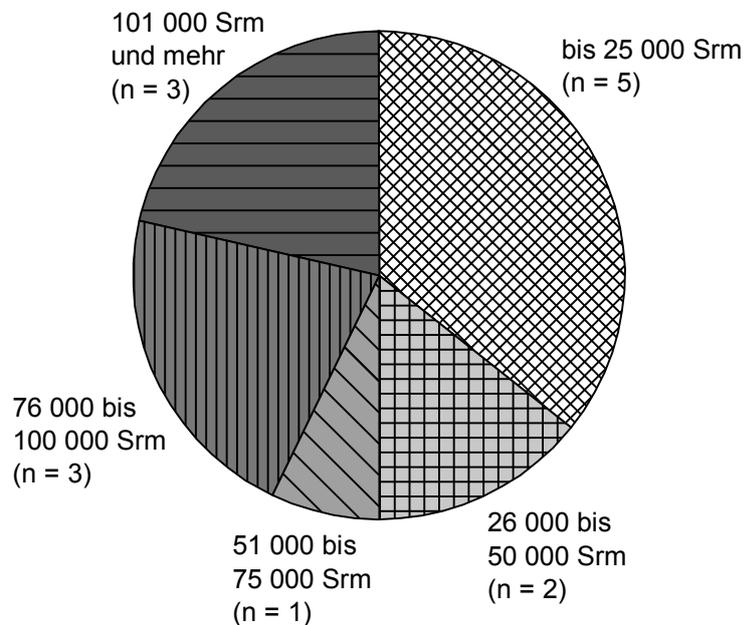


Abbildung 18: Jährliche Waldhackschnitzelvermarktungsmengen der Befragungsgruppen FBG/WBV, Hackerunternehmer und das ZfE (n = 14)

Die Abnehmerstruktur wurde aufgeschlüsselt nach Größe des Kunden. Bezogen auf die geschätzte Liefermenge gehen rund 11 % der Waldhackschnitzel an Kleinanlagen (bis 100 kW thermische Leistung), rund 37 % an mittlere Anlagen (100–1.000 kW thermisch) und rund 52 % an Großanlagen (ab 1 MW thermische Leistung).

Ergebnisdiskussion zum sechsten Fragenkomplex

Die umgeschlagenen Mengen und Abnehmer charakterisieren nur die befragten Teilnehmer der Gruppen FBG/WBV, Hackerunternehmer und das ZfE. Deshalb sollen und können aus den Ergebnissen keine Marktstrukturen abgeleitet werden.

4.3.1.7 Fazit zur Expertenbefragung

Methodik

Die gewählte Befragungsmethode wird als optimal bewertet. Insbesondere das persönliche Gespräch mit den Experten in der frühen Projektphase hat erheblich zu einem besseren Verständnis der Gesamtzusammenhänge beigetragen. So konnten im Vergleich zu schriftlichen Befragungen Erkenntnisse gewonnen werden, die über die standardisierte Auswertung der Antworten hinausgehen. Hierfür wurden das relativ kleine Befragungskollektiv und die damit verbundene Unschärfe bei der Auswertung in Kauf genommen.

Ergebnisse

Insgesamt zeichnen die Befragungsergebnisse einen Trend bei der Waldhackschnitzelbereitstellung hin zum Einsatz professioneller Hackerunternehmer. Das Hacken wird als ein von Ernte und Rückung entkoppelter Verfahrensschritt zunehmend mit mobilen Großhackern an der Forststraße durchgeführt. Diese Entwicklung ist auch im Privatwald zu beobachten, wobei die Erschließungssituation oft ein Hemmnis darstellt. Zudem scheinen sich Standardmaschinen mit breitem Einsatzspektrum durchzusetzen. Sondermaschinen und -verfahren spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Das aktuell wichtigste Sortiment zur Waldhackschnitzelbereitstellung in Bayern ist Fichten-Waldrestholz mit mehr oder weniger bedeutender Beimischung anderer Nadelhölzer und Laubhölzer. Die Bereitstellung sogenannter Premium-Hackschnitzel (auch „Weiße Ware“) aus Energierundholz gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung.

Durch die steigende Konkurrenz um den Rohstoff Holz (stoffliche Verwendung, Nutzungseinschränkungen) wird eine weitere Optimierung der Waldhackschnitzelbereitstellung immer wichtiger. Fragen der Nährstoffnachhaltigkeit gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden von den Akteuren sehr ernst genommen. Hier ist die Weiterentwicklung von Entscheidungshilfen (z. B. für die Kronennutzung) notwendig.

Die aktuellen Methoden zur Mengenschätzung weisen eine unzureichende Treffgenauigkeit auf, was in der Praxis häufig zu Problemen bei Disposition und Logistik führt.

4.3.2 Modellverfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Aus der Literaturanalyse, der Expertenbefragung und eigenen Beobachtungen werden vier (zzgl. zwei Varianten) für die forstliche Praxis typische Modellverfahrensketten (MVK) definiert. Die folgenden Parameter wurden zur Charakterisierung der MVK herangezogen:

- **Zielsortimente:** Aus der Darstellung der grundlegenden Holznutzungskonzepte unter 4.1.1 lassen sich die Verfahrensketten nach folgenden charakterisierenden Zielsortimenten einteilen:
 - **Primäre Energieholz-Verfahrensketten:** Bäume werden als Vollbäume oder Teile davon ausschließlich zur energetischen Verwendung geerntet. Das gilt sinngemäß auch für die Ernte von Sträuchern. Sie beginnen mit der Fällung.
 - **Restholzverfahrensketten:** Waldrestholz-Sortimente werden energetisch verwendet. Das können z. B. Schlagrücklass (Schlagabraum) oder aus Forstschutzgründen vorweg gefällte Bäume sein. Restholzverfahren umfassen daher nicht die Fällung.
 - **Kombinationsverfahrensketten** (stofflich/energetisch): Stofflich zu verwendende Holzsortimente (z. B. Stammholz-Fixlängen oder Industrieholz) werden zugleich – in einem Hieb – mit Energieholz-Sortimenten (z. B. Energierundholz oder Kronen als Hackholz) produziert. Kombinationsverfahren (stofflich/energetisch) beginnen mit der Fällung.
- **Mechanisierungsgrad:** Eine Vollmechanisierung liegt vor, wenn alle wesentlichen Verfahrensschritte Maschinenarbeit sind. Teilmechanisierte Verfahrensketten enthalten dagegen (motor)manuelle Arbeitsschritte (z. B. motormanuelle Fällung).
- **Kopplungsgrad:** Die Verfahrensketten können ungekoppelt, teilgekoppelt oder gekoppelt sein (vgl. Abschnitt 4.1.3).
- **Maschinenausstattung:** Charakterisierende Maschine(n), Geräte, Fahrzeuge oder sonstige technische Besonderheiten des Verfahrens. Die angegebenen Maschinen werden für die Verfahrenskette als typisch angesehen.
- **Standort des Hackers:** Der Hacker kann grundsätzlich auf der Rückegasse, an der Forststraße oder an zentralen Hackplätzen eingesetzt werden.
- **Einsatzbereich:** Ggf. werden zusätzliche Angaben zu speziellen Einsatzbereichen gemacht.

Anhand dieser Abfolge werden die folgenden Modellverfahrensketten abgeleitet. Eine Gesamtschau der MVK ist in Abbildung 19 gegeben. Die beschriebenen Modellverfahrensketten bilden die übliche Praxis der Waldhackschnitzelbereitstellung repräsentativ ab, wobei sich daraus noch nicht die mengenmäßige Bedeutung der einzelnen Ketten (z. B. Kleinprivatwaldkette MVK IV) ableiten lässt.

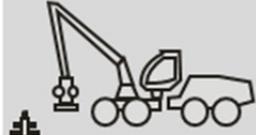
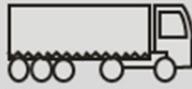
MVK	Waldbestand	Rückegasse	Forststraße	Straße
I a				
Kombi				
I b				
EH				
II				
Restholz				
III a				
Kombi				
III b				
EH				
IV				
EH				

Abbildung 19: Übersicht über die definierten Modellverfahrensketten I bis IV mit Angabe der Zielsortimente (Kombi: stofflich/energetisch kombiniert; EH: primäre Energieholzverfahren; Restholz: Restholzverfahren ohne Fällung und Aufarbeitung, im Waldbestand nur Vorliefern bei vorangehendem motormanuellem Hieb).

- **MVK I a:** Kombinations-Verfahrenskette (stofflich/energetisch), teilmechanisiert, teilgekoppelt, Fällung und Aufarbeitung motormanuell, Rückung mit Seilwinde, Forstspezialschlepper oder Kranrückewagen, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport.
- **MVK I b:** Wie I a, jedoch als primäre Energieholz-Verfahrenskette.
- **MVK II:** Restholz-Verfahrenskette, teilmechanisiert, teilgekoppelt, bei vorangehendem motormanuellem Hieb Vorliefern mit Seilwinde, Rückung mit Seilwinde, Forstspezialschlepper oder Kranrückewagen, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport.
- **MVK III a:** Kombinations-Verfahrenskette (stofflich/energetisch), vollmechanisiert, teilgekoppelt, Fällung und Aufarbeitung mit Harvester mit Standard-Harvester-Aggregat, Rückung mit Forwarder, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport.
- **MVK III b:** Primäre Energieholz-Verfahrenskette, vollmechanisiert, teilgekoppelt, Fällung und ggf. Aufarbeitung mit Harvester mit Fäller-Bündler-Aggregat oder Harvester-Aggregat mit Sammelfunktion, Rückung mit Forwarder, Hacken auf der Forststraße, Lkw-Transport. Die Fäller-Bündler-Einheit kann alternativ an einem Anbaukran an der Heckhydraulik eines leistungsfähigen Traktors montiert sein.
- **MVK IV:** Primäre Energieholz-Verfahrenskette, teilmechanisiert, gekoppelt, Fällung und Aufarbeitung motormanuell, Hacken auf der Rückegasse mit handbeschicktem Anbauhacker, Transport mit landwirtschaftlichen Anhängern. Varianten: Hacken auf der Forststraße oder bei der Verbrauchsstelle, Transport des Hackholzes mit Rückewagen. Geringer Mengenanfall („Kleinprivatwaldkette“).

4.3.3 Leistungs- und Kostenwerte für die Modellverfahrensketten

4.3.3.1 Ermittlung von Leistungs- und Kostenwerten für die Verfahrensschritte

Aus der Literaturlauswertung sowie eigenen Arbeitsstudien und Kalkulationen wurden Leistungs- und Kostenwerte für die Verfahrensschritte der Modellverfahrensketten ermittelt.

Literaturlauswertung von Leistungs- und Kostenwerten

Der Umfang der in den 17 ausgewerteten Publikationen beschriebenen Methoden und Ergebnisse war sehr heterogen. Einige Studien bildeten die gesamte Verfahrenskette mit Kosten- und Leistungswerten ab, bei anderen Studien waren nur Gesamtwerte verzeichnet. Aus den 50 dargestellten Fallstudien konnten 37 einer Modellverfahrenskette zugeordnet werden. Da teilweise noch Untervarianten aufgeführt waren, konnten 57 Datensätze extrahiert werden. Die Zuordnung kompletter Fallstudien zu den Modellverfahrensketten ist in der Übersichtstabelle in Anhang 9.2 und Anhang 9.3 dokumentiert. Teilweise konnten einzelne Prozessschritte der Fallstudien für mehrere Modellverfahrensketten herangezogen werden, z. B. beim Fällen und Aufarbeiten (inkl. Vorliefern) für die Modellverfahrensketten Ia, Ib und IV.

Die Werte für die Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten sowie Rückung (inkl. Vorliefern) sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die teils erheblichen Schwankungsbreiten erklären sich durch die stark unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Fallstudien.

Tabelle 15: Leistungs- und Kostenwerte aus der Literaturlauswertung für die Modellverfahrensketten, getrennt in die Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten (inkl. Vorliefern) sowie Rückung. Angegeben sind die Mittelwerte, in Klammern Minimal- und Maximalwert sowie die Anzahl der zuzuordnenden Fälle.

MVK	Fällen und Aufarbeiten (inkl. Vorliefern)		Rückung	
	[Srm/h (MAS)]	[€/Srm]	[Srm/h (MAS)]	[€/Srm]
I a	14 (5–26)	6 (2–12)		
I b	n = 8	n = 11	22 (7–48) n = 11	5 (2–13) n = 14
II	– ¹	– ¹		
III a	16 (7–32) n = 4	9 (4–20) n = 4	26 (5–47) n = 17	4 (2–13) n = 17
III b	15 (7–25) n = 10	8 (3–19) n = 10		
IV	14 (5–26) n = 8	6 (2–12) n = 11	17 (7–23) ² n = 9	5 (3–12) ² n = 9

¹⁾Bei MVK II ist der Verfahrensschritt Fällen und Aufarbeiten nicht in der Betrachtung enthalten, da es sich um eine Restholzverfahrenskette handelt. Bei vorangehendem motormanuellem Hieb ist hier jedoch das Vorliefern des Hackholzes zur Rückegasse zu berücksichtigen.

²⁾Die Ausgangsvariante von MVK IV geht vom Hacken auf der Rückegasse aus. Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf die Variante Hacken an der Forststraße mit Rückung des Hackholzes bei niedrigem Mechanisierungsgrad (Seilschlepper und Rückeanhänger).

In 17 Fällen waren Gesamtkosten der Verfahrensketten angegeben. Unter Berücksichtigung des Teuerungszuschlags ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten Gesamtkosten für die Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten (inkl. Vorliefern), Rückung und Hacken (Transport nicht berücksichtigt). Für die Gesamtkosten konnten auch Angaben für BHD-Klassen angegeben werden.

Tabelle 16: Gesamtkosten der Verfahrensschritte Fällen und Vorliefern, Rückung und Hacken aus der Literaturlauswertung für die Modellverfahrensketten in €/Srm. Angegeben sind die Mittelwerte, in Klammern Minimal- und Maximalwert sowie die Anzahl der zuordenbaren Fälle; zudem sind die Fallstudien soweit möglich BHD-Klassen zugeordnet.

MVK	Anzahl gesamt	Gesamtkosten [€/Srm]			Gesamtkosten nach BHD-Klasse		
		min.	max.	Mittelwert	BHD-Klasse	Anzahl	Mittelwert [€/Srm]
I a	4	9	17	13	20	1	16
					35	1	17
					50	2	9
I b	15	5	21	13	10	4	18
					15	5	12
					20	4	10
					30	1	16
					35	1	11
II	7	7	19	11	– ¹	– ¹	– ¹
III a	4	10	31	18	10	1	31
					15	1	15
					20	2	14
III b	11	8	30	15	5	1	25
					10	6	17
					15	1	16
					20	1	11
IV	4	12	18	15	10	2	16
					15	2	14

¹⁾ Bei MVK II ist der Verfahrensschritt Fällen und Aufarbeiten nicht in der Betrachtung enthalten, da es sich um eine Restholzverfahrenskette handelt. Eine getrennte Betrachtung nach BHD-Klasse unterbleibt daher.

Leistungs- und Kostenwerte aus eigenen Arbeitsstudien

Aus den Fallstudien Sailerhausen (Abschnitt 4.2.4.3) und Eurasburg (Abschnitt 4.2.4.4) wurden die in Tabelle 17 zusammengestellten Leistungswerte für die Verfahrensschritte Holzernte und Rückung gewonnen.

Für die zur Holzernte und Rückung eingesetzten Maschinen wurden die in Tabelle 18 gelisteten Kostensätze ermittelt.

Tabelle 17: Leistungswerte für Holzernte und Rückung in den Fallstudien Sailershausen und Eurasburg

Fallstudie	Verfahrensschritt	MVK	BHD [cm]	Leistung [Srm/h (MAS)]
Sailershausen	Fällen und Aufarbeiten	III b	10	10,25
	Rückung	III b		25,00
Eurasburg	Fällen und Aufarbeiten	III a	23	63,50
	Rückung	III a		35,50

Tabelle 18: Kosten für Harvester und Forwarder aus den Fallstudien Sailershausen und Eurasburg

Fallstudie	Maschine/Typ	MVK	Kosten [€/Srm]
Sailershausen	Raupenharvester Neuson Ecotec 132 HVT (Standardaggregat mit optionaler Sammelfunktion)	III b	11,87
	Forwarder Timberjack 1010B	III b	3,32
Eurasburg	Sechsradharvester Ponsse Bear (Standardaggregat)	III a	2,52
	Forwarder Komatsu 840.4	III a	2,55

Die in den Hacker-Studien (Abschnitt 4.3.4.1) beobachteten Hacker wurden in fünf Leistungsklassen (Antriebsleistung in 100-kW-Schritten) eingeteilt. Für den Verfahrensschritt Hacken wurden je nach Ausgangsmaterial und Antriebsleistung aus der Regressionsanalyse zur Technischen Arbeitsproduktivität die Leistungswerte in Tabelle 19 abgeleitet.

Tabelle 19: Leistungswerte für den Verfahrensschritt Hacken aus den Fallstudien

Leistungsklasse	Leistung [Srm/h (MAS)]			
	Waldrestholz		Energierundholz	
Hacker	min.	max.	min.	max.
0 (< 100 kW)	–	22,9	–	31,8
1 (100–199 kW)	23,3	44,8	32,1	65,5
2 (200–299 kW)	45,0	66,1	65,8	99,8
3 (300–399 kW)	66,3	87,1	100,2	134,6
4 (≥ 400 kW)	87,3	107,9	134,9	169,7

Für jede Hacker-Leistungsklasse wurde ein typisches Modell, ggf. inklusive Schlepper, stellvertretend kalkuliert (Tabelle 20).

Tabelle 20: Leistung und Kosten für Hacker nach Leistungsklasse

Hacker	Schlepper	Antriebsleistung [kW]	Leistungs-klasse	Leistung [Srm/h (MAS)]		Kosten [€/h (MAS)]
				Wrh	Er	
Farmi 260 HF-EM	Deutz Fahr Agrotron K430 ProfiLine	82	0	19,2	26,1	105,83
Musmax Wood Terminator 9XLZ	Valtra T 190	154	1	35,0	50,2	162,17
Komptech Chippe 510C	Claas Xerion 3800 Trac VC	278	2	61,6	92,6	240,36
Jenz HEM 582 R	–	353	3	77,5	118,6	247,42
Albach Silvator 2000	–	450	4	97,7	152,5	259,45

In Verbindung mit den Leistungswerten in Tabelle 19 lassen sich Kostensätze für den Verfahrensschritt Hacken getrennt nach Ausgangsmaterial und Leistungsklasse des Hackers ableiten (Tabelle 20). Für die Modellverfahrensketten wurden hieraus die folgenden Werte als typisch definiert:

- MVK I a und I b: Wrh und Er, Leistungsklasse 2,
- MVK II: Wrh, Leistungsklasse 2,
- MVK III a: Wrh und Er, Leistungsklasse 3,
- MVK III b: Wrh, Leistungsklasse 3,
- MVK IV: Wrh, Leistungsklasse 0 (gilt nur für Variante mit Hacken auf der Forststraße oder bei der Verbrauchsstelle).

Tabelle 21: Kosten für den Verfahrensschritt Hacken aus den im Projekt durchgeführten Arbeitsstudien getrennt nach Ausgangsmaterial und Leistungsklasse des Hackers

Leistungsklasse	Kosten [€/Srm]					
	Waldrestholz			Energierundholz		
Hacker	min.	max.	Kalkuliertes Hackermodell	min.	max.	Kalkuliertes Hackermodell
0 (< 100 kW)	4,60	–	5,50	3,30	–	4,10
1 (100–199 kW)	3,60	7,00	4,60	2,50	5,10	3,20
2 (200–299 kW)	3,60	5,30	3,90	2,40	3,70	2,60
3 (300–399 kW)	2,80	3,70	3,20	1,80	2,50	2,10
4 (≥ 400 kW)	2,40	3,00	2,70	1,50	1,90	1,70

4.3.3.2 Zusammenführung der Leistungs- und Kostenwerte

Die zusammengeführten Wertebereiche für die Leistung der Verfahrensschritte Fällen und Aufarbeiten, Rückung und Hacken sind in Abbildung 20 für die Modellverfahrensketten dargestellt.

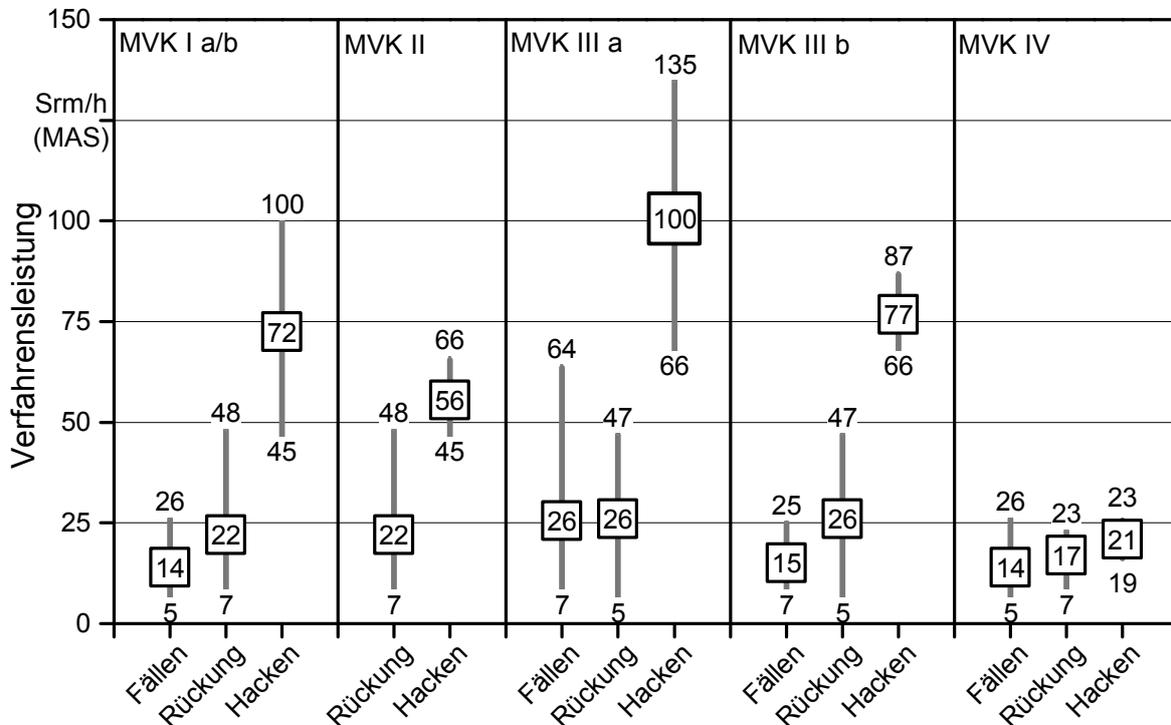


Abbildung 20: Leistungsbereiche für die Verfahrensschritte Fällen (inkl. Aufarbeiten und Vorliefern), Rückung und Hacken für die Modellverfahrensketten in Srm/h (MAS). Angegeben sind Mittel-, Minimal- und Maximalwert.

Das Hacken auf der Rückegasse ist auch im Kleinprivatwald ein rückläufiges Verfahren. Die Datengrundlage hierfür beschränkt sich auf zwei Quellen [201][202]. Eigene Werte wurden nicht erhoben. Für die Variation mit Hacken auf der Forststraße, die ebenfalls einen hohen Anteil an Eigenleistung erlaubt, werden daher für den Verfahrensschritt Rückung die Leistungs- und Kostenwerte im gering mechanisierten Bereich (Seilschlepper, Rückeanhänger) der Werte für MVK I a, I b und II, für den Verfahrensschritt Hacken die Werte für Waldrestholz in der Leistungsklasse 0 aus Tabelle 20 und Tabelle 21 angesetzt.

Die entsprechenden Kosten je Schüttraummeter sind in Abbildung 21 sowohl für die Verfahrensschritte als auch in der Gesamtsumme dargestellt.

Die Mittelwerte der Gesamtkosten (ohne Ferntransport) liegen für alle betrachteten Modellverfahrensketten in einer vergleichbaren Größenordnung. Ausnahme ist die MVK II, bei der als Restholzverfahrenskette jedoch der Verfahrensschritt Fällen und Aufarbeiten nicht einfließt.

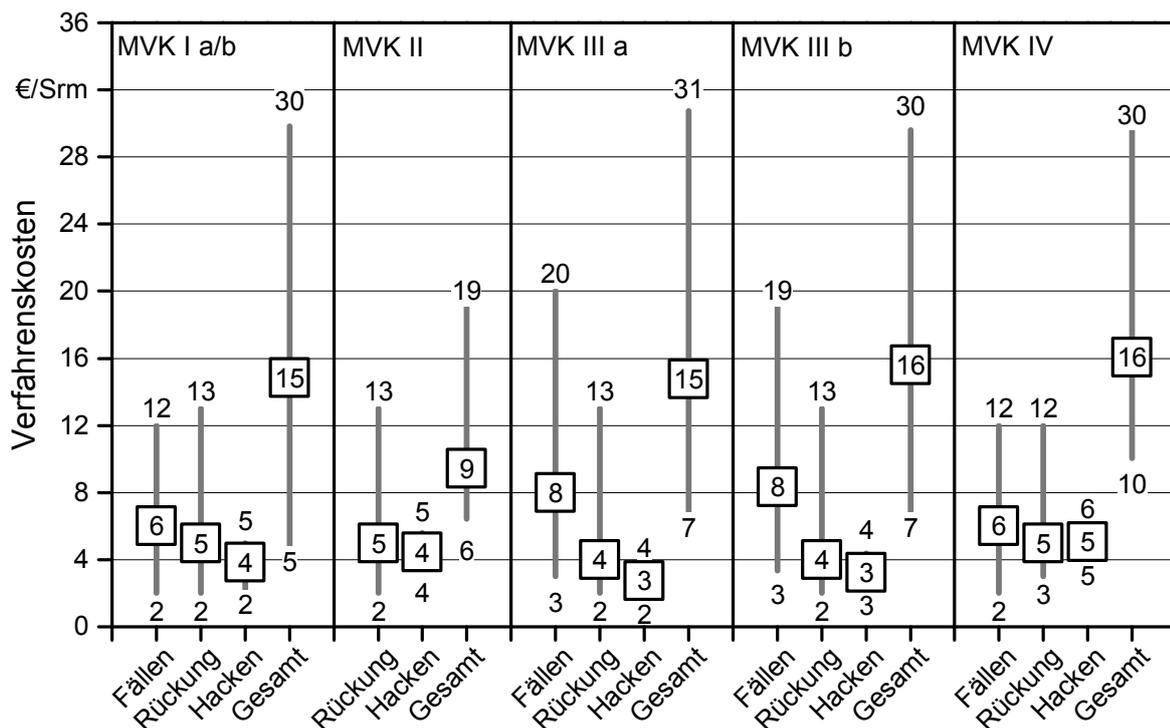


Abbildung 21: Kostenbereiche für die Verfahrensschritte Fällen (inkl. Aufarbeiten und Vorliefern), Rückung und Hacken sowie Gesamtkosten für die Modellverfahrensketten in €/Srm. Angegeben sind Mittel-, Minimal- und Maximalwert. Zu beachten ist, dass für die MVK II als Restholzverfahrenskette keine Kosten für Fällen und Aufarbeiten hinterlegt sind. Bei vorangehendem motormanuellem Hieb ist hier jedoch das Vorliefern des Hackholzes zur Rückegasse zu berücksichtigen.

4.3.3.3 Fazit zu den Kosten und Leistungswerten der Modellverfahrensketten

Methodik

Die Aggregation von Literaturwerten stellte eine große Herausforderung dar. In den ausgewerteten Studien wurden teilweise unterschiedliche Bezugseinheiten sowohl für die Leistung als auch für die Kosten verwendet. Eine Umrechnung anhand der dargestellten pauschalen Umrechnungsfaktoren birgt eine gewisse Ungenauigkeit. Da jedoch ohne diese Umrechnung keine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgen konnte, wurde dies in Kauf genommen. Durch die Verdichtung der Werte gehen auch weiterführende Informationen, wie z. B. die Rahmenbedingungen, verloren. Entsprechend müssen die dargestellten Werte als unverbindliche Orientierungswerte verstanden werden.

Die Kalkulation von Maschinenkosten ist bei der Ermittlung von Verfahrenskosten als Hilfsmittel zu sehen. In der Realität werden Preise zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer je Auftrag oder als Rahmenvertrag verhandelt. Es handelt sich somit um Marktpreise. Der letztendliche Preis hängt stark von Umfang und Rahmenbedingungen der Arbeiten ab. Zudem wird in der Forstwirtschaft üblicherweise nach erzeugter Holzmenge und nicht grundsätzlich auf Stundenbasis abgerechnet. Für die Verwendung kalkulierter Stundensätze sprechen Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit sowie Heterogenität und mangelnde Bekanntheit „realer“ Sätze. Zur Sicherstellung eines angemessenen Niveaus wurden die wichtigsten Eingangsgrößen für die Kalkulationen mit Unternehmern diskutiert und die Ergebnisse mit recherchierten Regiestundensätzen verprobt.

Ergebnisse

Die untersuchten Modellverfahrensketten unterscheiden sich hinsichtlich der Zielsortimente, der eingesetzten Technik und der Organisation der einzelnen Verfahrensschritte. In der Literatur lässt sich eine deutliche Typisierung und Kategorisierung erkennen. Diese wird durch die Befragungsergebnisse (vgl. Abschnitt 4.3.1) und eigene Beobachtungen bestätigt und fließt in die Modellverfahrensketten ein. Typischerweise wird der Mechanisierungsgrad dabei durch alle Verfahrensschritte auf ähnlichem Niveau durchgehalten (z. B. vollmechanisierte Harvesterhiebe mit anschließendem Einsatz eines professionellen Großhackers). Teilweise lässt sich dies durch die aufeinander abzustimmende Leistung der Verfahrensschritte erklären. Allerdings wird dieser Faktor durch eine gesteigerte Entkopplung entschärft, z. B. wenn in motormanuellen Hieben nachgeschaltet mit einem leistungsstarken Forwarder gerückt wird.

Tendenziell zeigen höher mechanisierte Verfahren (MVK III a und b) höhere Leistungswerte. Die geringere Leistung in niedriger mechanisierten Verfahren wird teilweise durch die geringeren Stundensätze der eingesetzten Maschinen ausgeglichen. Eine eindeutige Aussage hierzu ist aber aufgrund der breiten Schwankungsbereiche nur schwer möglich. Bei den vollmechanisierten Verfahrensketten III a und III b schlagen die relativ hohen Kosten für Fällen und Aufarbeiten in den Gesamtkosten durch, was vor allem an den vergleichsweise hohen Maschinenkosten für Harvester liegt. Über die vor allem im Schwachholz hohen Kosten für den Harvestereinsatz wurde auch bei der Expertenbefra-

gung (vgl. Abschnitt 4.3.1) mehrfach berichtet. In der Praxis wird versucht, die Kosten z. B. durch den Einsatz von Baggern als Trägerfahrzeug der Ernteaggregate (vgl. Abschnitt 4.3.4.3) zu senken.

Bei den Wertebereichen für Leistung und Kosten der Hacker spielt die nachgeschaltete Logistik, vor allem deren Organisation, die entscheidende Rolle (siehe auch 4.3.4.2). Erfahrungsgemäß geht mit einer höheren Professionalisierung entlang der Kette auch eine professionellere Disposition von Transportfahrzeugen einher, sodass die Leistungspotenziale der Großhacker besser ausgeschöpft werden können.

Für eine Einschätzung der zu erwartenden Leistungs- und Kostenbereiche der Modellverfahrensketten ist die hier dargestellte Betrachtung ausreichend. Die breiten Schwankungsbereiche resultieren aus unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Fallstudien. Wie in den Fallstudien Sailerhausen (Abschnitt 4.3.4.3) und Eurasburg (Abschnitt 4.3.4.4) gezeigt ist die Leistung unter anderem abhängig von der Ausformung des auscheidenden Bestands. In der Literatur werden hierfür verschiedene Kenngrößen verwendet (BHD, mittleres Baumvolumen, Kronenfußdurchmesser). Eine detaillierte statistische Auswertung ist aufgrund der Heterogenität der Daten und der Vereinfachung bei der Aggregation nicht möglich. Die Tendenz der mit der Einzelbaumdimension steigenden Leistung (innerhalb der Modellverfahrensketten) zeigt sich jedoch in der Darstellung der Gesamtkosten der Verfahren nach BHD-Klassen.

Zur konkreten Einsatzplanung sollte jeder der Verfahrensschritte einzeln betrachtet und entsprechend der eingesetzten Technik und Rahmenbedingungen eingeschätzt werden.

4.3.4 Ergebnisse der Arbeitsstudien

4.3.4.1 Arbeitsstudien zum Verfahrensschritt Hacken

Bei den 38 Hackertagen wurden 28 Einsätze mit Waldrestholz, neun Einsätze mit Energierundholz und ein Einsatz auf einer Kurzumtriebsplantage beobachtet. Von den Einsätzen im Wald fanden 31 (24 Waldrestholz, 7 Energierundholz) im Staatswald, sechs (4 Waldrestholz, 2 Energierundholz) im Privatwald statt. Zwei der Studien waren Teile umfassender Fallstudien der Bereitstellungskette (Abschnitte 4.3.4.3 und 4.3.4.4). Sechs Studien erfolgten in Kombination mit den Untersuchungen zur Logistik (Abschnitt 4.3.4.2).

Dem Waldrestholz waren teilweise Vollbäume aus Rückegassenauftrieb beigegeben, die aber aufgrund ihrer Ähnlichkeit des Materials nicht separat betrachtet wurden. Beim Energierundholz waren bisweilen auch stärkere Stammstücke enthalten, die mangels Qualität energetisch verwendet wurden. Das bei einem Einsatz gehackte KUP-Material stammte von einer Versuchsfläche der LWF (Balsampappeln im zehnjährigen Umtrieb). Die Fichte überwog mit 17 Hackholzpoltern deutlich bei den Baumartengruppen (Abbildung 22).

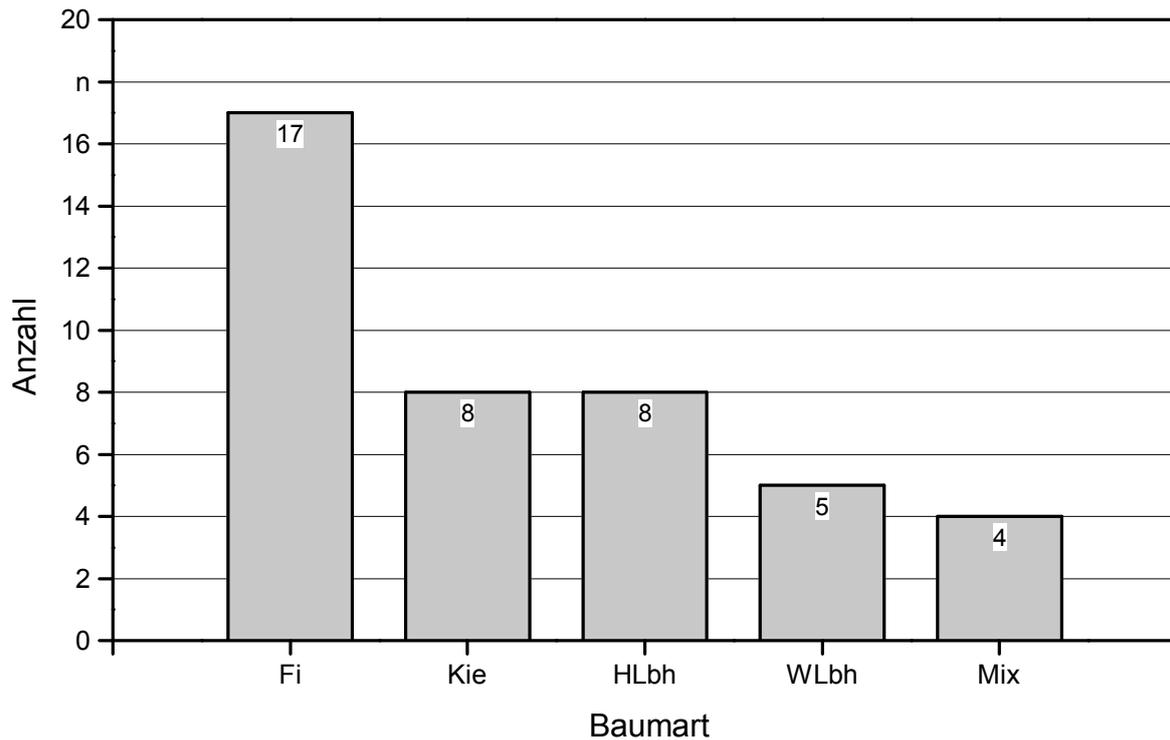


Abbildung 22: Überwiegende Baumartengruppen in den Hackholzpoltern (Fi: Fichte, Kie: Kiefer, HLbh: Hartlaubholz, WLbh: Weichlaubholz, Mix: Buntmischung). Bei 4 der 38 Einsätze wurden getrennt gepoltert je zwei Baumartengruppen vorgefunden, die Gesamtzahl beträgt daher 42.

Maschinen- und Fahrzeugausstattung

Alle angetroffenen Hacker waren Trommelhacker (Abschnitt 4.3.1.1). Bei je 17 Maschinen handelte es sich um Anhängerhacker bzw. Lkw-Aufbauhacker, weitere vier Fälle waren selbstfahrende Hacker. In 32 von 38 Fällen erfolgte der Austrag über ein Wurfgebläse. Als Sonderausstattung ist auch der Hackschnitzelaustrag über ein Förderband möglich. Zwei derartige Maschinen (beides Lkw-Aufbauhacker) wurden bei insgesamt sechs Einsätzen beobachtet.

Tabelle 22: Leistungsklassen und Anzahl der beobachteten Hackereinsätze (n = 38)

Leistungsklasse	Leistungsbereich	Anzahl Beobachtungen
0	bis 99 kW	1
1	100–199 kW	3
2	200–299 kW	13
3	300–399 kW	15
4	ab 400 kW	6

Bezüglich der Leistung wurden die Hacker über alle Bauarten in fünf **Leistungsklassen** eingeteilt, wobei die zum Hacken zur Verfügung stehende Leistung gilt. Die Grenzen der Leistungsklassen und die Anzahl der beobachteten Einsätze sind in Tabelle 22 aufgelistet.

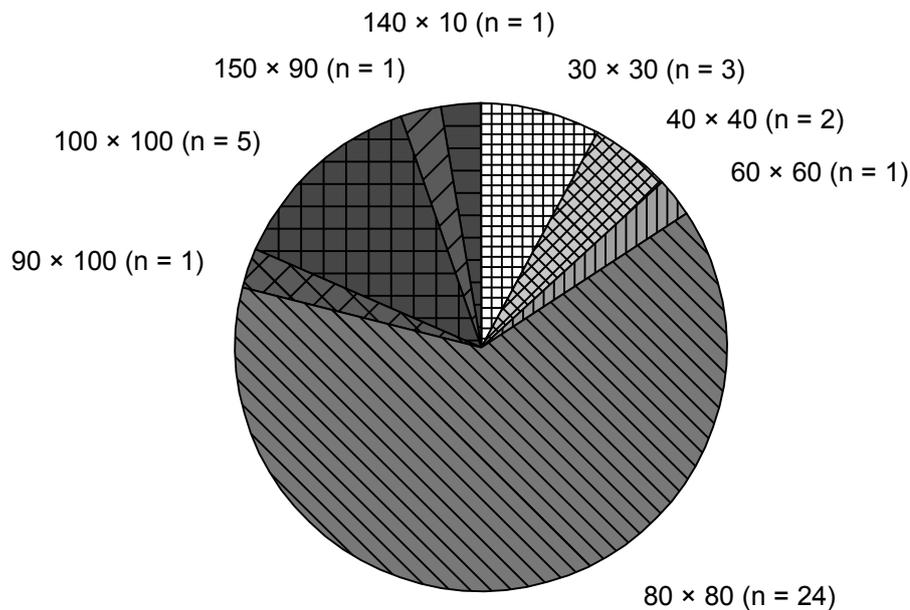


Abbildung 23: In den Arbeitsstudien verwendete Siebeinsätze in mm nach Häufigkeit (n = 38)

In Trommelhackern kommen **Siebeinsätze** unterschiedlicher Lochgrößen zum Einsatz. Bei allen beobachteten Hackern waren die Siebeinsätze auswechselbar. Die bei Weitem am häufigsten eingesetzte Siebbespannung hatte eine Lochweite von 80 × 80 mm (Abbildung 23).

Die **Transportfahrzeuge** wurden bei allen Außenaufnahmen aufgenommen. Bei den Transportfahrzeugen überwiegen im Staatswald die Container-Lkw mit 20 von 31 Fällen (Abbildung 24). Im Privat- und Körperschaftswald sind die landwirtschaftlichen Anhänger am häufigsten, wobei den Container-Lkw vor dem Hintergrund der geringen Anzahl (n = 6) an Fallstudien auch dort eine Bedeutung zuerkannt werden muss.

Insgesamt waren bei den Arbeitsstudien 53 Lkw-Container im Einsatz. Die häufigsten Nennvolumina waren 40 m³ (13 von 53), 35 m³ (11 von 53) und 38 m³ (10 von 53). Bei den Schubboden-Aufliegern wurden Ladevolumina (Nennvolumen) von 90, 92 und 94 m³ beobachtet (Abschnitt 4.1.2.4). Die Volumina der landwirtschaftlichen Anhänger betragen 14, 16 und 17 m³. Sogenannte „Abschiebewagen“, das sind Traktoranhänger mit einer vertikal arbeitenden hydraulischen Press- und Entladeeinrichtung, wurden mit Nennvo-

lumina von 40, 45 und 60 m³ angetroffen. Zwei Lkw-Anhänger mit 40 bzw. 50 m³ Ladevolumen und Seitenkippeinrichtung sind abschließend zu nennen. Sie wurden als Anhänger am eingesetzten Lkw-Aufbauhacker bzw. mit einem Schnellläufer-Traktor (Höchstgeschwindigkeit bis 65 km/h) bewegt.

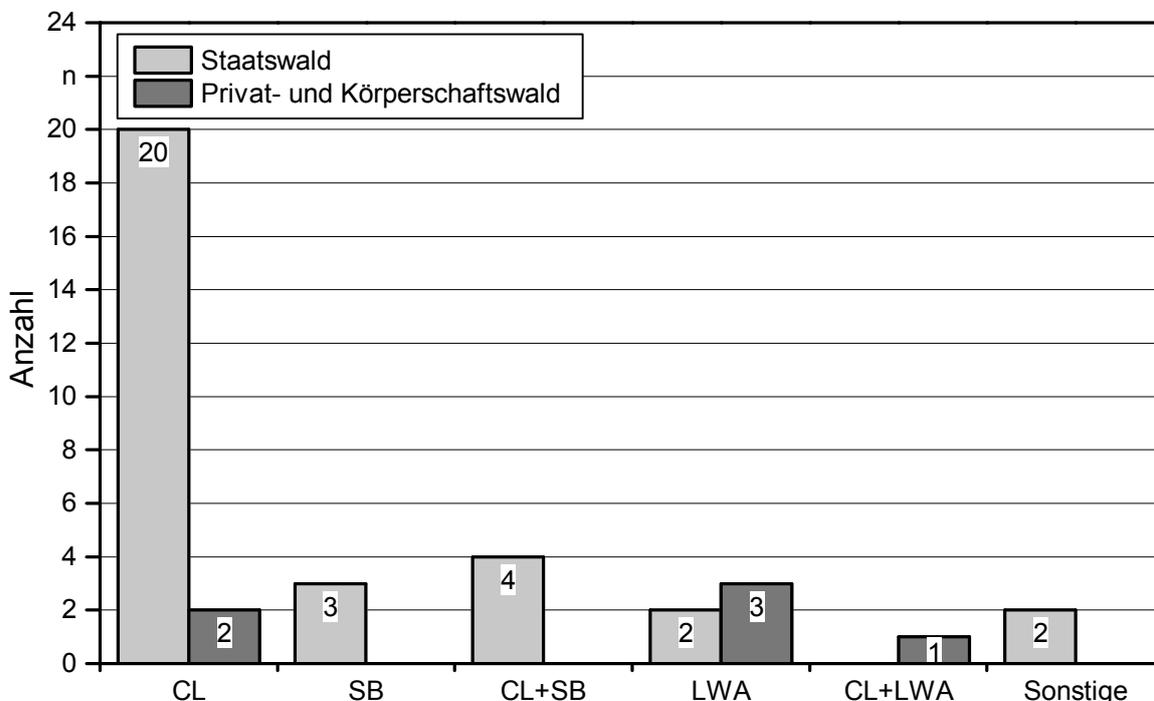


Abbildung 24: Bei den Arbeitsstudien beobachtete Transportfahrzeuge (CL: Container-Lkw, SB: Schubboden-Lkw, CL+SB: Kombination von Container-Lkw und Schubboden-Lkw, LWA: Landwirtschaftliche Anhänger, CL+LWA: Kombination von Container-Lkw und landwirtschaftlichen Anhängern; n = 37)

Bei den Hackereinsätzen im Staatswald wurden die Hackschnitzel in 26 von 31 Fällen direkt bzw. am selben Tag ins Heiz(kraft)werk geliefert. Fünf Lieferungen gingen in ein Lager. Bei den Hackerfallstudien im Privatwald stellte sich die Situation etwas differenzierter dar. Vier der sechs Lieferungen gingen ebenfalls direkt zur Verbrauchsstelle, wobei in einem Fall eine Teilmenge weiterverkauft werden sollte. Eine Lieferung ging zur Mengenbündelung zum Hackerbetrieb, eine andere Gesamtcharge wurde zu einer Biogasanlage zur technischen Trocknung gebracht. Die aus KUP-Material produzierten Hackschnitzel wurden ebenfalls direkt zu einem Heizkraftwerk geliefert.

Beobachtete Zeiten und ihre Korrelationen

Die anfallenden Zeiten wurden für 36 Einsatztage ausgewertet. Dabei umfassten zehn der Studien einen kompletten Auftrag oder Arbeitstag, 26 Studien bilden nur einen Teil des jeweiligen Auftrags bzw. Arbeitstags ab. Insgesamt wurden 88 h 19 min 36 sec Ge-

samte Arbeitszeit (GAZ) aufgenommen. Mit 39 % nahm der Hackerlastlauf den größten Anteil an der GAZ ein (Abbildung 25). Die Wartezeiten auf den Wechsel des Transportbehälters beliefen sich auf 28 % der GAZ. Die Allgemeinen Zeiten (AZ) betragen insgesamt 53 % der GAZ, die Reine Arbeitszeit (RAZ) und damit die Auslastung der Hacker über alle Studien demnach 47 % der GAZ. Erholungszeiten (Pausen) wurden ausschließlich während der Wartezeiten auf den Containerwechsel und weiterer Verteilzeiten beobachtet.

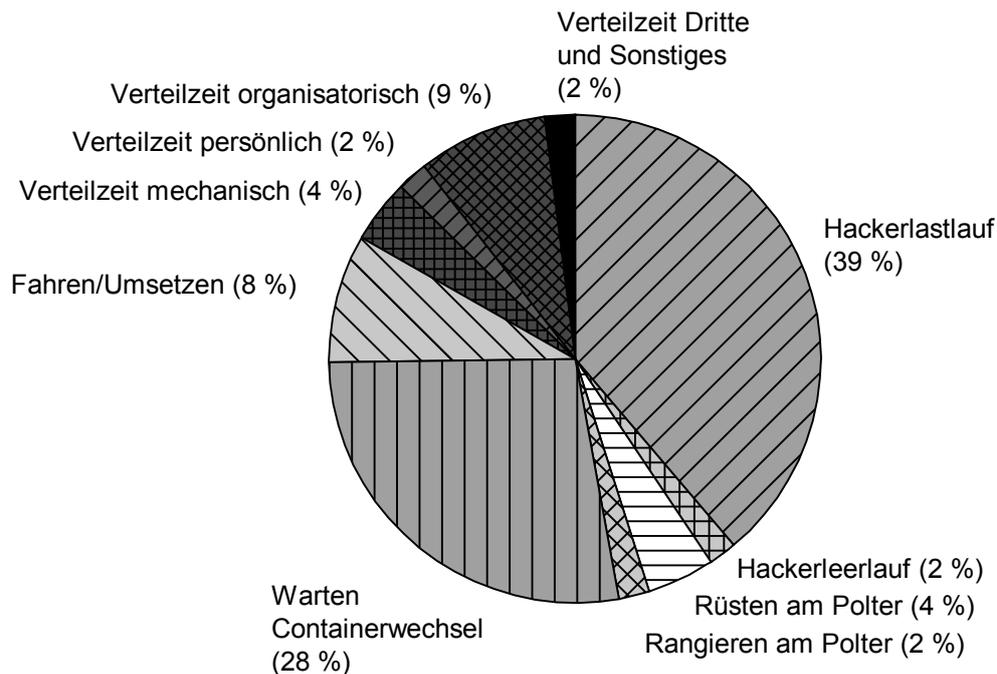


Abbildung 25: Anteile der Ablaufabschnitte an der Gesamten Arbeitszeit (GAZ) des Verfahrensschritts „Hacken“

Innerhalb der RAZ hat der Ablaufabschnitt „Hackerlastlauf“ einen überwiegenden Zeitanteil von 82 % (Abbildung 26 links). Rangier- und Rüstzeiten am Polter und der Hackerleerlauf haben nur einen untergeordneten Anteil. Bei größeren Poltern wurden absolut betrachtet Rangier- und Rüstzeiten in höherem Umfang erwartet als bei kleineren Poltern. Eine Korrelationsanalyse beider Parameter lässt hier jedoch keinen Zusammenhang erkennen ($R^2 = 0,29$).

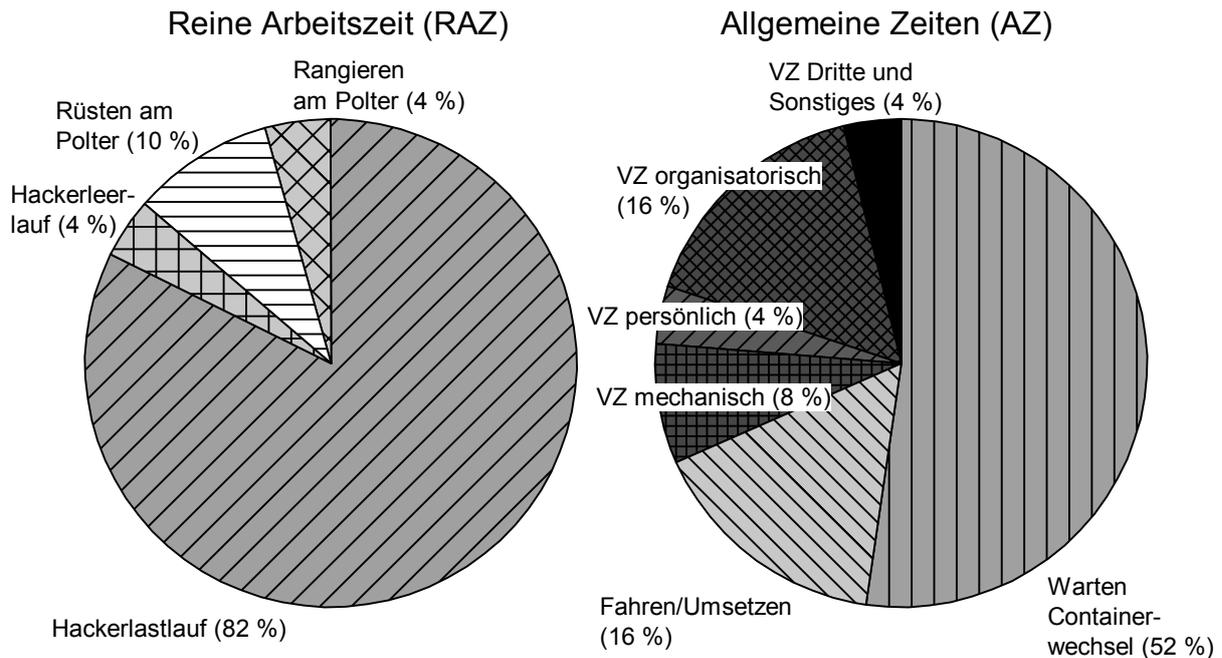


Abbildung 26: Zusammensetzung der Reinen Arbeitszeit (RAZ, links) und der Allgemeinen Zeiten (AZ, rechts) (VZ = Verteilzeit mechanisch, persönlich und organisatorisch)

Zudem entstehen Hackerleerlaufzeiten i. d. R., während der Maschinenführer Kranarbeit verrichtet und den Hacker nicht schnell genug mit Hackholz bedienen kann. Bei den Beobachtungen im Wald entstand der Eindruck, dass dies bei Waldrestholzpoltern durch die schwierigere Manipulierbarkeit im Vergleich zum Energierundholz häufiger der Fall war. Im Mittel fielen bei Waldrestholz 2 min 03 sec Hackerleerlaufzeit an, bei Energierundholz 1 min 34 sec. Die Tendenz konnte statistisch jedoch nicht belegt werden. Auch eine Betrachtung der Leerlaufzeiten unter Einbeziehung der Unterscheidung von Weichholz und Hartholz ergab hier keine signifikanten Zusammenhänge.

Die Technische Arbeitsproduktivität wird in Bezugnahme auf die Maschinenarbeitsstunde (MAS) ausgewertet, die Unterbrechungen < 15 min enthält. Im Mittel betrug der Zuschlag auf die RAZ, um die MAS zu erhalten, 13,7 %. Es war ein signifikanter Unterschied zwischen den angefallenen Unterbrechungen beim Waldrestholz (Mittelwert: 17,8 % der RAZ) und beim Energierundholz (Mittelwert: 5,5 % der RAZ) zu beobachten. Die Unterbrechungen waren vorrangig in Form der Ablaufabschnitte „Verteilzeit mechanisch“ und „Fahren/Umsetzen“ ursächlich für diesen Unterschied.

Technische Arbeitsproduktivität und Einflussfaktoren auf die Verfahrensleistung

Bei den 38 Hackereinsätzen konnten 44 separat zu betrachtende Datensätze zur Ermittlung der Technischen Arbeitsproduktivität (TAP) mit Bezugnahme auf die Maschinenarbeitsstunde (MAS) des Verfahrensschritts „Hacken“ gewonnen werden. Die Auswertung

erfolgte polterweise. Davon wurde in 30 Fällen Waldrestholz, in 13 Fällen Energierundholz und einmal Hackholz aus KUP verarbeitet. Die TAP für Hackholz aus KUP betrug 69,2 Srm/h (MAS).

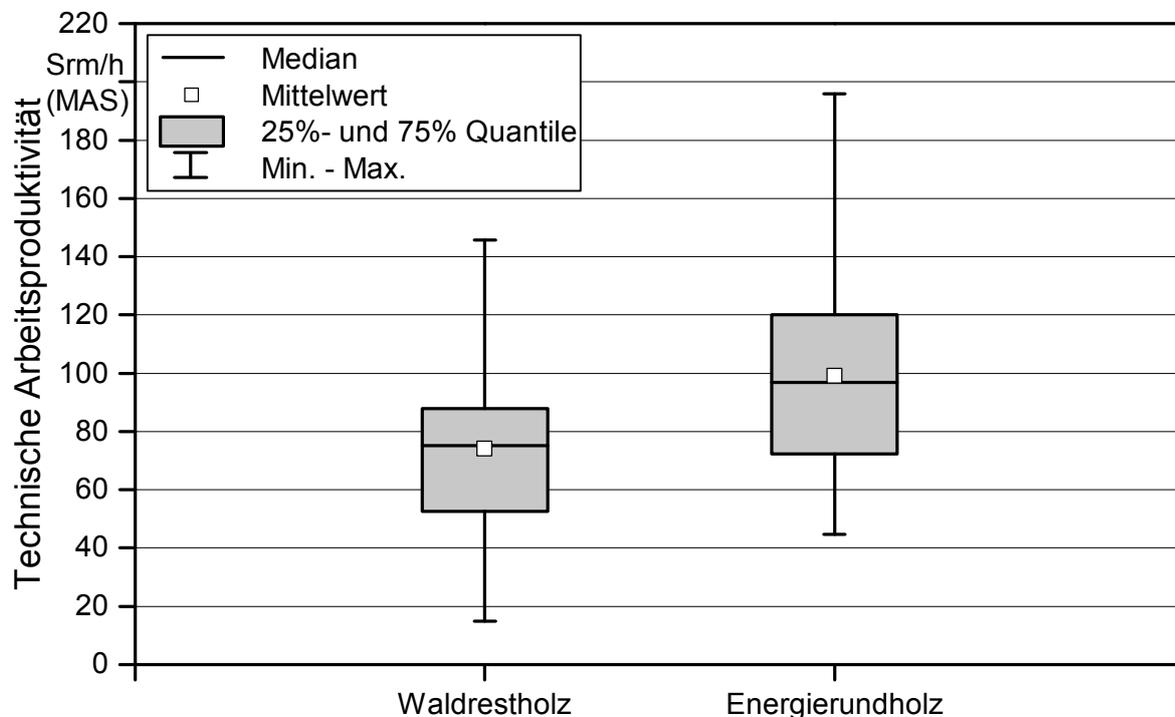


Abbildung 27: Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz (W_{rh}) und Energierundholz (E_r) in Srm/h (Maschinenarbeitsstunde MAS) ($n_{W_{rh}} = 30$, $n_{E_r} = 13$).

Da es sich um einen Einzelwert für diesen Poltertyp handelt, werden in Abbildung 27 nur die Werte für Waldrestholz und Energierundholz dargestellt. Beim Energierundholz wurde eine signifikant höhere TAP ($99,1 \pm 40,1$ Srm/h (MAS)) gemessen als beim Waldrestholz ($74,0 \pm 25,3$ Srm/h (MAS), T-Test: $p = 0,017$).

Beim Hacken von Weichholz wurde eine höhere TAP ($83,6 \pm 35,3$ Srm/h (MAS), $n = 30$) gemessen als beim Hartholz ($72,7 \pm 24,0$ Srm/h (MAS), $n = 11$), wobei dieser Unterschied jedoch nicht statistisch signifikant ist (T-Test: $p = 0,364$).

Die Auswertung nach den Siebgruppen „Fein“, „Standard“ und „Grob“ ergibt ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede. Die TAP bei der häufigsten Siebbespannung („Standard“ mit 80×80 mm, $n = 28$) betrug $86,2 \pm 30,8$ Srm/h (MAS).

Der Einfluss der Antriebsleistung auf die TAP wurde anhand der kontinuierlichen kW-Werte nach Herstellerangaben ausgewertet. Zur Beschreibung der Beziehung von Antriebsleistung und TAP wurden verschiedene Formeln getestet. Die Regressionsanalyse ergab für Formel [4-2] die engste Beziehung $R^2 = 0,4024$).

$$TAP_{\text{Hacker}} = 0,6116 \times kW^{0,8396}$$

Formel [4-2]

Aus der beschriebenen Analyse ergeben sich **zwei statistisch signifikante Zusammenhänge**:

- Die TAP ist bei Energierundholz höher als bei Waldrestholz.
- Die TAP steigt mit zunehmender Antriebsleistung am Hacker.

Der erste Zusammenhang muss auch vor dem Hintergrund gesehen werden, dass die durchschnittliche Antriebsleistung innerhalb der Waldrestholz-Studien höher lag (325 kW) als beim Energierundholz (288 kW), was die Aussage tendenziell noch verstärkt.

Um das Zusammenwirken beider Variablen abzubilden, wurde in einer multiplen Regressionsanalyse die Formel [4-3] ermittelt (korrigiertes $R^2 = 0,4264$). Dabei wird für PT (Poltertyp) bei Waldrestholz der Wert 0, bei Energierundholz der Wert 1 gesetzt.

$$TAP_{\text{Hacker}} = 0,23057 * kW + 33,76337 \times PT - 1,05777 \quad \text{Formel [4-3]}$$

In dieser Betrachtung ergibt sich, dass z. B. bei einem Hacker mit 300 kW Antriebsleistung beim Hacken von Waldrestholz eine TAP von 68,1 Srm/h (MAS) und beim Hacken von Energierundholz von 101,9 Srm/h (MAS) zu erwarten ist. Da die Formel den Einsatz der beiden Materialien nur durch einen Zuschlag bei Energierundholz von 33,76337 Srm/h (MAS) abbildet, wurde noch je eine getrennte Regressionsanalyse durchgeführt. Es ergeben sich Formel [4-4] und Formel [4-5] mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,544$ für Waldrestholz bzw. $R^2 = 0,6227$ für Energierundholz (Abbildung 28).

$$TAP_{\text{Wrh}} = 0,2823 * kW^{0,9571}$$

Formel [4-4]

$$TAP_{\text{Er}} = 0,2724 * kW^{1,0357}$$

Formel [4-5]

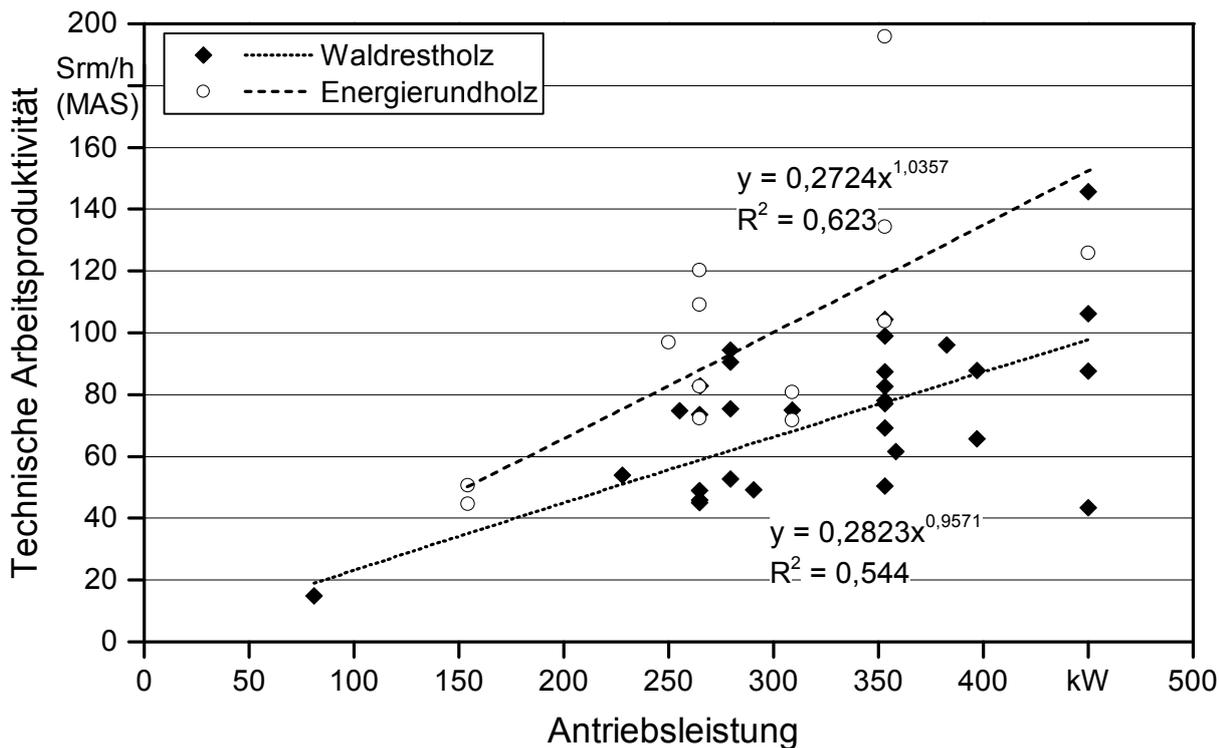


Abbildung 28: Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz und Energierundholz in Abhängigkeit von der Antriebsleistung

Tabelle 23: Hacker-Leistungsklassen und erwartete Technische Arbeitsproduktivität für Waldrestholz (Wrh) und Energierundholz (Er)

Leistungsklasse	Antriebsleistung [kW]	TAP [Srm/h (MAS)]	
		Wrh	Er
0	bis 99 kW	bis 23	bis 32
1	100–199 kW	24–45	32–65
2	200–299 kW	46–65	66–99
3	300–399 kW	66–87	100–134
4	ab 400 kW	88–108	135–170

Zur Ableitung erwarteter Produktivität wurden die Hacker in fünf Leistungsklassen eingeteilt. Die Klassenbereiche und typische zu erwartende Produktivitätswerte sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Wartezeiten auf den Wechsel des Transportbehälters

Bei den Allgemeinen Zeiten (AZ) spielen die Wartezeiten auf den Wechsel des Transportbehälters mit 52 % Anteil die größte Rolle (Abbildung 26 rechts). Damit haben diese Wartezeiten auch den größten Einfluss auf die Produktivität des Hackers. Zum Teil sind

die Wartezeiten verfahrensbedingt und nicht zu vermeiden. Konkret muss nach Ende der Beladung ein ggf. am Motorwagen leicht gekippter oder abgesetzter Container in Transportposition gebracht werden. Bei Schubboden-Lkw müssen die Hecktüren geschlossen werden. Relativ häufig wurde zudem beobachtet, dass die Hackschnitzelladung noch am Polter mit Gabeln oder Rechen glattgezogen wurde. Die Planen zur Ladungssicherung wurden, je nachdem ob bereits das nächste Fahrzeug wartete, entweder am Polter, etwas entfernt auf der Forststraße oder am Umladeplatz aufgezogen.

Bei Abfahrt des beladenen Transportfahrzeugs steht im Idealfall das nächste bereit. Meist wartet das folgende Fahrzeug an der nächstgelegenen Wegeeinmündung oder Kreuzung, um das beladene Fahrzeug passieren zu lassen und dann rückwärts an den Hacker zu fahren. Bei Container-Lkw wurde der Container zur besseren Beladung häufig leicht gekippt und die Flachplane meist zuvor entfernt. Bei Schubboden-Lkw ist die Vorbereitung am Polter deutlich langwieriger. Hier wird die Abdeckplane meist über eine Vorrichtung aufgewickelt und die Hecktüren (bei heckseitiger Beladung) geöffnet. Bei Schubboden-Lkw dauert das Rangieren am Polter wegen der geringeren Wendigkeit dieser Fahrzeuge i. d. R. länger als bei Container-Lkw. Mehrfach wurde beobachtet, dass der Hacker den Weg zum Polter für einen Schubboden-Lkw freimachen musste, um das Rückwärtsrangieren des Lkw zu vermeiden. Landwirtschaftliche Anhänger, auch die größeren Abschiebewagen, sind ähnlich dem Container-Lkw deutlich wendiger als die Schubboden-Lkw. Bis auf die geringere Fahrtgeschwindigkeit außerhalb des Waldes ist ihre Logistik somit mit dem Container-Lkw vergleichbar. Bei den kleineren landwirtschaftlichen Anhängern (bis 20 m³) waren bei allen drei Fallstudien, bei denen diese Transportmittel ausschließlich zum Einsatz kamen, stets ausreichende Transportkapazitäten vorhanden. Zum Teil warteten die Traktorgespanne auf ihre Beladung am Hacker. Die Wartezeiten entstanden somit nur für die Abfahrt bzw. das Rangieren der Gespanne. Steht jedoch nicht sofort das nächste Transportfahrzeug zur Verfügung, bleibt der Hacker zwangsläufig, meist am Polter wartend, stehen. Diese Wartezeiten können unvermeidbar sein, wenn z. B. ein Container-Lkw zum Umladeplatz fährt, um einen leeren Container zu holen bzw. die Container zu tauschen. Mitunter handelt es sich dagegen um störungsbedingte (z. B. Stau) bzw. durch die Koordination und Disposition der Logistikkette bedingte Wartezeiten. Zur allgemeinen Beschreibung der Logistikzyklen siehe die Abschnitte 4.2.4.2 und 4.3.4.2.

Die gesamte Zeit zwischen zwei Beladevorgängen wurde als Wartezeit des Hackers ausgewertet. Kleinere Wartungsarbeiten fielen oft in diese Wartezeiten. Soweit sie < 15 min Dauer blieben, wurden sie (in Anlehnung an die Maschinenarbeitsstunde MAS) nicht von der Wartezeit abgezogen, da der Maschinenführer keinen Einfluss auf die vom Transportfahrzeug verursachten Wartezeiten hat und diese für ihn zwangsweise anfallen. In einzelnen Fällen wurden weitere Ablaufabschnitte (z. B. Reparaturen) mit einer Dauer > 15 min innerhalb der Wartezeit beobachtet. Sofern diese Verteilzeiten eindeutig unabhängig vom Transportfahrzeug anfielen, wurden sie für diese Analyse von den Wartezeiten abgezogen. Während der Wartezeit musste der Hacker in einzelnen Fällen selbst rangieren, um das Transportfahrzeug passieren zu lassen. In der Analyse wurden diese Rangierzeiten nicht zu den eigentlichen Wartezeiten gezählt.

Die Transportbehälter wurden in fünf Gruppen eingeteilt. Unterschieden werden Anhänger an landwirtschaftlichen Traktoren, Anhänger an Lkw, Rollbandauflieger, Container und Schubboden-Auflieger (Tabelle 24).

Tabelle 24: Transportbehälter, Anzahl der Beobachtungen und Wartezeiten

Warten auf:	n	Wartezeit gerundet auf ganze Minuten [min]		Ladevolumen [m ³]
		Mittelwert	Median	
Container	35	14 ± 18	9	32–40
Schubboden-Auflieger	13	26 ± 30	15	90–94
Anhänger (Schlepper)	5	3 ± 3	2	14–38
Anhänger (Lkw)	2	42 ± 9	41	50
Rollbandauflieger	2	44 ± 34	44	50

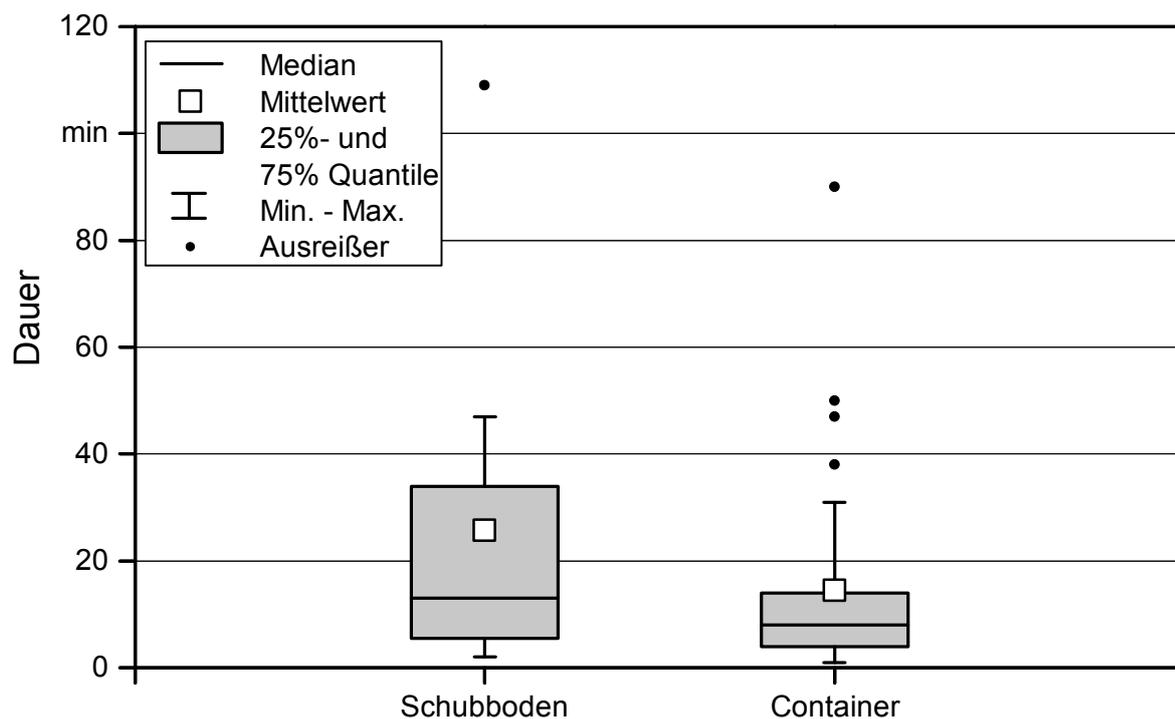


Abbildung 29: Wartezeiten auf Wechsel des Transportbehälters (gerundet auf ganze Minuten; n Schubboden-Auflieger = 13, n Container = 35).

Es konnten 57 eindeutig abgrenzbare Ablaufabschnitte „Warten Containerwechsel“ unterschieden werden. Die kürzeste Wartezeit belief sich auf 41 sec, die längste auf 1 h 48 min 53 sec. Für die weitere Auswertung ist eine Beschränkung auf Container (n = 35) und Schubboden-Auflieger (n = 13) sinnvoll, da bei den anderen Transportbehältern nur

wenige Fälle beobachtet wurden. Zudem wurden anstelle des Mittelwerts der Median und Quantile verwendet, da eine Aussage zur Verteilung der Messwerte getroffen werden sollte. Bei den Containern beträgt der Median der Wartezeiten 9 min 21 sec. Das 75%-Quantil liegt bei 15 min 10 sec. Das bedeutet, dass $\frac{3}{4}$ der beobachteten Wartezeiten unter dieser Grenze lagen. Bei den Schubboden-Aufliegern beträgt der Median 14 min 43 sec. Das 75%-Quantil liegt bei 37 min 26 sec (Abbildung 29).

Bei der Befülldauer (RAZ) konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Transportbehältern (bezogen auf ihr Volumen) festgestellt werden. Die Leistung des Hackers wird von der Art der eingesetzten Transportbehälter nicht beeinflusst.

Diskussion der Methodik

Die Ergebnisse zur Charakterisierung des Hackholzes und zur Maschinenausstattung zeigen auch im Abgleich mit den Ergebnissen der Expertenbefragung (Abschnitt 4.3.1), dass die begleiteten Hackereinsätze eine repräsentative Auswahl praxisüblicher Einsätze in bayerischen Wäldern darstellen. Dabei lag der Fokus klar auf professionellen Einsätzen, die im Staatswald üblich sind, aber auch im Privat- und Körperschaftswald bereits Einzug gehalten haben und weiter Verbreitung finden.

Der Umfang der Arbeitsstudien war dem Umfang des Projekts angemessen. Die ermittelten Werte für die Technische Arbeitsproduktivität der Hacker zeichnen sich durch ihre im Vergleich zu anderen Studien sehr breite Datenbasis aus. Ähnliche Fallzahlen wurden nur in wenigen Studien ausgewertet [185].

Einzelne Aspekte, wie detaillierte Aussagen zur Gesamten Arbeitszeit, konnten aus zeitlichen Gründen nicht bei allen Arbeitsstudien erhoben werden. Bei den Kernpunkten wurde aber eine umfangreiche und fundierte Datengrundlage zur Bewertung von Hackereinsätzen geschaffen.

Hackereinsätze im Wald weisen von Natur aus eine sehr große Zahl an Einflussvariablen auf. In den dargestellten Studien wurde bewusst darauf geachtet, die Praxisbedingungen nicht durch die Forschung zu verzerren. Somit handelte es sich um Fallstudien und nicht um experimentelle Studien. Um die Praxis möglichst treffend zu erfassen, wurden die mit den zahlreichen Einflussvariablen einhergehenden Unsicherheiten akzeptiert.

Bei detaillierten forstlichen Arbeitsstudien wird regelmäßig eine Einschätzung langfristig erzielbarer Leistungsniveaus vorgenommen. Für Harvestereinsätze wird in anderen Studien davon ausgegangen, dass die in Zeitstudien gemessene Leistung das 1,4- bis 1,6-Fache bzw. das 1,45- bis 1,65-Fache der langfristig erzielbaren Leistung beträgt [160][163]. Gründe sind neben der (unterbewusst) gesteigerten Motivation, für den Zeitnehmer eine gute Leistung zu präsentieren, auch die oft überdurchschnittlich gute Vorbereitung der Versuchsbestände (Auszeichnen) und die optimale Einweisung in die örtlichen Gegebenheiten und den Arbeitsauftrag. Auf eine solche Korrektur der Messwerte wurde für die hier beschriebenen Hackereinsätze bewusst verzichtet. Erstens fehlen entsprechende Langzeitwerte, aus denen sich belastbare Faktoren für den Einsatz von Großhackern im Wald ableiten lassen würden. Zweitens wurde bei den Studien größter

Wert darauf gelegt, keinen Einfluss auf die Durchführung der Arbeiten zu nehmen, sondern möglichst reale Bedingungen aufzunehmen. Da die Einsätze an Hackholzpoltern an der Forststraße stattfanden, war keine Einweisung der Maschinenführer gegeben, die über das übliche Maß hinausging. Die Versuchsvorbereitung durch das Forscherteam beschränkte sich auf das Vermessen der Polter (vor dem Einsatz) und die Entnahme einer Hackschnitzelprobe aus den Transportbehältern (nach Abschluss der Zeitstudie) und hatte keinen Einfluss auf den Arbeitsablauf.

Diskussion der Ergebnisse

Wie bereits aus den Ergebnissen der Expertenbefragung (Abschnitt 4.3.1) deutlich wurde, wird das Hacken im Wald zunehmend als professionelle Dienstleistung durchgeführt. Energierundholz als Hackholzsortiment hat aktuell sowohl im Staatswald als auch im Privatwald eine nennenswerte Bedeutung. Dies wird durch zwei mündliche Mitteilungen untermauert, denen zufolge die Aushaltung von Energierundholz in Bayern bereits länger praktiziert wird. Für den Staatswald wurden Nachhaltigkeitsaspekte und Qualitätsvorteile genannt [208], im Kleinprivatwald sind es vor allem die Anforderungen privater Hackschnitzelheizungen an die Hackschnitzelqualität, die für die Aushaltung von Energierundholz sprechen [210].

Der Zuschlag zur RAZ, um auf Maschinenarbeitsstunden zu schließen, lag über alle Studien bei 13,7 %. Umgekehrt bedeutet dies, dass Unterbrechungen bis 15 Minuten einen Anteil von 8,8 % an der MAS hatten. Andere Untersuchungen ermittelten einen Anteil von 9,8 % Unterbrechungen unter 15 Minuten Dauer an der PMH_{15} [186]. Der signifikante Unterschied zwischen dem Zuschlag für Waldrestholz (17,8 %) und Energierundholz (5,5 %) war vorrangig durch die Ablaufabschnitte „Verteilzeit mechanisch“ und „Fahren/Umsetzen“ bedingt. Die höheren mechanischen Verteilzeiten könnten auf eine höhere Maschinenbeanspruchung bei Waldrestholzeinsätzen hindeuten. Allerdings muss beachtet werden, dass auch diese Unterbrechungen jeweils unter 15 Minuten lagen und daher keinen großen Reparatureinsätzen entsprechen, sondern i. d. R. schnell vor Ort behoben werden konnten. Die höheren Fahr- und Umsetzzeiten lassen sich durch die geringeren Auflockerungsfaktoren bei Waldrestholzpoltern erklären, wodurch ein häufigeres Umsetzen notwendig sein kann.

Das Verhältnis des Umfangs der AZ zur RAZ ist ein wichtiges Maß für die Auslastung der betrachteten Maschinen. Die Auslastung der Hacker betrug über alle Studien 47 %, streute allerdings stark. Zudem wurden nicht bei allen Studien komplette Arbeitstage erfasst, was eine Voraussetzung für die Ableitung einer entsprechenden Kennzahl wäre. Betrachtet man diejenigen zehn Fälle, in denen ein kompletter Auftrag oder Arbeitstag begleitet wurde, beläuft sich die Auslastung auf 57 %, allerdings mit starker Streuung (Anteil der AZ an der GAZ: $43 \% \pm 23 \%$). Die Werte ergänzen dennoch bereits veröffentlichte Studien aus anderen Regionen. Im Mittelmeerraum wurde für den Einsatz von Großhackern an der Forststraße ein Anteil der Hackzeit an der GAZ von 51,4 % ermittelt [145]. Bei Hackereinsätzen in Italien, die jedoch an zentralen Hackplätzen und nicht an der Forststraße untersucht wurden, betrug die Auslastung 73,8 % [186]. Im Schwarzwald

wurden Anteile der Hackzeit an der GAZ von 56 bis 87 % beobachtet, was ebenfalls die breite Streuung belegt [174]. In einer früheren bayerischen Studie betrug die Hackzeit 55 % der GAZ [68]. Aus den veröffentlichten Werten geht auch der intensive Einfluss der Rahmenbedingungen auf die tagesweise betrachtete Produktivität mobiler Großhacker deutlich hervor.

Unter realen Bedingungen im Wald ist eine Steigerung dieser Auslastung nur bedingt möglich. In der Praxis spielt für die Produktivität von Hackereinsätzen eine entscheidende Rolle, welchen Umfang Wartezeiten des Hackers einnehmen, die durch den Wechsel von Transportbehältern verursacht werden. Wartezeiten können durch organisatorische Maßnahmen reduziert werden. Allerdings wird immer ein gewisser Zeitbedarf für Fahrzeugwechsel und Rangieren verbleiben. Da die beobachteten Logistikzyklen überwiegend als gut geplant und ausgeführt bewertet wurden, kann hieraus abgeleitet werden, dass Wartezeiten auf den Wechsel des Transportbehälters bei Containern bis 15 Minuten, bei Schubboden-Aufliegern bis 37 Minuten auch bei guter Organisation zu erwarten sind und akzeptiert werden können. Rechnerisch wäre zwar eine Reduktion dieser Werte durch den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge möglich. Dies würde jedoch auf der anderen Seite das Risiko erhöhter Standzeiten der Transportfahrzeuge bergen, die ebenfalls (vermeidbare) Kosten verursachen. In den Fällen, in denen deutlich längere Wartezeiten beobachtet wurden, wurde i. d. R. von Verkehrsstörungen und längeren Wartezeiten an der Abladestelle berichtet. Die Optimierung durch organisatorische Anpassungen beim Hacker- und Logistikdisponenten ist in diesen Fällen nur bedingt möglich. Eine ebenfalls denkbare Entkopplung von Hacken und Transport würde mit einem Mehraufwand bei der Hackschnitzelmanipulation einhergehen. Im Rahmen der hier beschriebenen Zeitstudien wurde eine solche Entkopplung nicht beobachtet.

Es wurde gezeigt, dass der Wechsel eines Schubbodens tendenziell länger dauert als der eines Containers. Da ein Schubboden-Auflieger am Hackort länger eingerichtet werden muss, war dieses Ergebnis zu erwarten. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass ein Schubboden ein deutlich höheres Ladevolumen hat und daher die Wechsel auch weniger oft anfallen. Bei einem mittleren Ladevolumen der beobachteten Container von 37 m³ und der Schubboden-Auflieger von 91 m³ ist bei den Containern 2,46-mal häufiger ein Wechsel notwendig. Betrachtet man das rechtlich zulässige Gesamtgewicht der beladenen Fahrzeuge mit Bezug auf die Schüttdichte waldfrischer Hackschnitzel (340 kg/Srm, vgl. Abschnitte 4.3.4.2 und 5.3.2.3), beträgt die mögliche Zuladung bei Containern rund 29 Srm und bei Schubboden-Aufliegern rund 69 Srm (Verhältnis: 2,38). Der Häufigkeit des Wechsels steht dessen Dauer gegenüber. Der Median der Schubboden-Wartezeiten beträgt das 1,57-Fache des Medians der Container-Wartezeiten. Setzt man die beiden Faktoren zueinander ins Verhältnis, ergibt sich für Container eine um 51,6 % längere Wartezeit je Zuladungseinheit. Bezieht man die Wartezeit also nicht auf den Transportbehälter selbst, sondern auf jeden Srm seiner möglichen Zuladung, schneidet der Schubboden-Auflieger besser ab als die Container. Auf den Schubboden-Auflieger wartet der Hacker rechnerisch 13 sec je zuladbarem Srm, bei Containern sind es 19 sec. Das bedeutet, dass bei örtlicher Eignung die Schubboden-Lkw durch die kürzere Wartezeit je m³ Ladevolumen (und auch nach Masse zuladbarer Srm) im Vorteil

sind. Allerdings sind die Anforderungen an den Aufstellplatz deutlich höher als bei Containern oder Anhängern.

Die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) wird stark vom Hackholz und von der Antriebsleistung des Hackers beeinflusst. Eine modellhafte Einschätzung erfolgt idealerweise getrennt für die Hackholzgruppen Waldrestholz und Energierundholz. Mit zunehmender Antriebsleistung steigt die TAP. Jedoch kann unter Praxisbedingungen im Wald dieser Effekt nicht grenzenlos ausgenutzt werden [174]. Der Einsatz schnellerer Hacker bedingt auch höhere Anforderungen an die Organisation und den Logistikeinsatz. Je leistungsstärker der Hacker, desto kürzer werden die Intervalle, in denen die Transportbehälter ausgetauscht werden müssen.

4.3.4.2 Fallstudien: Gekoppelte Verfahrensschritte Hacken und Logistik

In den sechs Fallstudien zur Zusammenarbeit des Hackers mit der Logistik wurden neun Direktlieferungen in Heiz(kraft)werke, sieben Lieferungen auf Hackschnitzellager und neun Nahtransporte durch ein Hackschnitzelshuttle untersucht. Einen Überblick über die eingesetzten Maschinen gibt Tabelle 25. Alle sechs Fallstudien wurden im Staatswald durchgeführt. Es wurden nur die kompletten Zyklen ausgewertet. Beobachtete Ablaufabschnitte, die nicht zu den abgeschlossenen Logistikzyklen zählen, z. B. weil der Lkw bei Arbeitsende nicht mehr zum Umladeplatz zurückgekommen ist, wurden zusätzlich registriert. Die parallel laufenden Zeitstudien „Hacken“ werden in Abschnitt 4.3.4.1 ausgewertet.

Tabelle 25: Überblick über die in den Logistikstudien eingesetzten Hacker und Transportfahrzeuge

Studie	Hacker	Lieferziel	Transportfahrzeuge			
			Container-Lkw solo	Container-Lkw Zug	Schubbo-den-Lkw	Container-Shuttle
A (24.06.2013)	Lkw-Aufbauhacker	Heizkraftwerk		2		
B (25.06.2013)	Lkw-Aufbauhacker	Heizkraftwerk		2		1
C (02.07.2013)	Lkw-Aufbauhacker	Heizkraftwerk		1	1	
D (18.07.2013)	Anhängerkar	Lager	2			
E (02.08.2013)	Lkw-Aufbauhacker	Lager	1		2	
F (22.08.2013)	Selbstfahrender Hacker	Heizkraftwerk		1	2	

Die beobachteten Fahrzeuge werden im Folgenden hinsichtlich ihrer typischen Logistikkabläufe beschrieben.

Container-Lkw

Bei vier der sechs Fallstudien transportierten Container-Lkw-Züge mit Anhängern und je zwei Containern die Hackschnitzel. Überwiegend wurden die Züge auf einem Umladeplatz getrennt und der Motorwagen solo am Hacker beladen, in einem Fall wurde der ganze Zug am Hacker befüllt. Bei zwei von sechs Studien waren nur Motorwagen mit einem Container solo (also ohne Anhänger) beteiligt. Alle Hackerstudien zusammengefasst ergeben, dass Container-Lkw zur Hackschnitzellogistik am häufigsten verwendet wurden (siehe auch Abschnitt 4.3.4.1). Zudem wurde über alle Studien betrachtet eine Tendenz zur (durch die geringe Wegebreite bedingten) heckseitigen Beladung festgestellt. Der Lkw kann nicht am Hacker vorbeifahren, der Anhänger wird daher an einem Umladeplatz abgekoppelt und der Motorwagen fährt solo zur Beladung am Hacker. Alle beteiligten Motorwagen waren mit Standard-Hakenlift-Einrichtungen ausgerüstet. Alle beobachteten Container waren Standard-Abrollcontainer für Schüttgut und blieben während der Befüllung i. d. R. auf dem Motorwagen. Die Hackschnitzel wurden üblicherweise heckseitig in den leicht gekippten Container eingeblasen (Abbildung 30A) oder mit einem Förderband (am Hacker) geladen. Das Beladen eines abgesetzten Containers oder (bei ausreichender Wegebreite) die seitliche Beladung (Abbildung 30B) wurde bei vorangegangenen Hackereinsätzen in einigen Fällen beobachtet.

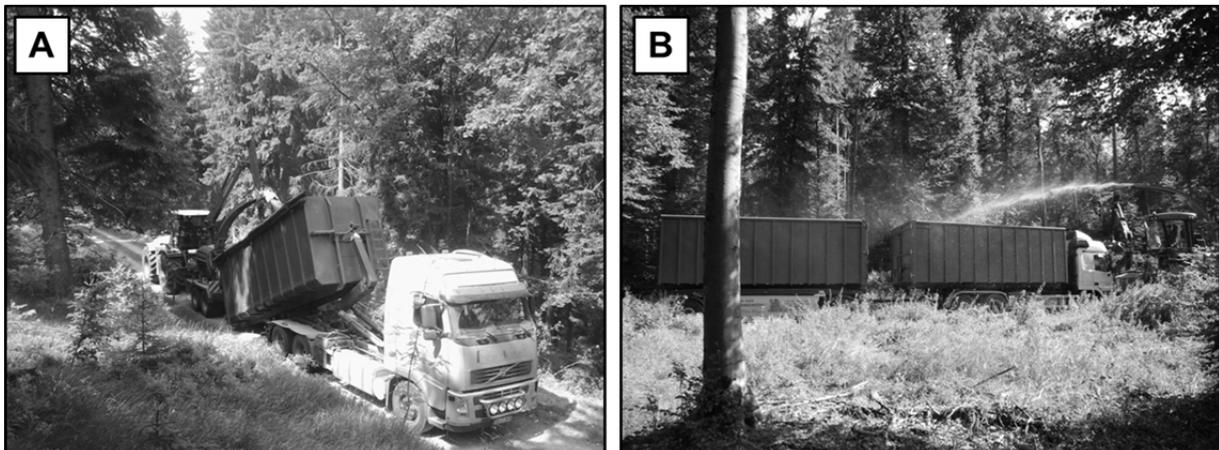


Abbildung 30: Standardaufstellung Hacker und Container-Lkw solo bei geringer Wegebreite (A) und seltenere Aufstellung zur Beladung eines Container-Lkw-Zuges (B).

Bei den verbreiteten Hakenlift-Systemen kann nur der Motorwagen einen Container abstellen bzw. vom Boden aufnehmen. Ein Container vom Anhänger muss heckseitig mit dem Motorwagen umgeladen werden, wobei der Anhänger abgekuppelt und gebremst ist.

Ein typischer Logistikzyklus im Werkslieferverkehr hat folgenden Ablauf (siehe auch Abbildung 31).

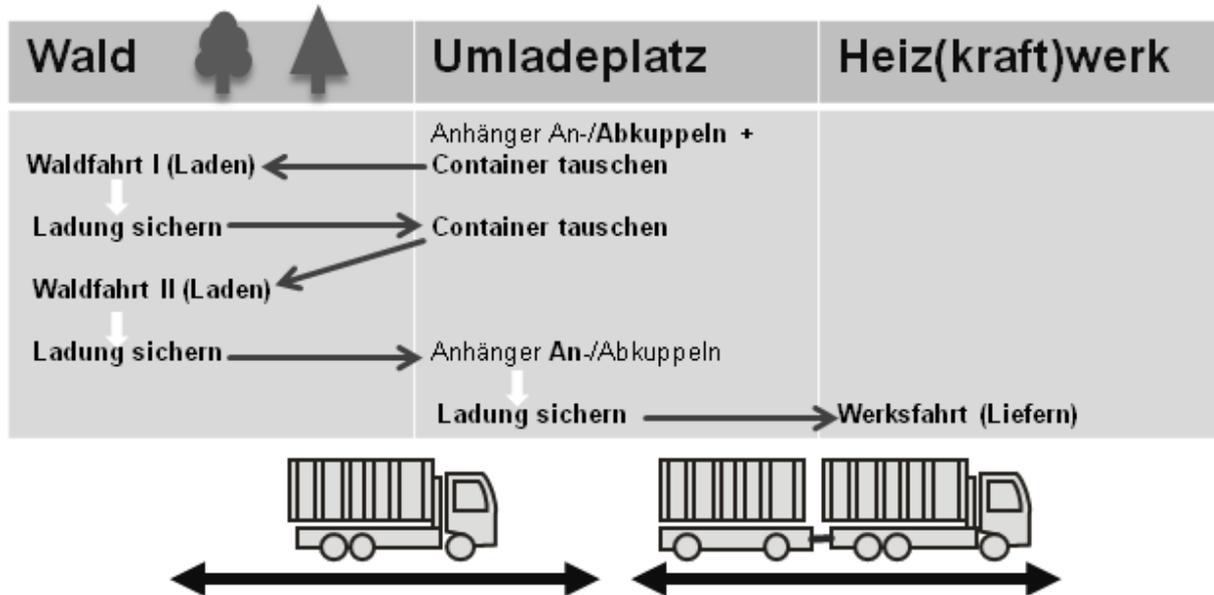


Abbildung 31: Typischer Logistik-Zyklus eines Lkw-Container-Zugs mit Umladeplatz (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet)

- Der Container-Lkw trifft mit Anhänger und zwei leeren Containern am Umladeplatz ein (Start).
- Der Anhänger wird abgekuppelt (erster Ablaufabschnitt „Anhängers an-/abkuppeln“).
- Der Container vom Motorwagen wird abgestellt, er fährt unbeladen heckseitig an den Anhänger und hebt den zweiten Container auf den Motorwagen (erster Ablaufabschnitt „Container tauschen“, Abbildung 30 links).
- Es folgt die erste „Waldfahrt“ zur Beladung am Hacker.
- Der Motorwagen kommt mit vollem Container zum Umladeplatz zurück, der Fahrer zieht die Hackschnitzel mit einem Rechen o. Ä. glatt und verspannt eine Plane über die Fracht (erster Ablaufabschnitt „Ladung sichern“, ggf. auch im Wald oder auf der Forststraße).
- Der volle Container wird heckseitig auf den abgestellten Anhänger geladen.
- Der Motorwagen nimmt den leeren Container auf (zweiter Ablaufabschnitt „Container tauschen“).
- Es folgt die zweite „Waldfahrt“.
- Der Motorwagen kommt mit vollem Container zum Umladeplatz zurück (Ladungssicherung wie beim ersten Ablaufabschnitt „Ladung sichern“) und der Anhänger wird angekuppelt (zweiter Ablaufabschnitt „Anhängers an-/abkuppeln“).

- Danach wird die Ladungssicherung nochmals überprüft, die Container verriegelt und eine Abfahrtkontrolle durchgeführt (dritter Ablaufabschnitt „Ladung sichern“).
- Mit Verlassen des Umladeplatzes beginnt der Ablaufabschnitt „Fahrt Werk“.
- Mit der Rückkehr zum Umladeplatz beginnt der nächste Logistikzyklus.

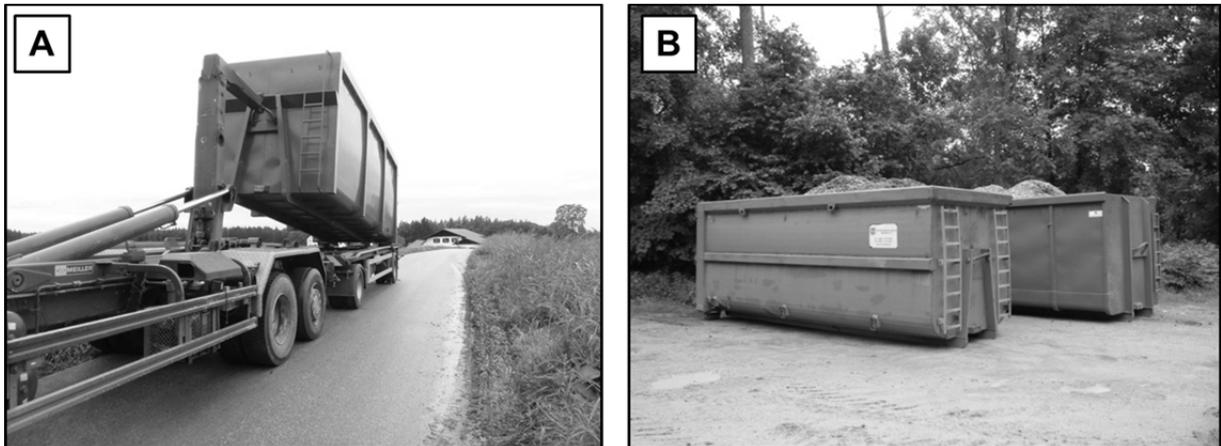


Abbildung 32: Umladen eines leeren Containers vom abgestellten Anhänger auf den Motorwagen (A) und befüllte Container am Umladeplatz (B)

Schubboden-Lkw

Bei den beobachteten Schubboden-Lkw handelte es sich um Schubboden-Auflieger auf Sattelschleppern. Zwei typische Aufstellungen am Hacker zeigt Abbildung 33. Seltener kommt eine Beladung von vorne über das Führerhaus zum Einsatz.



Abbildung 33: Aufstellung eines Schubboden-Lkw bei ausreichender Wegebreite parallel zum Hacker (A) und rückwärts am Hacker (B)

Die Schubboden-Lkw werden in der Regel beim Einsatz nicht getrennt, fahren folglich direkt zur Beladung am Hacker bzw. ins Heiz(kraft)werk. Einzig in Fallstudie E waren zwei Schubboden-Auflieger und eine Sattelzugmaschine im Einsatz, wobei ein Auflieger zeitweilig abgestellt wurde. Die typische Abfolge eines Logistikzyklus eines Schubboden-Lkw zeigt Abbildung 34.

Der Ablaufabschnitt „Ladung sichern“ kann, wenn er von dem/der Zeitnehmer/-in nicht direkt zu beobachten war, in der Zeit der Waldfahrt enthalten sein. Ebenfalls darin enthalten sind definitionsgemäß alle Nebenarbeiten wie z. B. das Öffnen des Verdecks und der heckseitigen Flügeltüren.

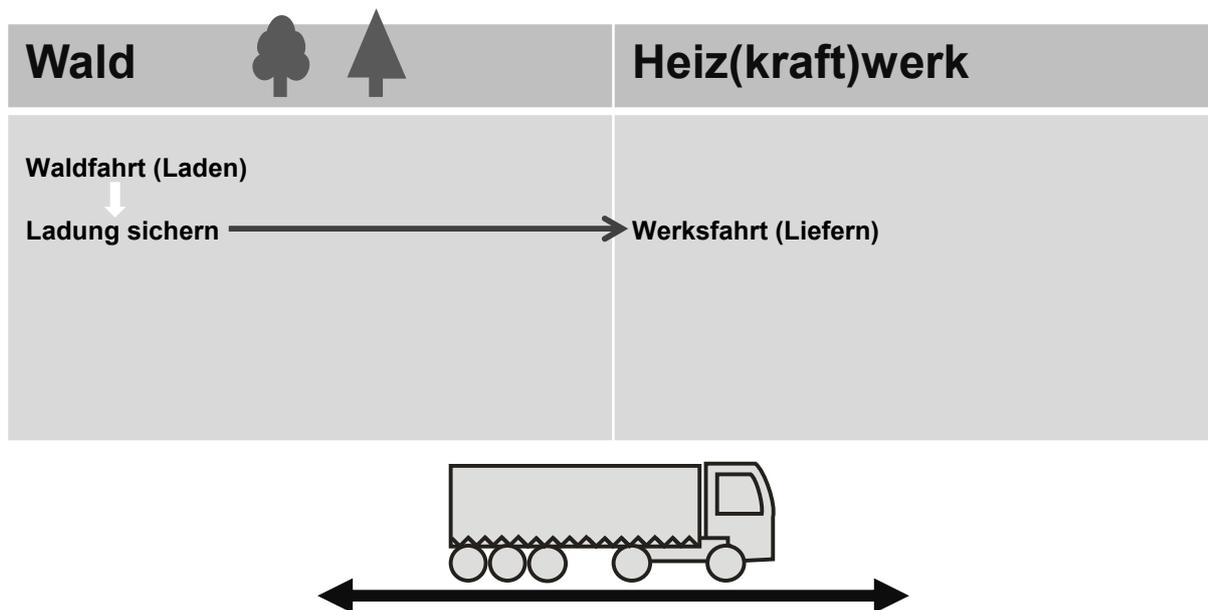


Abbildung 34: Typischer Logistik-Zyklus eines Schubboden-Lkw (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet)

Hackschnitzelshuttle

Nicht für den Ferntransport, sondern für den Pendeltransport vom Hacker zum Umladeplatz oder für Transportfahrten zu nahegelegenen Lagerorten bzw. Verbrauchsstellen werden bisweilen Shuttlefahrzeuge eingesetzt (Abbildung 35).

Bei der Fallstudie B konnte der Einsatz eines Shuttles (Traktor mit Hakenlift-Anhänger für Standardcontainer) beobachtet werden. Das Shuttlefahrzeug arbeitete im Pendelverkehr zwischen Umladeplatz und Hacker. Es war auch in der Lage, Container direkt auf abgestellte Lkw-Anhänger zu überladen. Das Shuttle wurde sehr flexibel eingesetzt und am Umladeplatz abgestellt, wenn ein Lkw im Wald beladen wurde. Abbildung 36 zeigt den typischen Logistikzyklus des Shuttles. Alternativ kann auch ein abgekoppelter Anhänger mit Container vom Shuttle beladen werden, was zur weiteren Flexibilisierung beiträgt.



Abbildung 35: Hackschnitzelshuttle im Einsatz bei der Aufnahme eines leeren Containers am Umladeplatz (A) und bei der Befüllung am Hacker (B)

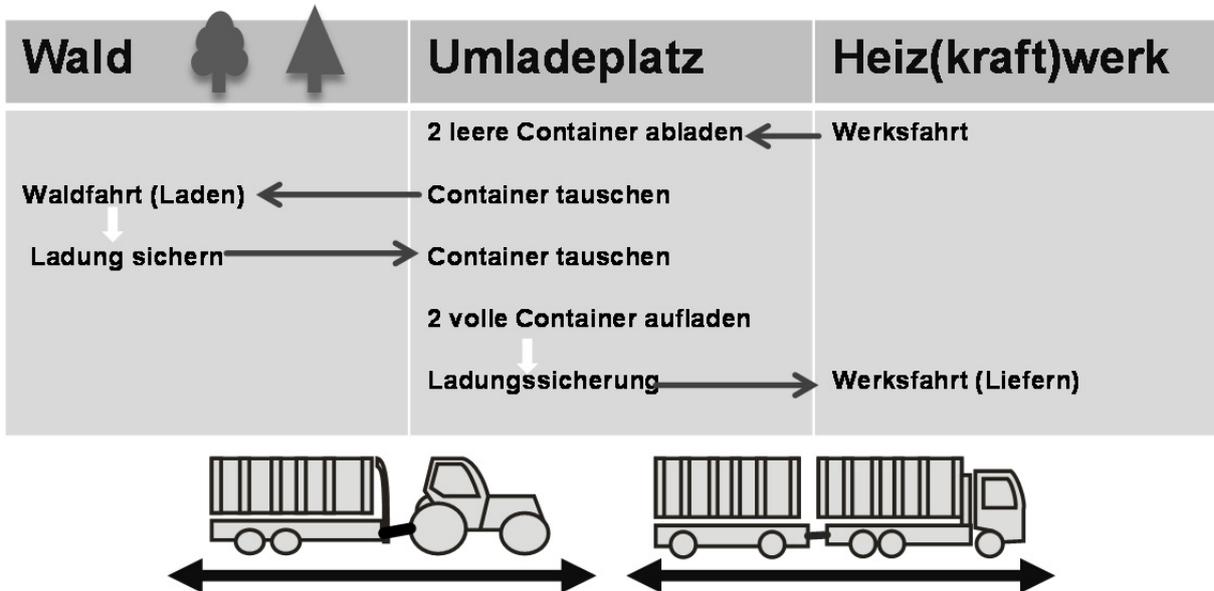


Abbildung 36: Typischer Logistik-Zyklus beim Einsatz eines Shuttle und eines Container-Lkw-Zugs (Piktogramme: KWF, teilweise bearbeitet)

Lieferwege

Über alle 38 Studientage (Hacker-Studien aus Abschnitt 4.3.4.1 und kombinierte Studien zu Hacken und Logistik) wurden die Lieferwege beschrieben. Im Staatswald wurden die Hackschnitzel in 26 von 31 Fällen direkt vom Hackplatz und meist auch am selben Tag ins Heiz(kraft)werk geliefert. Fünf Lieferungen gingen in ein Lager. Die aus KUP-Material produzierten Hackschnitzel wurden ebenfalls direkt zu einem Heizkraftwerk geliefert. Bei den Studien im Privatwald stellte sich die Situation etwas differenzierter dar. Vier der sechs Lieferungen gingen ebenfalls direkt zur Verbrauchsstelle, wobei in einem Fall eine Teilmenge weiterverkauft werden sollte. Eine Lieferung ging zur Mengenbündelung zum

Hackerbetrieb, eine andere Gesamtcharge wurde zu einer Biogasanlage zur technischen Trocknung gebracht.

Auftragsdisposition

Die begleiteten Logistikaufträge waren ausschließlich Lieferfahrten ohne Rückfrachten. Bei den Aufträgen der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. wird der Transport der Hackschnitzel in der Regel durch die beauftragten Hackerunternehmer selbst organisiert. Die Hackerunternehmen transportierten bei 22 Fallstudien in Eigenregie, in sechs Fällen wurde die Hackschnitzellogistik durch externe Spediteure geleistet. Bei drei Einsätzen wurden eigene Fahrzeuge durch Fremdspeditionen ergänzt. Im Privat- und Körperschaftswald wurde bei drei Studien Eigenlogistik und ebenfalls bei drei Fallstudien Fremdlogistik eingesetzt, wozu auch Transportfahrzeuge aus anderen Landwirtschaftsbetrieben zählten. In einem Fall wurden eigene Fahrzeuge durch Lohntransporteure ergänzt.

Einsatz und Auslastung der Transportfahrzeuge

Vorteilhaft an den Container-Lkw sind ihre weite Verbreitung und ihre vielseitige Einsetzbarkeit. Sie sind im Wald ausreichend wendig und stehen auch als Allradausführungen zur Verfügung. Nur in einem Fall (über sämtliche Studien) konnte die Spitzkehre eines Waldwegs von einem Containerzug nicht befahren werden, was aber durch einen Umweg zu lösen war. Bei zwei Fallstudien konnten die (in insgesamt sieben Studien eingesetzten) Schubboden-Lkw einen Teil der Hackholzpolter wegen zu enger Kurvenradien der Waldwege nicht anfahren. Der Hacker musste, je nachdem welches Transportfahrzeug bereitstand, zwischen unterschiedlich leicht erreichbaren Poltern umsetzen.

Nachteilig an den Container-Lkw ist das vergleichsweise hohe Leergewicht des Zugs (Motorwagen, Container und Anhänger). Aus fünf Wiegungen am Heizkraftwerk, wobei es sich um drei typische Container-Lkw, jeweils mit Hakenlifteinrichtung am Motorwagen, Anhänger ohne eigene Ladeeinrichtung und jeweils zwei Container handelte, wurde ein durchschnittliches Leergewicht von 20,13 t (19,5–20,98 t) errechnet. Für Lkw mit Allradantrieb muss ein entsprechendes Mehrgewicht angesetzt werden. Bei Ansatz des durchschnittlichen Leergewichts bleiben wegen des in Deutschland auf 40 t beschränkten zulässigen Gesamtgewichts rechnerisch im Mittel 19,87 t für die Fracht an Hackschnitzeln. Die mittlere Schüttdichte der waldfrischen Hackschnitzel in den Studien betrug 340 kg/Srm (Abschnitte 4.3.4.1 und 5.3.2.3). Somit kann die zulässige Zuladung eines Container-Lkw-Zugs an waldfrischen Hackschnitzeln (Volumenmaß in beiden Containern) mit rund 58 Srm veranschlagt werden. Die häufigsten Containervolumina werden somit nicht ausgelastet. Zudem lag der Wertebereich Schüttdichte bei 307 bis 394 kg/Srm, der Maximalwert weicht folglich um 51 kg/Srm (bzw. rund 15 %) vom Mittelwert ab. Es erfordert somit viel Erfahrung, damit der Zug nicht überladen wird, aber auch möglichst wenig Transportvolumen ungenutzt bleibt. Bei einem angenommenen geringeren Wassergehalt von 35 Ma.-% sinkt die Schüttdichte rechnerisch auf durchschnittlich 267 kg/Srm, was ein Transportvolumen an Hackschnitzeln von 74 Srm und damit die

nahezu optimale Auslastung des Transportvolumens eines Container-Lkw mit Anhängern erlauben würde. Eine entsprechende Absenkung des Wassergehalts durch Vortrocknung im ungehackten Zustand wurde bei einzelnen Studien beobachtet (Abschnitt 5.3.2.1). Allerdings erfordert eine effiziente Vortrocknung optimale Lagerbedingungen (luftiger und sonniger Lagerplatz außerhalb des Walds) und funktioniert tendenziell besser bei Energierundholz und grob entasteten Gipfeln als bei Waldrestholz mit hohem Grün- und Feinanteil. Außerdem können Waldschutz und naturschutzfachliche Gründe dem entgegenstehen.

Der bekannte und häufig diskutierte Vorteil der Schubboden-Lkw beim Transport von Hackschnitzeln liegt im geringen Leergewicht dieser Fahrzeuge, was eine höhere Zuladung erlaubt. Von Schubboden-Lkw liegen zwei Wiegungen des Leergewichts mit 16,22 und 16,56 t (im Mittel 16,39 t) vor. Somit steht im Mittel eine Zuladung von 23,61 t zur Verfügung. Nimmt man wie oben für Container-Lkw die Dichte waldfrischer Hackschnitzel mit 340 kg/m³ an, kann ein Schubboden-Lkw rund 69 Srm Hackschnitzel laden. Das sind gegenüber den vergleichbaren Container-Lkw 11 Srm oder 19 % mehr. Das maximale Volumen kann auch bei den Schubboden-Lkw mit waldfrischen Hackschnitzeln nicht voll ausgenutzt werden.

Berechnung vereinfachter Modellzyklen für Container-Lkw-Züge

Hierfür wurde aus drei Studien, in denen fünf Container-Lkw-Züge mit Anhänger eingesetzt worden waren, ein typischer Logistikzyklus hinsichtlich Vorkommens und Häufigkeit der jeweiligen Ablaufabschnitte ermittelt. Je Ablaufabschnitt wurde der mittlere Zeitbedarf berechnet. Die Ablaufabschnitte, die am Umladeplatz und im Wald stattfinden, können so in absoluten Werten relativ treffend beschrieben werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Mittlerer Zeitbedarf für die Ablaufabschnitte am Umladeplatz und im Wald für einen typischen Zyklus mit Container-Lkw-Zügen.

Ablaufabschnitt	Anzahl Beobachtungen	Mittlere Dauer [h:min:sec]	Häufigkeit in einem typischen Zyklus	Dauer gesamt je Zyklus [h:min:sec]
Anhänger an-/abkuppeln	14	00:02:53	2	00:05:46
Waldfahrt (Laden)	10	00:27:57	2	00:55:54
Container tauschen	15	00:04:43	2	00:09:26
Ladung sichern	5	00:06:30	3	00:19:30
GESAMT				01:30:36

In der Waldfahrt ist in diesen Werten die Befüllung des Containers am Hacker enthalten. Die reinen Fahrtanteile sind dem untergeordnet. Die Befülldauer und damit die Dauer der

Waldfahrt hängen von der Technischen Arbeitsproduktivität des Hackers ab. Die Auswertung von insgesamt 51 Containerbefüllungen mit einem mittleren Ladevolumen von 36,97 m³ ergibt eine mittlere Beladedauer von 26 min 58 sec (\pm 10 min 08 sec), die leicht unter der in den Logistikstudien ermittelten mittleren Waldfahrt von 27 min 57 sec liegt. Insgesamt ergibt sich eine Aufenthaltsdauer des Container-Lkw-Zugs auf dem Umladeplatz und im Wald (also von der Ankunft des leeren Lkw am Umladeplatz bis zur vollständig beladenen Abfahrt zum Werk) von 1 h 30 min 36 sec.

Die Werksfahrt kann je nach Entfernung und Art der befahrenen Straßen stark variieren und muss deshalb in Relation hierzu dargestellt werden. Für die modellhafte Berechnung der Fahrgeschwindigkeit bei der Werkslieferung wurde ein Durchschnittswert aus sieben Messungen des Ablaufabschnitts „Fahrt Werk“ berechnet. Es wurden nur störungsfreie Zyklen (keine Wartezeiten > 15 min) ausgewertet. Die Entfernungen betragen zwischen 31,2 und 92,6 km. Die Entladezeiten waren jeweils in den Fahrtzeiten enthalten. Die so berechnete effektive Geschwindigkeit bei den Werksfahrten betrug im Mittel 53,27 km/h. (\pm 9,92 km/h).

Als Richtwerte können auf dieser Grundlage die in Tabelle 27 dargestellten Zeiten für Container-Lkw-Züge (Container mit Nennvolumina von 35 bis 40 m³) gelten. Die Ruhezeiten wurden pauschal für einen 9-Stunden-Tag mit einer Zwangspause von 45 min nach 4,5 h aufgeschlagen (5 min je Stunde). Das bedeutet z. B., dass bei einer Lieferentfernung von 50 km ein Container-Lkw-Zug rund 3,5 h für einen kompletten Lieferzyklus benötigt.

Tabelle 27: Dauer eines kompletten Zyklus eines Container-Lkw-Zugs in Abhängigkeit von der Lieferentfernung (Entfernung vom Umladeplatz im Wald zum Bestimmungsort). Die pauschalen Zuschläge für Ruhezeiten betragen 5 min je Arbeitsstunde.

Schritt	Zeitbedarf			
	25 km	50 km	75 km	100 km
Umladeplatz/Wald (inkl. Rangieren, Containerwechsel, Beladen, Ladungssicherung)	1,50 h			
Werksfahrt (nach Lieferentfernung)	0,95 h	1,85 h	2,80 h	3,75 h
Zwischensumme	2,45 h	3,35 h	4,30 h	5,25 h
Zuschlag für vorgeschriebene Ruhezeiten	0,10 h	0,15 h	0,25 h	0,30 h
GESAMT	2,55 h	3,50 h	4,55 h	5,55 h

Diskussion der Methodik

Entsprechend der Zielstellung und den zur Verfügung stehenden Ressourcen wurde ein stark vereinfachtes Studiendesign gewählt. Die Gliederung in wenige Ablaufabschnitte

war für die Fallstudien ausreichend und zielführend. Das gesamte Kapitel stellt eine orientierende Studie dar, die nur die Ableitung einer vereinfachten Modellrechnung erlaubt.

Die Umladeplätze werden in der Regel erst vor Ort von den Fahrern gewählt. Daher war eine genauere Planung im Vorfeld nicht möglich. Beim Ablaufabschnitt „Fahrt Werk“ wurden bewusst die deutlich unterschiedlichen Entfernungen vom Hackort zum Werk gewählt. Diese sind auch aus den Erfahrungen der Arbeitsstudien „Hacken“ als praxistypisch anzusehen. Da die Entladezeiten von den eigentlichen Fahrtzeiten unabhängig und im Ablaufabschnitt „Fahrt Werk“ enthalten sind, ist die arithmetische Mittelwertbildung über deutlich unterschiedliche Distanzen bzw. die Berechnung einer mittleren effektiven Liefergeschwindigkeit der Werksfahrt sinnvoll. Für eine differenziertere Betrachtung (z. B. Entfernungsstufen, Straßenkategorien, Trennung Fahrt- und Abladezeiten) wären detailliertere Erhebungen nötig gewesen. Zur exakten Messung müsste dann entweder jeweils ein/e Zeitnehmer/-in in den Transportfahrzeugen mitfahren oder entsprechende Technik zur automatisierten Datenerfassung eingesetzt werden (z. B. [103]).

Diskussion der Ergebnisse

In den Fallstudien zur Kopplung der Verfahrensschritte Hacken und Logistik wurden auch die aus der gesamten Prozessanalyse als am relevantesten für die Praxis identifizierten Transportfahrzeuge Container-Lkw und Schubboden-Lkw betrachtet. Am häufigsten kommen Container-Lkw-Züge zum Einsatz. Die Vorgehensweise, den Anhänger an einem Umladeplatz abzustellen und die Container per Motorwagen solo zum Hackort zu bringen, kann als Standard angesehen werden. Seltener ist der Transport der Container mit einem Shuttle (landwirtschaftlicher Schlepper mit Hakenlift-Anhänger). Diese Variante kann gerade bei schlechter Wegeausstattung interessant werden.

In der Hackschnitzellogistik werden i. d. R. keine Rückfrachten gefahren. Im Gegensatz zu z. B. Industrieprodukten müssen hier die Kosten der Leerfahrt zum Hackort auf die Hackschnitzel umgelegt werden. Diese Belastung ist bei kurzen Lieferdistanzen noch akzeptabel, steigt aber mit zunehmender Entfernung erheblich an. Ein Rückfrachtmodell wie für Rundholztransporte vorgeschlagen [183] ist bei den bei Waldhackschnitzeln üblichen Liefermengen je Abnehmer nicht anwendbar. Rückfrachten mit anderen Produkten würden einen sehr hohen Koordinationsaufwand erfordern. Grundsätzlich sollte beim Handel mit Waldhackschnitzeln auf eine möglichst geringe Transportdistanz Wert gelegt werden.

Die Modellrechnung für Container-Lkw-Züge bei Solo-Waldfahrten zur Beladung ergibt eine mittlere Aufenthaltsdauer des Lkw am Umladeplatz und im Wald von 1,5 h. Die reine Beladezeit der Container beläuft sich auf jeweils 0,45 h (gesamt: 0,9 h). Bei 50 km Lieferdistanz beläuft sich ein kompletter Zyklus auf 3,5 h. Eine ähnliche Untersuchung gibt für einen kompletten Zyklus bei 54 km Lieferdistanz 4,8 h Dauer an [103]. Darin enthalten sind 1,2 h Beladezeiten im Wald, wobei hier der Lkw neben dem Hacker stehen konnte und somit keine Rangierzeiten am Umladeplatz notwendig waren. Die Differenz von 0,3 h bei der Beladezeit ist daher plausibel. Bei den Werksfahrten ergeben sich starke Differenzen. Dies verdeutlicht, dass die Rahmenbedingungen (Straßenkategorie, Ver-

kehrslage, Verzögerungen beim Abladen) erheblichen Einfluss auf die Dauer der Werksfahrt haben und Aussagen zur mittleren Transportgeschwindigkeit nur als Richtwerte verwendet werden können.

Beim Transport waldfrischer Hackschnitzel besteht die Gefahr des Überladens, andererseits ist eine Unterauslastung der Transportkapazität unerwünscht. Hier ist die Erfahrung des Maschinenführers sehr wichtig, da im Wald in der Regel keine Kontrolle des Gesamtgewichts möglich ist. Schubboden-Lkw haben ein deutlich geringeres Leergewicht (rund 16,4 t) als Container-Lkw-Züge (rund 20,1 t) und ein höheres Nennvolumen, können daher mehr Hackschnitzel je Fuhre transportieren. Allerdings sind sie schwieriger zu rangieren. Gerade bei der häufig geringen Wegebreite im Wald und engen Kurvenradien sind hier Container-Lkw im Vorteil. Einen deutlichen Einfluss auf die Schüttdichte der Hackschnitzel hat der Wassergehalt. Eine Vortrocknung des Hackholzes kann die Zuladung von mehr Schüttraummetern möglich machen. Allerdings kann hieraus keine allgemeine Empfehlung abgeleitet werden, da im Wald oft die notwendigen Voraussetzungen für eine sinnvolle Vortrocknung (Sonne, Wind) fehlen. Zudem können Hackholzpolter schnell von Kleinsäugern und Vögeln besiedelt werden. Wichtig ist zudem, welche Lieferqualitäten vom Produzenten angeboten bzw. vom Abnehmer gefordert werden. Aus den Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. wurde z. B. berichtet, dass durch Verzögerungen beim Hacken von Hackholz mit hohem Grünanteil aus der Vollbaumbringung im Gebirge starke Qualitätsverluste eintreten und hier auch die Abnehmer Wert auf waldfrische Ware legen [208]. Die Empfehlung muss daher lauten, situationsangepasst und vorschriftengerecht zu laden und die sich ergebende notwendige Transportleistung auch entsprechend zu entlohnen.

4.3.4.3 Fallstudie Sailershausen: Erstdurchforstung und Feinerschließung mit Harvester und nachgerüsteter Sammeleinheit

Die Fallstudie Sailershausen begleitete die Maßnahme von der Holzernte über die Rückung bis zur Erzeugung der Hackschnitzel.

Bestandsdaten

Bei dem Versuchsbestand handelt es sich um einen ca. 20-jährigen Fichtenbestand mit nennenswerten Anteilen an Douglasie, Birke und Buche. Der Bestand befand sich in einem für das eingesetzte Verfahren typischen Ausgangszustand. Weitere Bestandsdaten liefert Tabelle 28.

Die Baumartenzusammensetzung im ausscheidenden Bestand zeigte nur geringe Abweichungen vom gesamten Ausgangsbestand (Fi 66 %, Dgl 10 %, Kie 11 %, Bu/HBu 3 %, Bir 9 %, SLbH 2 %). Die Grundfläche im Ausgangsbestand beträgt 30,85 m²/ha. Für einen im Mittel 20-jährigen fichtendominierten Bestand auf wüchsigem Standort liegt dieser Wert deutlich über den Werten der in Nordbayern häufig verwendeten Ertragstafel von GERHARDT (1921). Die Durchmesserverteilung nach Stammzahl ist in Tabelle 29

dargestellt. Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hat einen BHD von 10,02 cm. Der mittlere BHD des ausscheidenden Bestands beträgt 9,22 cm.

Tabelle 28: Bestandsdaten Fallstudie Sailershausen

Waldort	Universitätsforstamt Sailershausen
Nutzungsart	Jungdurchforstung
Fläche	5,9 Hektar
Alter	17–22/20 Jahre
Standort	Überwiegend frische bis sehr frische Feinlehme, teils als Schichtfeinlehm über Ton, daneben mäßig frische bis frische schluffig-lehmige Sande und sandige Lehme
Baumarten	Fi 63 %, Dgl 11 %, Kie 11 %; Bir 8 %, Bu/HBu 5 %, SLbH 3 %
Entstehung	Wiebke-Schadfläche: Fi gepflanzt, LbH angefliegen, Fehlstellen in Folge mit Dgl nachgebessert. Letzte Maßnahme: Jungwuchspflege (Anlage von Pflegepfaden und systematische, schwache Negativauslese)

Tabelle 29: Durchmesserverteilung nach Stammzahl im Ausgangsbestand und im ausscheidenden Bestand

BHD-Klasse	Anteile Ausgangsbestand	Anteile ausscheidender Bestand
5 (bis 7 cm)	50 %	44 %
10 (8–12 cm)	30 %	32 %
15 (13–17 cm)	15 %	19 %
20 (18–22 cm)	5 %	5 %
25 (ab 23 cm)	1 %	1 %

Verfahrenskette, eingesetzte Maschinen und Arbeitsauftrag

Die geplante Maßnahme umfasste die Anlage der Feinerschließung (parallele Rückegassen, Abstand 30 m) sowie die Förderung positiv markierter Zukunftsbäume (Z-Bäume) auf den Zwischenfeldern. Pro Z-Baum wurden ein bis zwei Bedränger zur Entnahme ausgezeichnet. Vereinzelt wurden auch stark vorwüchsige Bäume (sogenannte Protzen) zur Entnahme vorgesehen und sehr dichte Trupps ohne die Auswahl eines Z-Baums aufgelichtet. Wie aufgrund der Bestandsdichte und der limitierenden Kranreichweite (Herstellerangabe: 11 m) zu erwarten war, wurden die Zwischenfelder nicht komplett durch den Harvester bearbeitet. Zusätzlich zu den ausgezeichneten Bäumen wurden je nach Bedarf Krantrassen und Ablageplätze für Rauhbeigen freigeschnitten.

Tabelle 30: Ausgehaltene Sortimente nach Baumarten

Baumart	Sortimente
Fichte	Sägeholz, Palettenholz, Papierholz, Hackholz
Douglasie	Palettenholz, Industrieholz, Hackholz
Kiefer	Sägeholz, Palettenholz, Hackholz
Laubholz	Brennholz lang, Industrieholz, Hackholz



Abbildung 37: Der eingesetzte Raupenharvester Neuson Ecotec 132 HVT (A). Oberhalb der Entastungsmesser des Logmax-5000D-Harvester-Kopfs ist die nachgerüstete Sammeleinheit zu erkennen (B, markiert mit Pfeil).

Die **Holzernte** wurde mit einem Raupenharvester des Herstellers Neuson Ecotec, Modell 132 HVT mit Softtrack-Laufwerken, durchgeführt (Abbildung 37). Das Aggregat war ein Logmax 5000D mit nachgerüsteter Sammeleinheit. Die ausgehaltenen Sortimente nach Baumarten sind in Tabelle 30 dargestellt. Das aufgearbeitete Holz wurde sortimentsweise getrennt entlang der Rückegasse auf Rauhbeigen abgelegt.

Die vom Harvester nicht erreichten ausgezeichneten Bäume auf den Zwischenfeldern sollten im Nachgang motormanuell durch Forstunternehmer gefällt werden. Aufgrund des geringen Massenfalls sollten sie nicht gerückt, sondern an Ort und Stelle belassen werden. Dieser nachgelagerte Arbeitseinsatz ist nicht Gegenstand der Studie. Durch die Möglichkeit der Entastung und Sortimentierung konnte eine Reisigmatte angelegt werden. Im Anschluss an die Rückung wurden keine erheblichen Bodenschäden, sondern lediglich elastische Verformungen und vereinzelt plastische Verformungen ohne randliche Aufwölbungen beobachtet.

Die **Rückung** wurde mit einem Forwarder Modell Timberjack 1010B durchgeführt. Das Hackholz wurde sortimentsrein gerückt. Die Sortimente zur stofflichen Verwendung wurden aufgrund des relativ geringen Mengenfalls (vor allem auf den kürzeren Rückegassen Nr. 1–7) gemischt gerückt. Einzig das häufigste stoffliche Sortiment Papierholz

Fichte 3,00 m ergab teils mehrere sortenreine Ladungen pro Rückegasse. Das angefallene Holz wurde komplett an der nordöstlichen Bestandsseite entlang der Forststraße gepoltet. Das Hackholz wurde in zwei großen Poltern jeweils an den Abzweigungen im Nordwesten und im Nordosten des Bestands zusammengefasst.

Das **Hacken** erfolgte mit einem Heizohack HM 8 400 K, einem zapfwellengetriebenen Anhängerhacker an einem Traktor des Herstellers Deutz-Fahr, Modell Agrottron K 110. Der Abtransport der Hackschnitzel wurde mit landwirtschaftlichen Anhängern (17 bzw. 16 Srm Fassungsvermögen) an zwei landwirtschaftlichen Traktoren durchgeführt.

Modellierung der Bestandsbiomasse

Zur Modellierung der Bestandsbiomasse in SILVA wurden für die Baumart Fichte Probefällungen mit Vermessung der gefällten Bäume durchgeführt. Die Gewichtung zwischen den BHD-Klassen wurde entsprechend der bei der Flächenvorbereitung erhobenen Durchmesser-Verteilung festgelegt. Der Schwerpunkt lag in der BHD-Klasse 10 (8–12 cm BHD).

Da die Fichte dominiert, wurden für die Baumarten Douglasie, Kiefer, Birke und Buche/Hainbuche keine Probefällungen vorgenommen, sondern aus jeweils 20 Höhenmessungen entsprechende Höhenkurven nach der Funktion von MICHALOFF (entnommen aus [182]) abgeleitet. Die erhobenen Werte für die Mischbaumarten wurden in SILVA als Mischbestand modelliert. Die modellierten Kompartimente und die entsprechenden Massen sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Zusammenstellung der Ergebnisse der Biomassemodellierung nach Baumarten und Kompartimenten im Gesamtbestand. Durch den geringen Umfang und die hohen Anteile an Verjüngung mit BHDs unter 7 cm sind die modellierten Werte für Laubholz nur als Orientierungswerte zu sehen.

Baumart	Biomasse [t atro/ha] und [%] innerhalb der Baumart						Biomasse Gesamt [t _{atro} /ha]
	Derbholz mit Rinde		Äste und Reisig		Blätter/Nadeln		
Fichte	39,9	60 %	18,4	28 %	7,8	12 %	66,1
Douglasie	6,5	74 %	1,6	18 %	0,8	9 %	8,6
Kiefer	6,3	84 %	0,6	8 %	0,6	9 %	7,5
Laubholz	17,7	77 %	4,8	21 %	0,4	2 %	22,9
SUMME	70,4	67 %	25,3	24 %	9,6	9 %	105,4

Aus den Messungen im Bestand und der beschriebenen Modellierung ergibt sich ein Gesamtvorrat von 167 Vfm Derbholz/ha (Tabelle 32).

Tabelle 32: Vorratswerte im Ausgangsbestand nach Baumarten

Baumart	G [m ² /ha]	Rohdichte [t _{atro} /Fm]	Biomasse Derbholz [t _{atro} /ha]	Derbholz rechnerisch [Vfm/ha]
Fichte	19,33	0,379	39,930	105
Douglasie	3,39	0,414	6,523	16
Kiefer	3,35	0,432	6,309	15
Laubholz	4,78	0,567	17,679	31
SUMME	30,85		70,44	167

Holzanfall

Aus dem Rücklauf der Werkseingangsvermessung sowie den Hackerprotokollen ergeben sich die in Tabelle 33 dargestellten Holzmengen.

Tabelle 33: Sortimentsanfall nach Werksmaß und Hackerprotokoll

Sortiment	Messung	Volumen	Einheit Messung	Fm m. R. gerundet
Sägeholz Fi	Werkseingang	3,77	Fm m. R.	4
Sägeholz Dgl	Werkseingang	4,04	Fm m. R.	4
Palettenholz	Werkseingang	17,26	Fm m. R.	17
Papierholz	Werkseingang	70,99	Fm m. R.	71
Industrieholz	Werkseingang	34,15	Fm m. R.	34
Brennholz lang	Waldmaß	20,41	Fm m. R.	20
Hackholz	Hackerprotokoll	365	Srm	146
SUMME				297

Die Eingriffsstärke wird forstlich üblicherweise in Erntefestmeter Derbholz je Hektar angegeben. Da das Sortiment Hackholz nur im weiterverarbeiteten, also gehackten Zustand gemessen werden konnte, wurde es mithilfe der Biomassefunktionen aus SILVA in Derbholz und Nichtderbholz aufgeteilt. Die Ergebnisse der Biomassemodellierung wurden dazu nach Baumkompartiment getrennt mit den Ergebnissen der Bestandsvermessung und dem Sortimentsanfall verschnitten. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die nicht genutzte Biomasse der als ausscheidend vorgesehenen Bäume komplett aus Nichtderbholz bestand. Es ergibt sich eine Eingriffsstärke von 39 Efm Derbholz je Hektar. Zusätzlich fielen rund 26 Srm/ha Hackschnitzel aus Nichtderbholz an. Insgesamt entspricht dies einem rechnerischen Anfall von rund 50 Efm/ha. Der Hackholzanteil am Derbholz beträgt 35 %. Der Auftrieb der Rückegassen machte den überwiegenden Teil des Massenfalls aus.

Näherungsweise Quantifizierung des Nährstoffentzugs

Insgesamt waren rund 20 % der oberirdischen Biomasse zur Entnahme vorgesehen (Summe der Biomasse der zur Entnahme vorgesehenen Gassenbäume und Bedränger). Beim Derbholz sind dies 14,1 t_{atro}/ha (20 % von einer gesamten Derbholz-Biomasse von 70,4 t_{atro}/ha, vgl. Tabelle 31). Diese wurden komplett genutzt und dem Bestand entzogen. Das Nichtderbholz wurde nicht vollständig entnommen. Rückgerechnet aus der gesamten entnommenen Holzmenge ergibt sich, dass 11 % des Nichtderbholzes im gesamten Bestand entnommen wurden. Das entspricht 3,9 t_{atro}/ha. Somit wurden durch die eingesetzte Technik bei Aufarbeitung und Entastung 45 % des Nichtderbholzes der gefällten Bäume im Bestand belassen.

Bezogen auf die Trockenmasse haben die Kompartimente Blätter/Nadeln und Äste/Reisig einen deutlich höheren Nährstoffgehalt als das Derbholz. Um den Nährstoffaustrag der durchgeführten Ernte näherungsweise zu quantifizieren, wurde für die Gehalte an Stickstoff (N), Phosphor (P), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) auf Literaturdaten zurückgegriffen [110]. Zudem wurde der Bestand als reiner Fichtenbestand angesehen. Dazu wurde der modellierte Fichtenanteil (62,7 % der Grundfläche, vgl. Tabelle 31 und Tabelle 32) auf eine Grundfläche von 30,85 m²/ha hochgerechnet. Aus den Literaturdaten wurde das Verhältnis von oberirdischer zu unterirdischer Biomasse ermittelt. Hieraus konnte von der modellierten Bestandsbiomasse auf die unterirdische Biomasse geschlossen werden (Tabelle 34).

Tabelle 34: Gesamte oberirdische und unterirdische Biomasse in einem modellierten Fichtenreinbestand und Aufteilung auf Baumteile. Die Werte für die oberirdische Biomasse sind aus der SILVA-Modellierung des Versuchsbestands hochgerechnet. Die Werte für die unterirdische Biomasse sind aus Literaturdaten zum Verhältnis oberirdischer zu unterirdischer Biomasse berechnet [110].

Oberirdische Biomasse [t_{atro}/ha]		Unterirdische Biomasse [t_{atro}/ha]	
Derbholz (inkl. Rinde)	63,68	Grobwurzeln (> 2 mm Ø)	21,49
Nichtderbholz (inkl. Feinreisig und Nadeln)	41,81	Feinwurzeln (< 2 mm Ø)	1,17
Gesamt	105,49	Gesamt	22,66
SUMME	128,15 t_{atro}/ha		

Aus den Anteilen der Nährstoffe in den Baumkompartimenten ergibt sich, dass durch die Ernte rund 10 % des in der gesamten ober- und unterirdischen Biomasse enthaltenen N entnommen wurden. Bei P sind es 10,7 %, bei K 11,5 %, bei Ca 12,5 % und bei Mg 11,7 % (Tabelle 35).

Tabelle 35: Entnahme der Elemente N, P, K, Ca und Mg anteilig an der in der oberirdischen Biomasse bzw. in der ober- und unterirdischen Biomasse enthaltenen Mengen in einem modellierten Fichtenbestand

Element	Entnahme anteilig an oberirdischer Biomasse [%]	Entnahme anteilig an ober- und unterirdischer Biomasse [%]
N	13,2	10,0
P	13,4	10,7
K	13,8	11,5
Ca	14,5	12,5
Mg	14,5	11,7

Absolut lag die entnommene Derbholzmenge beim 2,8-Fachen der entnommenen Nichtderbholzmenge, die Nährstoffentnahme bei den Elementen N, P und K durch Derbholz dennoch niedriger als durch Nichtderbholz. Bei den Elementen Ca und Mg war die Entnahme durch das Derbholz höher (Tabelle 36). Dies veranschaulicht, in welchen Kompartimenten die Nährstoffe stärker und in welchen weniger stark konzentriert vorliegen.

Tabelle 36: Absolute Menge entnommener Nährstoffe, aufgeteilt in Derbholz und Nichtderbholz, bei Entnahme von 12,7 t_{atro}/ha Derbholz und 4,6 t_{atro}/ha Nichtderbholz in einem modellierten Fichtenbestand

Element	Derbholz [kg/ha]	Nichtderbholz [kg/ha]	SUMME [kg/ha]
N	15,54	26,38	41,92
P	1,91	2,89	4,81
K	9,81	11,66	21,47
Ca	17,96	15,77	33,73
Mg	2,29	1,99	4,28

Zeitstudie Holzernte

Auf acht der zehn Probeflächen wurden auswertbare Datensätze gewonnen. Die so erfasste Fläche beträgt 0,72 Hektar oder 12,2 % der gesamten Hiebsfläche. Insgesamt wurden 427 Erntezyklen ausgewertet. Davon konnte in 103 Fällen der BHD nicht erfasst werden. Dies waren entweder nicht markierte oder unplanmäßig gefällte Bäume oder die Markierungen waren bei der Zeitaufnahme nicht erkennbar. 325 Zyklen sind eindeutig einem BHD zuzuordnen. Davon waren 212 Einzelbaumzyklen und 113 Bündelzyklen. Einzelbaumzyklen kamen über alle BHD-Klassen vor (Tabelle 37).

Tabelle 37: Übersicht Einzelbaumzyklen nach BHD-Klasse und Zeitbedarf (Reine Arbeitszeit)

BHD-Klasse	Anzahl Einzelbaumzyklen	Zeit gesamt	Zeit Durchschnitt
5 (bis 7 cm)	32	00:12:13	00:00:23
10 (8–12 cm)	68	00:50:15	00:00:44
15 (13–17 cm)	87	01:11:48	00:00:50
20 (18–22 cm)	23	00:20:06	00:00:52
25 (ab 23 cm)	1	00:00:50	00:00:50
SUMME	211	02:35:12	00:00:44

Bündelzyklen kamen bis BHD-Klasse 15 (13–17 cm) vor (Tabelle 38). Insgesamt wurden in 113 Bündelzyklen 381 Bäume gefällt. Dies entspricht einer mittleren Anzahl an 3,37 Bäumen je Zyklus. Je Baum ergibt sich daraus ein Zeitbedarf von 15 sec in BHD-Klasse 5 und von 18 sec in BHD-Klasse 10. Im Vergleich dazu werden bei einzelbaumweisem Fällen in BHD-Klasse 5 23 sec und in BHD-Klasse 10 44 sec benötigt. Ab BHD-Klasse 15 kann die Sammeleinheit durch die steigende Stückmasse nicht mehr effektiv eingesetzt werden (und wurde es in der Erntemaßnahme auch kaum).

Tabelle 38: Übersicht Bündelzyklen nach BHD-Klasse

BHD-Klasse	Anzahl Bündelzyklen	Zeit Gesamt [h:min:sec]	Zeit Durchschnitt [h:min:sec]	Anzahl Bäume gesamt	Anzahl Bäume Durchschnitt	Zeit je Baum Durchschnitt [sec]
5 (bis 7 cm)	79	01:09:26	00:00:53	273	3,46	15,3
10 (8–12 cm)	31	00:31:48	00:01:02	104	3,35	18,5
SUMME	113	01:44:35	00:00:56	381	3,37	16,6

Insgesamt wurde bei der Holzernte eine Technische Arbeitsproduktivität von 5,7 Fm/h (MAS) gemessen. Da bei Zeitstudien i. d. R. ein höheres Leistungsniveau aufgenommen wird als langfristig erzielbar, wird eine entsprechende Korrektur vorgenommen. Dabei wurde für den Harvestereinsatz eine Zeitstudien-Leistung vom 1,4-Fachen des langfristigen Niveaus angesetzt [160]. Die erwartete langfristige TAP beträgt demnach 4,1 Fm/h (MAS). Bei der getrennten Auswertung der Fällung von Bäumen nach BHD-Klassen ergeben sich die in Abbildung 38 dargestellten Leistungszahlen. Die Abbildung zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Stückmasse und Produktivität.

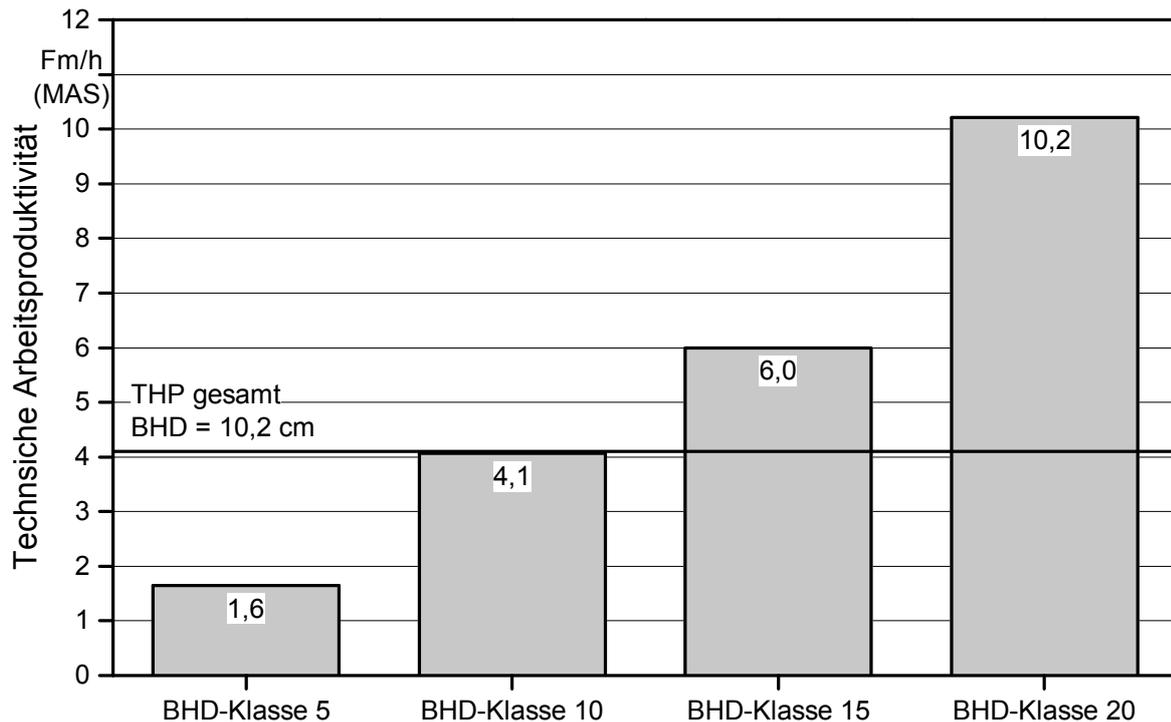


Abbildung 38: Leistung des Harvesters nach BHD-Klassen. Das Nichtderbholz wurde zusätzlich zum Derbholz als Hackschnitzel bereitgestellt. Die Darstellung in Fm erfolgt für das Hackholz rechnerisch mit Faktor $1 \text{ Fm} \triangleq 2,5 \text{ Srm}$. Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hatte einen BHD von 10,02 cm.

Zeitstudie Rückung

Die Zeitstudie zur Rückung wurde auf drei Rückegassen durchgeführt. Es wurden 574 lfm Rückegasse erfasst, insgesamt sind im Bestand 1845 lfm angelegt. Die Stichprobe umfasst damit 31% der Rückegassenlänge. Die aufgenommenen Zeiten beliefen sich auf 8 h 19 min 33 sec (Gesamte Arbeitszeit) und waren vollständig auswertbar. Zwei Fehlbuchungen (Eingabe Sortiment) wurden dokumentiert und nachträglich in der Datenbank korrigiert. Bei einer Gasse wurde die Arbeit am Abend unterbrochen, als am nächsten Morgen die Zeitstudie fortgesetzt werden sollte, stellte sich heraus, dass am Abend noch der Tankwagen die Maschine im Wald betankt hatte. Die Betankzeit wäre eigentlich eine Verteilzeit, konnte somit jedoch in der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Geht man von einer mittleren Fahrtstrecke auf der Rückegasse von der halben Gassenlänge aus, lässt sich eine mittlere Rückeentfernung über alle Sortimente innerhalb der Stichprobe von 195 m je Vollfahrt ableiten (Tabelle 39). Die Rückeentfernung für die meisten stofflichen Sortimente war deutlich geringer als für das Hackholz, da die entsprechend großen Hackholzpolter aus Platzgründen an den Verzweigungen der Forststraßen platziert werden mussten. Beim Sägeholz fiel die Rückeentfernung deshalb so groß aus, weil aufgrund des geringen Massenarfs alle Stammabschnitte auf dasselbe Polter gebracht wurden.

Tabelle 39: Mittlere Rückeentfernung nach Sortimenten

Sortiment	Mittlere Rückeentfernung [m]
Sägeholz	362
Palettenholz	150
Papierholz	146
Industrieholz	142
Brennholz lang	138
Hackholz	220
MITTEL	195

Insgesamt wurden 22 Rückezyklen erfasst, davon elf mit reinem Hackholz, sechs mit gemischten stofflichen Sortimenten, drei mit reinem Papierholz und je einer mit reiner Palettenware und Industrieholz. Aufgrund der geringen Anzahl der sortenreinen stofflichen Zyklen wurden diese zusammengefasst und als elf Zyklen mit stofflichen Sortimenten ausgewertet.

Die gemessenen Verteilzeiten wurden nach Ursache den Sortimentszyklen gewichtet zugeteilt. Organisatorische und mechanische Verteilzeiten des Gesamthiebs beliefen sich auf insgesamt 12 min 34 sec. Da diese nicht direkt mit dem einzelnen Zyklus in Verbindung stehen, wurden sie anteilig zugeschlagen (34 sec je Zyklus). Beim Abladen des Hackholzes fielen mehrmals spezielle „Hackholz-Verteilzeiten“ an, wenn die Forststraße teils mit der Zange, teils händisch von herabgefallenem Material gereinigt werden musste. Diese Zeiten wurden nur auf die Hackholz-Zyklen umgelegt (45 sec je Zyklus).

Für das Rücken der stofflichen Sortimente ergibt sich eine Technische Arbeitsproduktivität von 10,2 Fm/h (MAS), für das Hackholz von 30,3 Srm/h (MAS) bzw. 12,0 Fm/h (MAS). Für das Rücken wird ein Korrekturfaktor von 1,2 angesetzt, um auf das langfristig erzielbare Leistungsniveau zu schließen [160]. Die erwartete langfristige TAP beträgt demnach für die stofflichen Sortimente 8,5 Fm/h (MAS), für das Hackholz 25,0 Srm/h (MAS) bzw. 10,0 Fm/h (MAS).

Zeitstudie Hacken

Im beobachteten Fall wurde das Hackholz kurzfristig vor Ort vermarktet. Dadurch entstand ein Bruch in der Modellverfahrenskette IIIb, da Hacken und Transport durch den Käufer in Eigenleistung mit landwirtschaftlichen Maschinen durchgeführt wurden. Die Fallstudie umfasst somit nicht die gesamte Modellverfahrenskette. Die Ergebnisse der Zeitstudie zum Verfahrensschritt Hacken werden gemeinsam mit den anderen Hackerstudien in Abschnitt 4.3.4.1 behandelt.

Gesamtproduktivität und Verfahrenskosten

Zur Kostenkalkulation wurden die Maschinenkosten wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben ermittelt. Die wichtigsten Eingangsparameter sind in Tabelle 40 aufgelistet.

Tabelle 40: Eingangsparameter für die Kalkulation der Maschinenkosten für Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Sailerhausen

	Harvester Neuson Ecotec 132 HVT mit Aggregat LogMax5000 D	Forwarder Timberjack 1010B
Anschaffungspreis	305.000 €	172.000 €
Gesamtnutzungsdauer	15.000 h (MAS)	16.000 h (MAS)
Veralterungszeit	8 a	10 a
Reparaturkostenfaktor	1,1	0,9
Schmiermittelfaktor	0,25	0,2
Treibstoffverbrauch	11 l/h (MAS)	9 l/h (MAS)
Gesamtkosten MAS inkl. Personal	121,69 €/h (MAS)	82,90 €/h (MAS)

Für den Harvester ergeben sich Kosten von 121,69 €/h (MAS), für den Forwarder von 82,90 €/h (MAS). Beim beschriebenen Verfahren entstanden somit Bereitstellungskosten von 39,82 €/Fm frei Forststraße (Tabelle 41).

Tabelle 41: Übersicht über Produktivität und Bereitstellungskosten von Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Sailerhausen

	Harvester	Forwarder	
		Energieholz	Stoffliche Sortimente
Holzmenge [Fm]	294,6	144,0	150,6
Produktivität [Fm/h (MAS)]	4,1	10,0	8,5
		(gesamt: 9,2)	
Maschinenkosten [€/h (MAS)]	121,69	82,90	
Bereitstellungskosten [€/Fm]	29,68	8,29	9,75
		(gesamt: 9,01)	
Bereitstellungskosten [€/Fm] frei Forststraße: 38,69			

Diskussion der Ergebnisse

In der Gesamtschau stellt das untersuchte Ernteverfahren eine sinnvolle Variante für Ersteingriffe und die Anlage der Feinerschließung in jungen Nadelholzbeständen dar. Insbesondere ist es für Bestände geeignet, die (wie der Versuchsbestand) bereits für stoffliche Sortimenten ausreichende Dimensionen, gleichzeitig aber einen hohen Anteil schwacher (Hackholz-)Dimensionen aufweisen. Schwächere Bäume und Kronen können mit der Sammelfunktion bündelweise geerntet und auch teilentastet werden. Der Zeitbedarf je gefällttem Baum ist dadurch deutlich reduziert. Gleichzeitig ist die Standardaufarbeitung stärkerer Bäume ohne Einschränkung möglich. Dabei muss allerdings bedacht werden, dass bei steigender Anzahl ausgehaltener Sortimenten auch der Aufwand beim Aushalten und beim Rücken steigen kann.

Die Entastung bis in die Kronen hinein ist für den Bodenschutz und die Nährstoffnachhaltigkeit förderlich. Sie kann je nach erforderlicher Reisigmenge, Nährstoffsituation und gewünschter Hackholzqualität variabel eingesetzt werden.

Durch das eingesetzte Verfahren wurden 15,1 % der gesamten oberirdischen Biomasse des ausscheidenden Bestands auf der Fläche belassen. Dieser Anteil wäre bei einer alternativen Vollbaumnutzung mit entzogen worden. Zwar wird aus einem Praxisversuch in einem Endnutzungsbestand mit Entnahme von Kronen- und Restholz aus Waldschutzgründen auch ohne spezielle Verfahrenstechnik von einer verbleibenden Biomasse der ausscheidenden Bäume von immerhin 14,4 % (Derbholz 6,3 %, Nichtderbholz 58,5 %) berichtet [201]. Allerdings handelte es sich dabei um einen Endnutzungshieb. Die verbleibende Nichtderbholzmenge wurde maßgeblich dadurch beeinflusst, dass die Kronen beim Fällen und Rücken zu 50 % bereits vor der Derbholzgrenze (also bei einem Durchmesser von über 7 cm mit Rinde) gebrochen waren und diese Wipfelstücke nicht genutzt wurden. In Ersteingriffen wie in der Fallstudie Sailershausen ist dieser Effekt nicht zu erwarten, vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass in solch jungen Beständen bei Vollbaumnutzung auch wirklich die Vollbäume entnommen werden.

Der Reduktion des Biomasseentzugs um 15,1 % entspricht eine Reduktion des Nährstoffentzugs von 34 % für N, 33 % für P, 31 % für K und je 27,5 % für Mg und Ca. Dass die Reduktion beim Ca-Entzug in einer vergleichbaren Größenordnung liegt wie bei den anderen betrachteten Elementen und nicht deutlich darunter wie in anderen Studien gezeigt (z. B. Fallstudie Eurasburg, Abschnitt 4.3.4.4, [85]), liegt vorrangig am geringen Alter des Versuchsbestands und dem damit abweichenden Verhältnis der Biomasse in Derbholz m. R. zur Kronenbiomasse. Da Ca in der Derbrinde relativ hoch konzentriert vorliegt, wird in älteren Beständen (mit hohem Derbholzanteil) der Reduktionseffekt durch die Entastung des Hackholzes geschmälert.

Die Reduktion der Biomasseentnahme findet weit überwiegend im Hackholz statt. In der Fallstudie fielen 26 Srm/ha Hackschnitzel aus Nichtderbholz an. Ohne die Entastung wäre hier mit rund 47 Srm/ha zu rechnen gewesen. Der mögliche Erlös für die 23 Srm/ha Mehrmenge würde jedoch auch dadurch geschmälert, dass die Hackschnitzelqualität unter dem erhöhten Grünanteil leiden und ein geringerer Preis je Srm erzielt werden

würde. Insgesamt stehen den beschriebenen positiven Effekten beim Nährstoffentzug nur geringe Umsatzverluste entgegen.

Diskussion der Methodik

Die dargestellte Fallstudie gibt einen guten ersten Einblick in das Verfahren. In zukünftigen Studien ist die Anlage von Vergleichsflächen verschiedener Ernteverfahren unter gleichen Bestandsbedingungen sinnvoll.

Eine sortimentsweise Betrachtung der Produktivität und damit die Aufteilung der Erntekosten auf die einzelnen Sortimente waren auf der erhobenen Datengrundlage nicht möglich. Die Produktionen der einzelnen Sortimente waren aneinandergelockt, die Gesamtproduktivität ist stark vom Anteilsverhältnis der Sortimente untereinander abhängig.

Die ermittelten Bereitstellungskosten müssen vor dem Hintergrund der verwendeten Methodik gesehen werden. Die angesetzten Kosten je MAS müssen nicht zwangsweise den am freien Markt geltenden Sätzen entsprechen. Zudem wird in der Holzernte und beim Rücken üblicherweise nach verarbeiteter Holzmenge und nicht nach Stundensätzen entlohnt.

4.3.4.4 Fallstudie Eurasburg: Altdurchforstung mit Harvester – Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“

Die Fallstudie Eurasburg begleitete die Maßnahme von der Holzernte über die Rückung bis zur Erzeugung der Hackschnitzel auf einer Teilfläche von 4 ha.

Bestandsdaten

Bei dem Versuchsbestand handelte es sich um einen ca. 60-jährigen einschichtigen Fichtenbestand mit nennenswerten Anteilen an Kiefer, Tanne, Birke und Buche. Weitere Bestandsdaten liefert Tabelle 42.

Tabelle 42: Bestandsdaten Fallstudie Eurasburg

Waldort	Forstbetrieb Landsberg am Lech, Revier Eurasburg Ost
Nutzungsart	Verjüngungsnutzung
Fläche	6,3 Hektar
Alter	50–70/60 Jahre
Standort	Mäßig wechselfeuchte bzw. wechselfeuchte Lehme
Baumarten	Fi 73 %, Kie 15 %; Lä 2 %, Bu 6 %, Bir 4 %
Entstehung	Vermutlich Pflanzung. Letzte Maßnahme: schwache Niederdurchforstung (6–8 Jahre zurückliegend)

Die Baumartenzusammensetzung des Gesamtbestands wurde aus der Forsteinrichtung 2012 übernommen. Der ausscheidende Bestand weist davon abweichend eine Zusammensetzung von Fi 78 %, Kie 20 %, Ta 1 %, Bu 1 % und Bir 1 % auf. Die Durchmesser-Verteilung nach Stammzahl des ausscheidenden Bestands ist in dargestellt (Tabelle 43). Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hat einen BHD von 23,08 cm. Der mittlere BHD des ausscheidenden Bestands beträgt 22,52 cm.

Tabelle 43: Durchmesser-Verteilung nach Stammzahl im ausscheidenden Bestand

BHD-Klasse	Anteile ausscheidender Bestand
15 (13–17 cm)	17 %
20 (18–22 cm)	36 %
25 (23–27 cm)	33 %
30 (28–32 cm)	9 %
35 (33–37 cm)	4 %
40 (38–42 cm)	1 %

Verfahrenskette, eingesetzte Maschinen und Arbeitsauftrag

Der Bestand war bereits vom Forstbetrieb komplett vorbereitet. Es waren Zukunfts-bäume (Z-Bäume) ausgewählt und markiert worden. Pro Z-Baum wurden ein bis zwei Bedränger zur Entnahme ausgezeichnet.

Die **Holzernte** wurde mit einem Sechsradharvester des Herstellers Ponsse, Modell Bear, ausgerüstet mit Standardaggregat durchgeführt (Abbildung 39 A). Die ausgehaltenen Sortimente nach Baumarten sind in Tabelle 44 dargestellt. Das Energierundholz wurde in Anschluss an die Standardlängen ausgehalten und dabei mit reduziertem Anpressdruck der Entastungsmesser nur grob entastet (Abbildung 39 B). Die Kronen wurden durch die Entastungsmesser gezogen, bis die Spindel brach. Ggf. wurde bei einer maximalen Län-

ge von 6 m gekappt, um die Manipulierbarkeit beim Rücken nicht zu beeinträchtigen. Das aufgearbeitete Holz wurde sortimentsweise getrennt entlang der Rückegasse auf Rauhbeigen abgelegt.

Tabelle 44: Ausgehaltene Sortimente nach Baumarten

Baumart	Sortimente
Fichte	Sägeholz, Industrieholz, Hackholz
Kiefer	Sägeholz, Hackholz
Laubholz	Brennholz lang

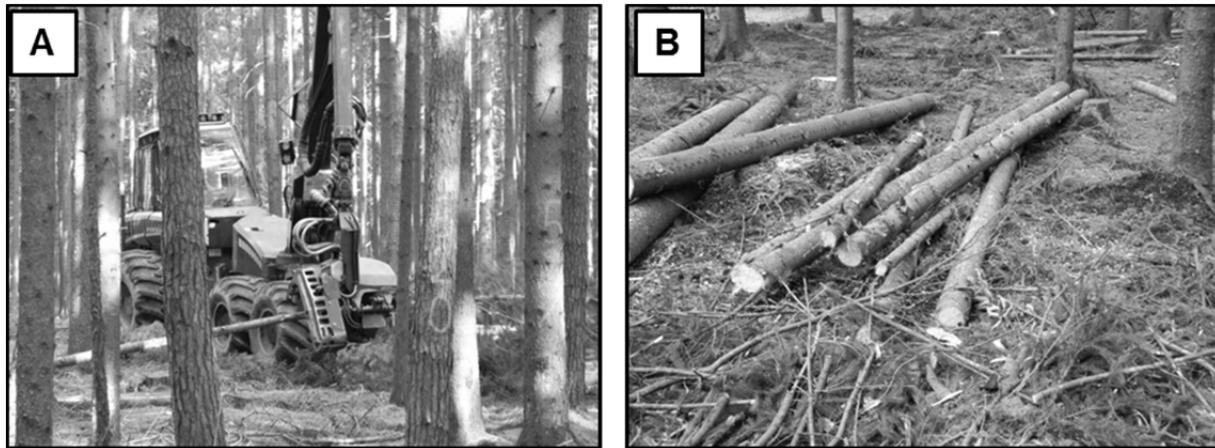


Abbildung 39: Harvester im Versuchsbestand Eurasburg, die ausscheidenden Bäume sind mit Forstmarkierfarbe durchnummeriert (A). Rauhbeige des Sortiments „Grob entastetes Energierundholz“ (B)

Die **Rückung** wurde mit einem Forwarder, Modell Komatsu 840.4, durchgeführt. Die stofflichen Sortimente wurden gemischt gerückt und separat entlang der Forststraße gepoltert. Das Hackholz wurde sortenrein gerückt und ebenfalls entlang der Forststraße gepoltert.

Das **Hacken** erfolgte mit einem Lkw-Aufbauhacker Jenz HEM 561. Der Abtransport der Hackschnitzel wurde mit Container-Lkw-Zügen durchgeführt.

Holzanfall

Aus dem Rücklauf der Werkseingangsvermessung sowie den Hackerprotokollen ergeben sich die in Tabelle 45 dargestellten Holz mengen.

Tabelle 45: Sortimentsanfall nach Werksmaß und Hackerprotokoll

Sortiment	Messung	Volumen	Einheit Messung	Fm m. R. gerundet
Sägeholz Fi B/C	Werkseingang	158,67	Fm m. R.	159
Sägeholz Fi D	Werkseingang	5,83	Fm m. R.	6
Sägeholz Kie	Werkseingang	28,22	Fm m. R.	28
Brennholz lang	Waldmaß	3,8	Fm m. R.	4
Hackholz	Hackerprotokoll	185	Srm	74
SUMME				271

Auf eine Herleitung des Anteils an Nicht-Derbholz im Hackholz wie bei der Fallstudie Sailershausen geschehen wurde in diesem Fall verzichtet. Aufgrund der Bestandsstruktur in diesem deutlich älteren Bestand und der eingesetzten Aushaltungsvariante wäre dies nur mit erheblichen Unsicherheiten möglich gewesen, zudem spielt das Nicht-Derbholz mengenmäßig eine untergeordnete Rolle. Es ergibt sich eine Eingriffsstärke von 68 Efm je Hektar. Der Anteil stofflicher Sortimente liegt bei 71 %.

Modellierung des ausscheidenden Bestands und des Nährstoffentzugs

Der ausscheidende Bestand wurde auf Grundlage von 25 gefällten und vermessenen Bäumen sowie von Höhenmessungen an jedem zehnten zur Fällung vorgesehenen Baum modelliert. Dazu wurden Biomassefunktionen der Technischen Universität München verwendet [162]. Für die Fichte wurde eine Höhenkurve nach MICHAÏLOFF (1943, entnommen aus [182]) abgeleitet. Für die Kiefer wurde aufgrund der relativ geringen Anzahl gemessener Bäume eine lineare Ausgleichsfunktion verwendet.

Die Nährstoffentzüge wurden für Fichte und Kiefer getrennt nach einzelnen Baumkompartimenten (Krone, Derbholz, Derbrinde) modelliert. Für das Nichtderbholz wurden Nährstoffgehalte aus eigenen Laboranalysen für die entsprechenden BHDs, ansonsten Nährstoffwerte des Bestands „Högelwald“ [84] verwendet ([76], auszugsweise in Tabelle 46). Die Standorte sind hinsichtlich der Nährstoffverfügbarkeit vergleichbar. Für das Derbholz wurden ausschließlich Literaturwerte verwendet [84]. Die gesamten Kronen wurden mittels Kranwaage waldfrisch gewogen. Der durchschnittliche Wassergehalt unmittelbar nach der Fällung betrug 54 % (Fichte) bzw. 52 % (Kiefer).

Tabelle 46: Ergebnisse der Laboranalysen für Nichtderbholz [76]. Angegeben sind Mittelwerte aus je 3 Probestämmen (Fichte: BHD 17, 17 und 27 cm; Kiefer: BHD 21, 25 und 27 cm).

Baumart	Anzahl Probestämme	Wassergehalt [%]	P [g/kg]	K [g/kg]	Ca [g/kg]	Mg [g/kg]
Fichte	3	54	0,66	3,70	2,80	0,87
Kiefer	3	52	0,49	2,89	1,81	0,60

Bei der Maßnahme wurden insgesamt 103 Fichten je Hektar sowie 27 Kiefern je Hektar entnommen. In Summe sind in diesen Bäumen die in Tabelle 47 angegebenen Nährstoffmengen enthalten.

Tabelle 47: Absolute Nährstoffmengen in Kilogramm je Hektar in der oberirdischen Biomasse des ausscheidenden Bestands

Baumart	Anzahl ausscheidender Bäume	Absolute Nährstoffmengen ausscheidender Bestand [kg/ha]			
		P	K	Ca	Mg
Fichte	103	3,95	21,15	87,75	6,14
Kiefer	27	0,65	3,65	9,15	1,42

Der durchschnittliche Nährstoffentzug je entnommenem Baum ist in Abbildung 40 für die drei Aushaltungsvarianten „Grob entastetes Energierundholz“, Vollbaumnutzung und ausschließliche Nutzung von Derbholz gegenübergestellt.

Im Vergleich zur Vollbaumnutzung konnte durch die Entastung bis in die Kronen beim „Grob entasteten Energierundholz“ der durchschnittliche Nährstoffentzug je entnommenem Baum bei den Elementen P, K, Ca und Mg reduziert werden (Abbildung 40). Er liegt nur leicht über dem Entzug bei der ausschließlichen Derbholznutzung.

Bei Ca ist die Reduktion sowohl bei Fichte als auch bei Kiefer relativ gering. Bei der Entastung bis in den Kronenbereich werden 90,3 % (Fichte) bzw. 87,0 % (Kiefer) des im ausscheidenden Bestand gebundenen Ca entnommen, da das Element vorrangig in der Rinde enthalten ist.

Der Entzug ist bei den betrachteten Baumarten und Elementen jeweils sehr nahe an der reinen Derbholznutzung und stellt deshalb im Vergleich zur Vollbaumnutzung eine deutliche Verbesserung bei der Nährstoffschonung dar.

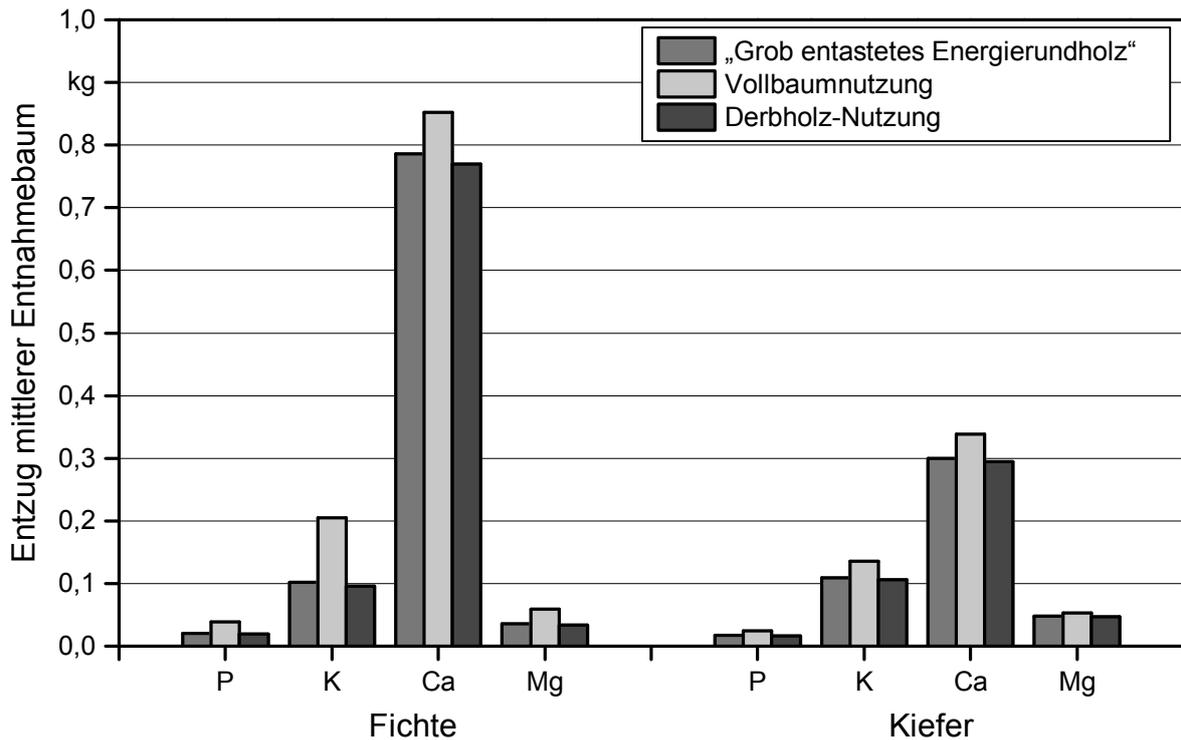


Abbildung 40: Durchschnittlicher Entzug je entnommenem Baum (getrennt nach Fichte und Kiefer) bei der untersuchten Maßnahme für die Elemente P, K, Ca und Mg bezogen auf die Aushaltungsvarianten „Grob entastetes Energierundholz“, Vollbaumnutzung und ausschließlicher Derbholznutzung in kg

Zeitstudie Holzernte

In der Zeitstudie zur Holzernte wurden die 529 zur Entnahme vorgesehenen und vorab vermessenen Bäume erfasst. Zusätzlich wurden 58 Bäume gefällt, die nicht ausgezeichnet waren und von denen demnach auch der BHD nicht bekannt war. Auf Auswertungsebene entspricht ein Baum je einem Fällzyklus. Für die weitere Auswertung wurden 454 Fällzyklen (362 Fi, 86 Kie, 6 Ta) herangezogen. Laubholz wurde aufgrund der geringen Anzahl an Zyklen (6 Bir und 5 Bu) – und weil die Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ für die Anwendung im Nadelholz im Fokus der Studie stand – nicht berücksichtigt. Der Zeitbedarf für die Fällung inklusive Aufarbeitung und Vorliefern in Abhängigkeit vom BHD ist in Tabelle 48 dargestellt. Mit zunehmendem BHD steigt erwartungsgemäß auch der Zeitbedarf je Baum, wobei kein enger statistischer Zusammenhang nachgewiesen werden konnte und in den BHD-Klassen 10, 35 und 40 nur eine geringe Anzahl an Zyklen beobachtet wurde.

Tabelle 48: Übersicht Holzernte-Zyklen (nur Nadelholz) nach BHD-Klasse und Zeitbedarf (Reine Arbeitszeit)

BHD-Klasse	Anzahl Zyklen	Zeit gesamt (RAZ) [h:min:sec]	Zeit Durchschnitt (RAZ) [h:min:sec]
10 (8–12 cm)	1	00:00:34	00:00:34
15 (13–17 cm)	76	00:49:33	00:00:39
20 (18–22 cm)	160	01:56:46	00:00:44
25 (23–27 cm)	154	02:00:48	00:00:47
30 (28–32 cm)	44	00:36:37	00:00:50
35 (33–37 cm)	17	00:15:45	00:00:56
40 (38–42 cm)	2	00:02:32	00:01:16
SUMME	454	05:42:35	00:00:45

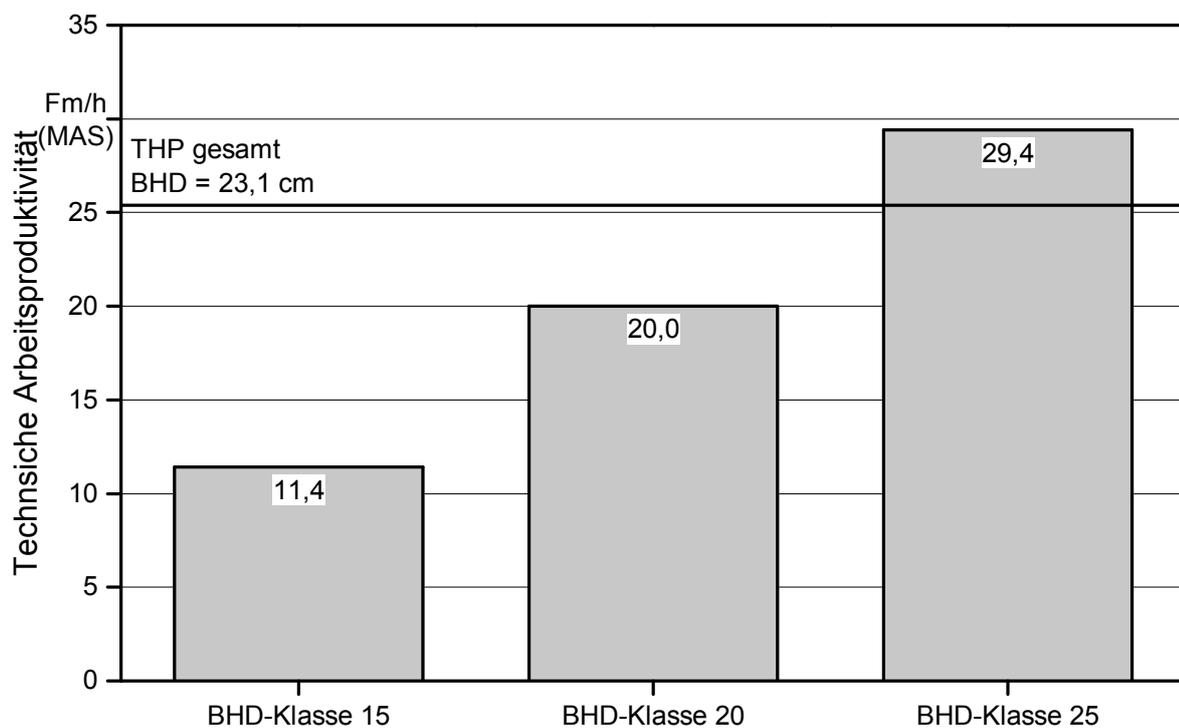


Abbildung 41: Leistung des Harvesters nach BHD-Klassen. Die Darstellung in Fm erfolgt für das Hackholz rechnerisch mit Faktor $1 \text{ Fm} \triangleq 2,5 \text{ Srm}$. Der Grundflächenmittelstamm des ausscheidenden Bestands hatte einen BHD von 23,08 cm.

Insgesamt wurde bei der Holzernte eine Technische Arbeitsproduktivität von 35,5 Fm/h (MAS) erreicht. Da bei Zeitstudien i. d. R. ein höheres Leistungsniveau aufgenommen wird als langfristig erzielbar, wird eine entsprechende Korrektur vorgenommen. Für den Harvestereinsatz wurde eine Zeitstudienleistung vom 1,4-Fachen des langfristi-

gen Niveaus angesetzt [160]. Die erwartete langfristige TAP beträgt demnach 25,4 Fm/h (MAS). Bei der getrennten Auswertung der Fällung von Bäumen nach BHD-Klassen ergeben sich die in Abbildung 41 dargestellten Leistungszahlen. Die Abbildung illustriert auch den Zusammenhang zwischen Stückmasse und Produktivität. Dabei stieg die Streuung der Messwerte innerhalb der BHD-Klassen mit zunehmendem BHD an.

Zeitstudie Rückung

Die Zeitstudie zur Rückung wurde auf 13 Rückegassen mit 1568 lfm durchgeführt. Die Feinerschließung bestand bereits seit längerer Zeit. Der mittlere Gassenabstand lag bei 22 m. Die aufgenommenen Zeiten beliefen sich auf 9 h 39 min 28 sec (Gesamte Arbeitszeit) und waren vollständig auswertbar.

Geht man von einer mittleren Fahrtstrecke auf der Rückegasse von der halben Gassenlänge aus, lässt sich eine mittlere Rückeentfernung über alle Sortimente innerhalb der Stichprobe von 180 m je Vollfahrt ableiten (Tabelle 49).

Tabelle 49: Mittlere Rückeentfernung nach Sortimenten.

Sortiment	Mittlere Rückeentfernung [m]
Sägeholz Fichte/Tanne	178
Sägeholz Kiefer	179
Industrieholz Fichte	184
Hackholz	195
Brennholz lang	164
MITTEL	180

Insgesamt wurden 27 Rückezyklen ausgewertet (20 mit gemischten Sortimenten, 9 mit reinem Hackholz). Die gemessenen Verteilzeiten wurden den Sortimentszyklen gewichtet zugeteilt. Die Verteilzeiten des Gesamthiebs beliefen sich auf insgesamt 25 min 05 sec. Da diese nicht direkt mit dem einzelnen Zyklus in Verbindung stehen, wurden sie anteilig zugeschlagen (52 sec je Zyklus).

Für das Rücken der stofflichen Sortimente ergibt sich eine Technische Arbeitsproduktivität von 33,2 Fm/h (MAS), für das Hackholz von 42,5 Srm/h (MAS) bzw. 17,0 Fm/h (MAS). Für das Rücken wird ein Korrekturfaktor von 1,2 angesetzt, um auf das langfristig erzielbare Leistungsniveau zu schließen [160]. Die erwartete langfristige TAP beträgt demnach für die stofflichen Sortimente 27,7 Fm/h (MAS), für das Hackholz 35,4 Srm/h (MAS) bzw. 14,2 Fm/h (MAS).

Zeitstudie Hacken

Im untersuchten Fall wurde der Hackauftrag von der BaySF an einen professionellen Hackerunternehmer vergeben. Die Ergebnisse der Zeitstudie zu diesem Verfahrensschritt werden gemeinsam mit den anderen Hacker-Studien in Abschnitt 4.3.4.1 behandelt.

Gesamtproduktivität und Verfahrenskosten

Zur Kostenkalkulation wurden die Maschinenkosten wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben ermittelt. Die wichtigsten Eingangsparameter sind in Tabelle 50 aufgelistet.

Tabelle 50: *Eingangsparameter für die Kalkulation der Maschinenkosten für Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Eurasburg*

	Harvester Ponsse Bear	Forwarder
Anschaffungspreis	440.000 €	221.500 €
Gesamtnutzungsdauer	15.000 h (MAS)	16.000 h (MAS)
Veralterungszeit	8 a	10 a
Reparaturkostenfaktor	1,1	0,9
Schmiermittelfaktor	0,25	0,15
Treibstoffverbrauch	16 l/h (MAS)	9 l/h (MAS)
Gesamtkosten MAS inkl. Personal	160,29 €/h (MAS)	90,64 €/h (MAS)

Tabelle 51: *Übersicht über Produktivität und Bereitstellungskosten von Harvester und Forwarder in der Zeitstudie Eurasburg*

	Harvester	Forwarder	
		Energieholz	Stoffliche Sortimente
Holzmenge [Fm]	271	74	197
Produktivität [Fm/h (MAS)]	25,4	14,2	27,7
		(gesamt:21,9)	
Maschinenkosten [€/h (MAS)]	160,29	90,64	
Bereitstellungskosten [€/Fm]	6,31	6,38	3,27
		(gesamt: 4,14)	
Bereitstellungskosten [€/Fm] frei Forststraße: 10,45			

Für den Harvester ergeben sich Kosten von 160,29 €/h (MAS), für den Forwarder von 90,64 €/h (MAS). Beim beschriebenen Verfahren entstanden somit Bereitstellungskosten von 10,45 €/Fm frei Forststraße (Tabelle 51).

Diskussion der Ergebnisse

Das Sortiment „Grob entastetes Energierundholz“ hat bereits Einzug in die Praxis genommen. Bei der BaySF wenden mehrere Forstbetriebe das Verfahren an [208]. Auch aufseiten der Forstlichen Zusammenschlüsse ist das Verfahren bekannt.

Aus dem Landesbetrieb Forst Brandenburg wurde eine kombinierte Verfahrenskette für Industrieholz und Energierundholz mit modifizierter Standardtechnik beschrieben [165]. Die Holzernte erfolgt durch einen Harwarder, bestehend aus einem Forwarder HSM 208 F, an dessen Kran ein Fäller-Bündler-Aggregat mit Vorschubwalzen und Astungseinrichtung (MOIPU 250 ES) montiert ist. Der Harwarder leistet die komplette Holzernte und hält entweder Industrieholz (IS) oder Energierundholz in fallenden Längen (EH) in den Rungenkorb aus. Das Verfahren ist für jüngere Kiefernbestände konzipiert. Das erzeugte Energierundholz weist dennoch einen dem hier beschriebenen „Grob entasteten Energierundholz“ ähnlichen Charakter auf.

Die bei der vollmechanisierten Holzernte gezeigte Verfahrensleistung entspricht veröffentlichten Werten für ähnliche Einsätze. Für einen Harvester ähnlicher Motorleistung wurde zum Beispiel in einfachem Gelände und bei einem mittleren BHD von 22 cm eine TAP von 22 Efm/h (MAS) ermittelt [160]. In der Fallstudie Eurasburg ergaben sich bei 23 cm BHD 25,4 Efm/h (MAS). Die zunehmende Streuung der Messwerte mit zunehmendem BHD lässt sich dadurch erklären, dass der Kran mit steigender Entfernung des Aggregats vom Trägerfahrzeug eine sinkende Nettohubleistung zur Verfügung hat. Bei kleineren BHD ist der Effekt nicht so stark ausgeprägt, größere Bäume sind mit zunehmender Entfernung jedoch deutlich schwieriger zu manipulieren. Im Vergleich zur Fallstudie Sailershausen wurde beim Rücken eine deutlich höhere TAP beobachtet. Der Unterschied ist plausibel, da hier stärkere Dimensionen anfielen (höhere Stückmasse) und der Mengenanfall je Sortiment ein effektiveres Arbeiten ermöglichte.

Durch die grobe Entastung des Energierundholzes konnte der Nährstoffentzug im Vergleich zur Vollbaumnutzung deutlich reduziert werden. Auch in der Fallstudie Eurasburg zeigte sich, dass die Nährstoffkonzentrationen in den Kronen höher sind als im Derbholz (vgl. [110]). Ausnahme ist Ca, das vorrangig in der Rinde gebunden ist. Auf sensiblen Standorten stellt das Verfahren damit eine deutliche Verbesserung dar. Zudem kann im selben Zug die Hackschnitzelqualität verbessert werden. In der Praxis wird jedoch eine standortbezogene Betrachtung notwendig, um zu entscheiden, ob die so erreichte Reduktion zur Sicherung der Nährstoffnachhaltigkeit genügt. Von der LWF wurde 2014 ein Forschungsprojekt begonnen, das sich ausführlich mit der Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ auseinandersetzt.

Diskussion der Methodik

Im Rahmen der Fallstudie sollte eine erste Erfassung des Verfahrens zur Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ erfolgen. Diesem Ziel war die Methodik angemessen. Die präsentierten Ergebnisse können jedoch nur als erste Richtwerte, die situationsbezogen in einer Fallstudie ermittelt wurden, gelten.

Der Schwerpunkt lag auf den vergleichenden Untersuchungen zum Nährstoffentzug. Um fundierte Praxisempfehlungen zum standortabhängigen Einsatz des Verfahrens und vergleichende ökonomische Aussagen treffen zu können, sind ausführlichere Arbeitsstudien erforderlich. Zudem ist für die Nährstoffe jeweils eine Bilanzierung notwendig, d. h. die Bodenvorräte, Zugänge durch Verwitterung und Deposition sowie Austräge durch Auswaschungen müssen berücksichtigt werden. Diese Aspekte sind ebenfalls Inhalt des aktuellen Forschungsprojekts zur Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“.

4.3.4.5 Fallstudien: Hackschnitzelproduktion aus Flurholz

Die beobachteten Einsätze unterschieden sich in zwei wesentlichen Punkten von den forstwirtschaftlichen Fallstudien. Erstens hat die Erfüllung des Pflegeauftrags erkennbar Priorität vor dem Holzerntrag. Zweitens müssen die Maßnahmen im naturschutzrechtlich zulässigen Zeitfenster von Oktober bis Februar durchgeführt werden (Vogelschutz).

Fallstudie Straßenbegleitholz B13

Der Ausgangsbestand war eine dichte, stellenweise lückige, straßenbegleitende Hecke an der Bundesstraße B13. Die Hecke wurde gepflanzt und auf Teilflächen bereits zuvor gepflegt, d. h., auf den Stock gesetzt. Das Alter der Stockausschläge wurde auf fünf bis zehn Jahre geschätzt. Zum Teil war flächig wesentlich jüngerer Aufwuchs (aus „Wurzelbrut“ o. Ä.) vorhanden. In regelmäßigen Abständen waren Spitzahorn-Solitärbäume alleartig eingestreut.

Die straßenbegleitende Hecke wurde mit einem Zwickaggregat an einem Radbagger ATLAS 180 WSR auf den Stock gesetzt (Abbildung 42). In die Hecke eingewachsene Solitärbäume wurden belassen und fallweise hochgeastet (Lichtraumprofil) bzw. motormanuell von Aufwuchs befreit, wenn dieser vom Bagger nicht zu greifen war.

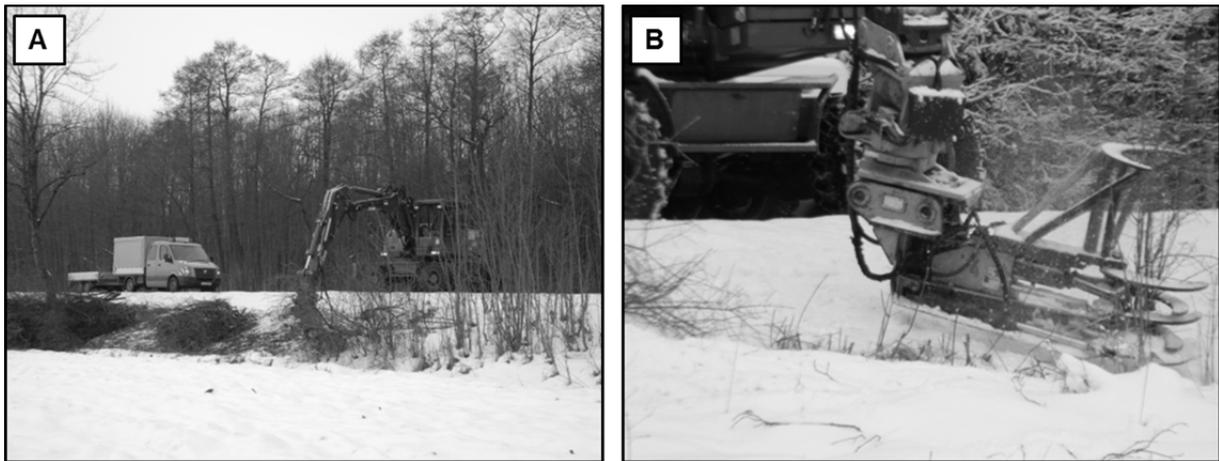


Abbildung 42: Radbagger im Einsatz im Straßenbegleitholz (A); Nahaufnahme des Zwickaggregats (B)

Zu Beginn der Arbeiten wurde eine Habbigschere eingesetzt. Als diese eine Funktionsstörung hatte, wurde sie gegen das Aggregat Schnitt-Griffy HS 850 ausgewechselt. Beide Baumscheren werden von der Firma Hans Habbig Maschinenbau hergestellt. Die Aggregate waren jeweils am Baggerausleger angebracht. Dazwischen war eine Schwenkeinheit montiert. Eine Abkippeinrichtung war nicht vorhanden. Die Aggregate konnten jedoch über den Hydraulikzylinder des Baggerlöffels abgekippt werden. Das Aggregat Schnitt-Griffy HS 850 hat neben dem Schneidwerkzeug eine Haltezange, die zwar mit der Schere gekoppelt ist, sich aber trotzdem zum Wiederaufnehmen von Schnittgut (Vorkonzentrieren) eignet. Der Bagger zwickte größere Sträucher einzeln oder in Gruppen von Stockausschlägen und legte sie in Raubeigen ab. Zum Teil wurden erst die Krone oder Äste (Ablaufabschnitt „SCHNITT Ast/Krone“) und dann der Stammrest (Ablaufabschnitt „Schnitt Stammrest“) entnommen. Dabei wurde der Strauch in etwa hälftig geteilt. Überwiegend wurde jedoch der Trennschnitt direkt am Stock durchgeführt.

Keines der beiden eingesetzten Aggregate war mit Sammelgreifern wie ein Fäller-Bündler-Aggregat ausgerüstet. Trotzdem musste nicht nach jedem Schnittvorgang separat abgelegt werden. Dicht stehender Aufwuchs konnte durch die Form des Aggregats (vor allem beim Aggregat Schnitt-Griffy HS 850 mit Haltebügel) bedingt nicht zum Bagger hin umfallen, sodass der Fahrer das Schnittgut auf davorstehende Sträucher schieben und somit mehrfach hintereinander schneiden und dann zusammen ablegen konnte. Diese Mehrschnittzyklen wurden sogar überwiegend beobachtet (Abbildung 43).

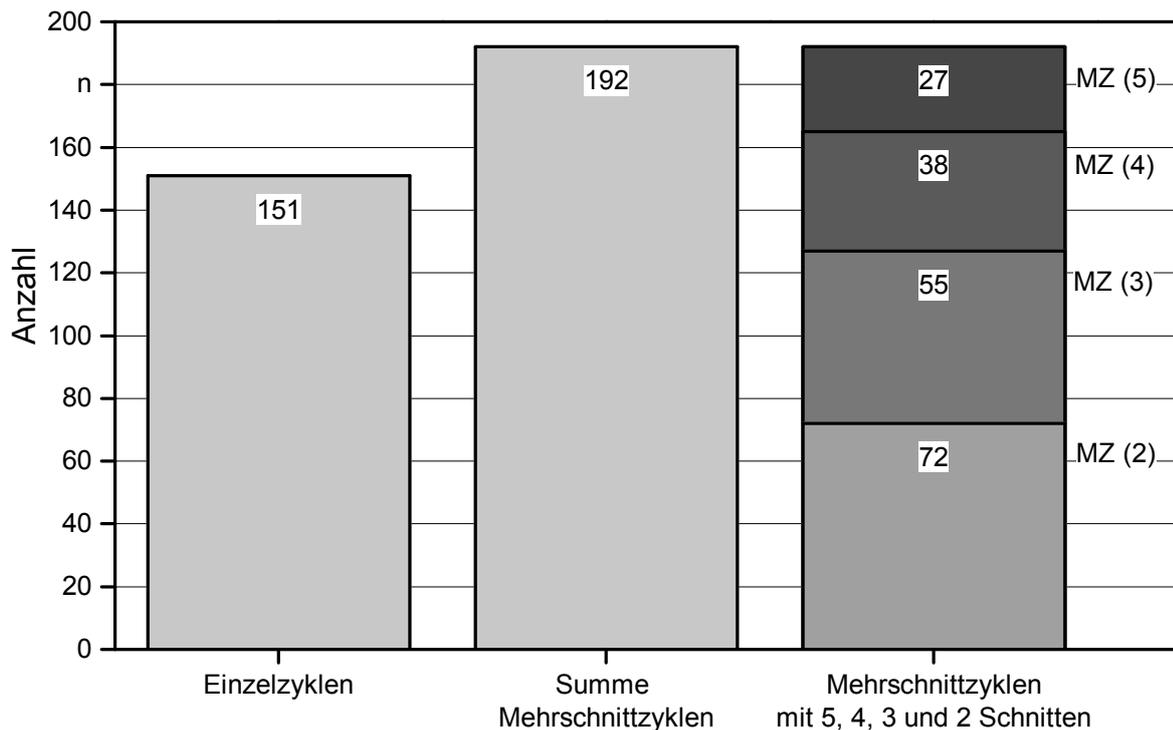


Abbildung 43: Beobachtete Einzelzyklen und Mehrschnittzyklen. Die rechte Säule stellt Mehrschnittzyklen mit fünf (MZ (5)), vier (MZ (4)), drei (MZ (3)) und zwei Schnitten (MZ (2)) dar.

Der Bagger musste während der gesamten Einsatzzeit von einem Straßenbaufahrzeug gesichert werden. Zuvor war die Wanderbaustelle mit einer Beschilderung eingerichtet worden. Die beiden Mitarbeiter der Straßenbauverwaltung hatten zudem die Aufgabe, die in den Lichtraum eingewachsenen Äste der Solitärbaume zu entnehmen. Außerdem mussten Stockausschläge motormanuell beigeschnitten werden, falls sie zu nahe an den Solitärbäumen standen und deshalb von der Schere nicht erfasst werden konnten. Allerdings konnte während der Studie „Straßenbegleitholz B13 Bagger“ nur jeweils ein solcher Einsatz beobachtet werden, sodass die geplante Studie „Straßenbegleitholz B13 motormanuell“ nicht weiter verfolgt wurde.

Die begleitete Probefläche hatte eine Länge von 89 lfm und umfasste rund 350 m² bestockte Fläche. Zur Bearbeitung durch den Bagger fielen 2 h 38 min 45 sec (MAS) an. Dies entspricht einer Laufmeterleistung von 33,6 lfm/h (MAS) bzw. einer Flächenleistung von 132,3 m²/h (MAS).

Das Verfahren zeigt einen Gesamtablauf, der sich von forstwirtschaftlichen Arbeiten deutlich unterscheidet. Die eingesetzten Baumscheren sind im Wald weniger gebräuchlich. Die Arbeit war klar auf die Pflegemaßnahme fokussiert. Bei der Maßnahme handelte es sich nach Aussage der Beteiligten um einen typischen Arbeitseinsatz in der Straßenrandpflege.

Das erzeugte Schnittgut wurde zwei Tage später gehackt. Hierfür war ein zapfwellenbetriebener Trommelhacker JENZ HEM 561 an einem Traktor mit 360 PS im Einsatz. Die Logistik wurde durch zwei Container-Lkw mit Anhängern gestellt. Diese hatten jeweils den Anhänger zuvor an einem Umladeplatz abgestellt, am Hacker wurden die Lkw solo befüllt. Das Hacken wurde wie die vorangegangenen Fällarbeiten als Wanderbaustelle organisiert (Abbildung 44 A). Zur Sicherung wurde ein Lkw der Straßenbauverwaltung eingesetzt.



Abbildung 44: Hackeraufstellung in der Fallstudie Straßenbegleitholz B13 (A) und beim Stromtrassenaufhieb (B)

Es zeigte sich, dass mit der auch für Waldeinsätze typischen Maschinen- und Fahrzeugausstattung beim Hacken von Straßenbegleitholz deutlich anders gearbeitet wird. Konkret hatte der Bagger das Hackholz in Raubeigen abgelegt, wodurch deutlich mehr Fahrbewegungen als am Polter im Wald notwendig waren. Der Hacker wurde während des Einsatzes (3 h 40 min 50 sec (GAZ) bzw. 3 h 08 min 36 sec (MAS)) in 46 Arbeitspositionen umgesetzt. Durch die häufigeren Fahrtbewegungen ist auch der Anteil der Hackerleerlaufzeit im Vergleich zu den Waldeinsätzen deutlich erhöht (Straßenbegleitholz: 13 % der GAZ; Waldhackschnitzel: 2 % der GAZ). Die Hackerleerlaufzeit umfasst Zeiten zum Beschleunigen und Auslaufen der Hackertrommel.

Insgesamt wurden bei dem Einsatz 134 Srm Hackschnitzel produziert und in vier Containern (je 37 m³ Ladevolumen) zum Betriebshof gebracht. Die TAP des Hackers über den beobachteten Einsatz lag bei 39,73-47,72 Srm/h (MAS), im Mittel 42,63 Srm/h (MAS).

Fallstudie Stromtrassenaufhieb

Ziel war eine grundlegende Beschreibung der Verfahrenskette beim Aufhieb von Stromtrassen mit anschließender Hackschnitzelgewinnung. Besichtigt wurde eine rund 1,3 ha große Aufhiebfläche. Diese war zuvor mit einem Fällaggregat an einem Bagger gefällt und das Material mit zwei Forwardern gerückt worden. Das Hackholz war konventionell

gepoltert. Im Hackholzpolter fanden sich Pappeln, Kiefern, Hainbuchen, Eichen, Weiden, Birken, Roterlen und Fichten.

Gehackt wurde mit einem Anhängerhacker Heizohack HM 14-800 K an einem Claas Xerion 3800 mit 380 PS Antriebsleistung. Die Hackschnitzel wurden mit einem landwirtschaftlichen 40-m³-Kipperanhänger an einem Traktor auf ein unbebautes Grundstück in einem nahegelegenen Gewerbegebiet (ca. 250 m entfernt) gebracht und dort auf ein Haufwerk gekippt. Der Platz diente dabei eher als Pufferspeicher und Umladeplatz und nicht als Lager. Wegen schlechter Wegeverhältnisse hätte das Hackholzpolter nicht direkt von einem Lkw angefahren werden können. Aus dem Zwischenlager wurde fortlaufend ein Container-Lkw mit Anhänger (zwei Container mit je 40 m³ Ladevolumen) durch einen Traktor mit Frontladerschaufel beladen. Der Lkw transportierte die Hackschnitzel dann direkt in ein Heizkraftwerk nach Nürnberg. Da die Arbeit bereits in Gange war, als die Zeitnehmer an der Fläche eintrafen, wurde keine detaillierte Zeitstudie durchgeführt.

Hinsichtlich der Sortimente, der Lagerung des Holzes im Polter und der eingesetzten Maschinen sowie der beobachteten Arbeitsabläufe kann dieser Hackereinsatz mit den in Abschnitt 4.3.4.1 beschriebenen Hackereinsätzen im Wald verglichen werden. Deutliche Abweichungen ergaben sich jedoch durch die eingesetzte zweigliedrige Logistik (zum Shuttleinsatz im Wald siehe Abschnitt 4.3.4.2).

4.3.5 Kraftstoffverbrauch und Durchsatzleistung beim Verfahrensschritt Hacken

Kraftstoffverbrauch und Durchsatzleistung der Maschinen konnten in 36 Zeitstudien bestimmt werden. Dabei kamen in 17 Fällen selbstfahrende Hacker und Lkw-Aufbauhacker zum Einsatz, in den übrigen 19 Fällen waren es zapfwellenbetriebene Anhängerhacker. Die Leistung der Zugmaschinen (landwirtschaftliche Traktoren) reichte von 81 bis 456 kW, wobei jedoch 89 % der Fallstudien an Zugmaschinen mit einer Antriebsleistung von mehr als 200 kW stattfanden (siehe Tabelle 52).

Tabelle 52: Leistungsbereich der Maschinen bei den Kraftstoffbedarfsmessungen

Maschinentyp	kW	PS	Anzahl
Selbstfahrender Hacker	450–456	612–620	3
Lkw-Aufbauhacker	309–360	420–489	14
Anhängerhacker (Zapfwelle \geq 200 kW)	203–382	276–520	15
Anhängerhacker (Zapfwelle 100–199 kW)	154	210	3
Anhängerhacker (Zapfwelle < 100 kW)	81	110	1

Die Durchsatzleistung der Hacker war stark von der Leistung der Trägermaschinen abhängig und schwankte zwischen 48,1 und 195,8 Srm/h (bezogen auf reine Hackzeit). Die

mittlere Durchsatzleistung stieg dabei konstant über die Leistungsklassen an (Tabelle 53) [174]. Die wenigen verfügbaren Literaturwerte zu Durchsatzleistungen solcher Maschinen zeigen vergleichbare Wertebereiche (71,4 bis 153,6 Srm/h [174]; 17,5 t_{atro}/h [23]). Erwartungsgemäß lagen die auf die reine Hackzeit bezogenen Werte über den Ergebnissen zur Technischen Arbeitsproduktivität (TAP in Srm/h (MAS), siehe Kapitel 4.3.4.1).

Tabelle 53: Durchschnittsleistung und Kraftstoffverbrauch der Hacker in Abhängigkeit der Maschinenleistung (Mittelwert ± SD)

Maschinenleistung (kW)	Srm/h ¹	t/h ¹	l/h ¹	l/h (MAS) ²
≥ 400	123 ± 23	25,5 ± 9,2	60,3 ± 17,3	48,5 ± 8,7
300–399	112 ± 27	19,1 ± 5,4	47,2 ± 13,5	35,9 ± 13,4
200–299	100 ± 30	17,1 ± 4,7	39,2 ± 14,0	30,1 ± 9,1
100–199	64 ± 11	10,4 ± 0,6	37,3 ± 3,9	32,9 ± 6,2

¹ bezogen auf reine Hackzeit (Hacker_{last} + Hacker_{leer}), ² bezogen auf Maschinenarbeitsstunde

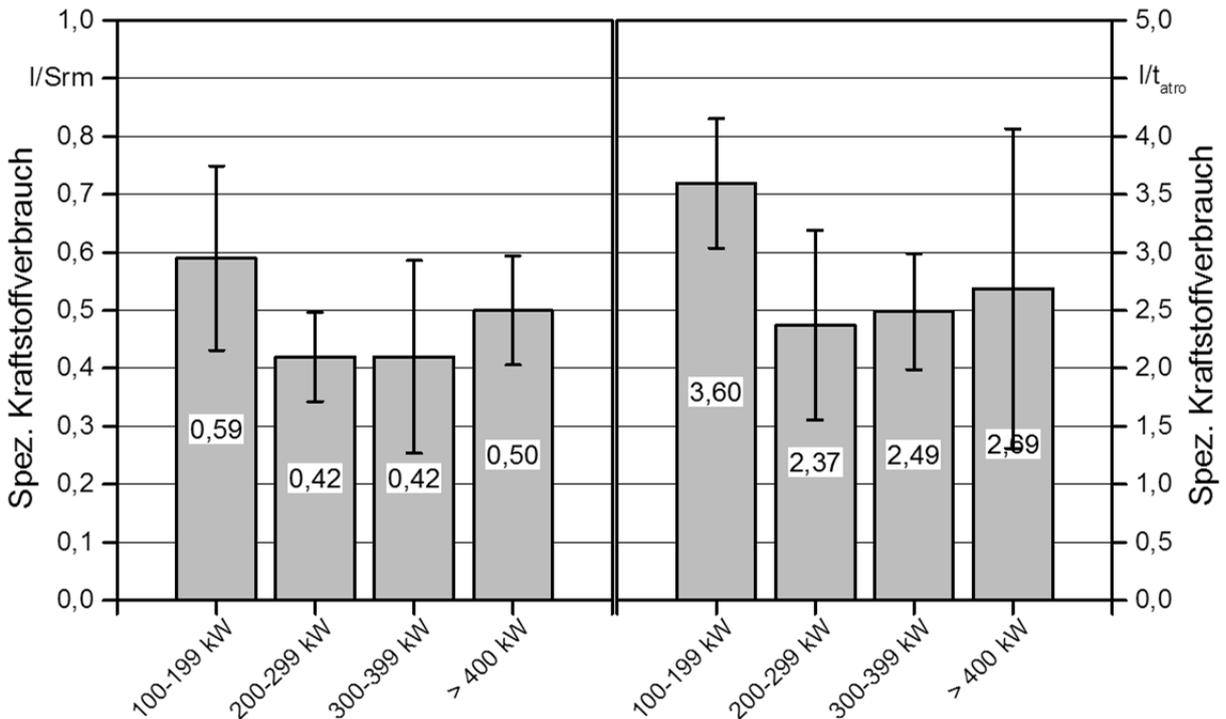


Abbildung 45: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (l/Srm, l/t_{atro}) für die jeweilige Maschinenleistung bei den Feldmessungen

Der Kraftstoffverbrauch der Hacker liegt mit durchschnittlich 44,5 ± 14,5 l/h (reine Hackzeit) bzw. mit 34,6 ± 11,8 l/h (MAS) deutlich höher als bei den anderen Forstmaschinen

der Bereitstellungskette (Harvester, Rückeschlepper und Forwarder), deren Verbrauch häufig unter 20 l/h (MAS) liegt (Tabelle 53 [197]). Somit kommt den Hackern eine Schlüsselrolle für die energieeffiziente Produktion von Hackschnitzeln zu. Ebenso wie die Durchsatzleistung wird auch der Kraftstoffverbrauch (absolut) stark von der Leistung der Maschine bestimmt. Der Durchschnittsverbrauch von Hackern > 400 kW und der von Hackern mit 300 bis 399 kW Leistung lag dabei um 13 bzw. um 8 l/h (reine Hackzeit = Hacker_last + Hacker_leer) höher als für die jeweils niedrigere Klasse (Tabelle 53).

Der spezifische Kraftstoffverbrauch, d. h. der Verbrauch an Diesel im Verhältnis zum produzierten Volumen oder zur produzierten Masse an Schüttgut, lag zwischen 0,17 und 0,76 l/Srm bzw. zwischen 1,13 und 4,10 l/t_{atro} und damit in einem Bereich, der in der Literatur häufig angegeben wird [190] [189] [23]. Dabei war der spezifische Verbrauch bei Hackern mit Trägermaschinen < 200 kW und ≥ 400 kW höher als bei Maschinen mit Leistungen zwischen 200 und 399 kW (Abbildung 45). Dies lässt sich zurückführen auf die geringe Durchsatzleistung der Maschinen < 200 kW bzw. bei Maschinen > 400 kW auf die Tatsache, dass sich die Durchsatzleistung bei besonders leistungsstarken Motoren in den beobachteten Fällen nicht proportional mit der Motorleistung steigern ließ (siehe Tabelle 53). Die Maschinen mit Leistungen zwischen 200 und 399 kW waren demnach am energieeffizientesten, wobei die kleinere der beiden Klassen (200–299 kW) ihre etwas geringere Durchsatzleistung durch einen geringeren Kraftstoffverbrauch kompensierte. Zu bemerken ist, dass die Daten der Klassen < 200 kW und ≥ 400 kW auf wenigen Einzelwerten beruhen und sich nicht signifikant von den Klassen 200–399 kW unterscheiden. Auch sind die Unterschiede zwischen den Klassen sehr gering.

Ungünstige Produktionsbedingungen vor Ort können dazu führen, dass die Maschinen nicht ihrer Leistung entsprechend ausgelastet werden. Unter idealen Produktionsbedingungen sind laut Herstellerangaben der Maschinen deutlich höhere Durchsatzleistungen möglich, wodurch sich die Effizienz der leistungsstarken Maschinen weiter verbessern kann. Folglich ist eine hohe Auslastung der Maschinen ausschlaggebend für eine energieeffiziente Hackschnitzelbereitstellung (vgl. Technische Arbeitsproduktivität, Abschnitt 4.3.4.1). Unter Praxisbedingungen im Wald ist eine optimale Auslastung aber oft nicht möglich.

Obwohl Durchsatzleistung und der Energieverbrauch stark von der Leistung der Maschine abhängen, variiert der spezifische Kraftstoffverbrauch stark je nach verwendetem Rohmaterial [6][135][189] und Maschineneinstellung [74][148][190] (siehe Abbildung 46). Dabei stieg der spezifische Kraftstoffverbrauch, wenn Waldrestholz anstelle von Stammholz gehackt wurde, sowie bei der Verwendung feiner Siebkorbweiten (< 80 × 80 mm) und stumpfer Messer [6][23][74][135][148][149][189]. Auch wenn die hier präsentierten Unterschiede größtenteils nicht statistisch signifikant waren, so zeigt der Trend doch deutlich, dass allein das regelmäßige Schärfen der Messer zu Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch von bis zu 15 % führen kann. Die vom KWF postulierten 20 % Verbesserung im Kraftstoffverbrauch beim Betrieb von Forstmaschinen durch energieeffiziente Arbeitsweisen scheinen somit auch für Hacker möglich [198]. Außerdem kommt es bei Verwendung stumpfer Messer zu einer deutlichen Verschlechterung der Hackschnitzelqualität (vgl. Unterkapitel 5.6 [148][189]), weshalb ein regelmäßiges Nachschleifen oder

Wechseln der Messer nach ca. sechs Betriebsstunden empfohlen werden kann [36][152][187][190]. Feine Siebe können durch die dichtere Maschenweite einen höheren Widerstand beim Hacken hervorrufen und dadurch die Durchsatzleistung verringern sowie die Belastung für den Hackerrotor erhöhen [149], sodass es zu einer Erhöhung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs kommen kann (Abbildung 46). Die Verwendung eines Förderbands anstelle eines Gebläses zeigte dagegen bei den hier durchgeführten Feldmessungen keine Verbesserung beim Kraftstoffverbrauch (vgl. hierzu auch [189]).

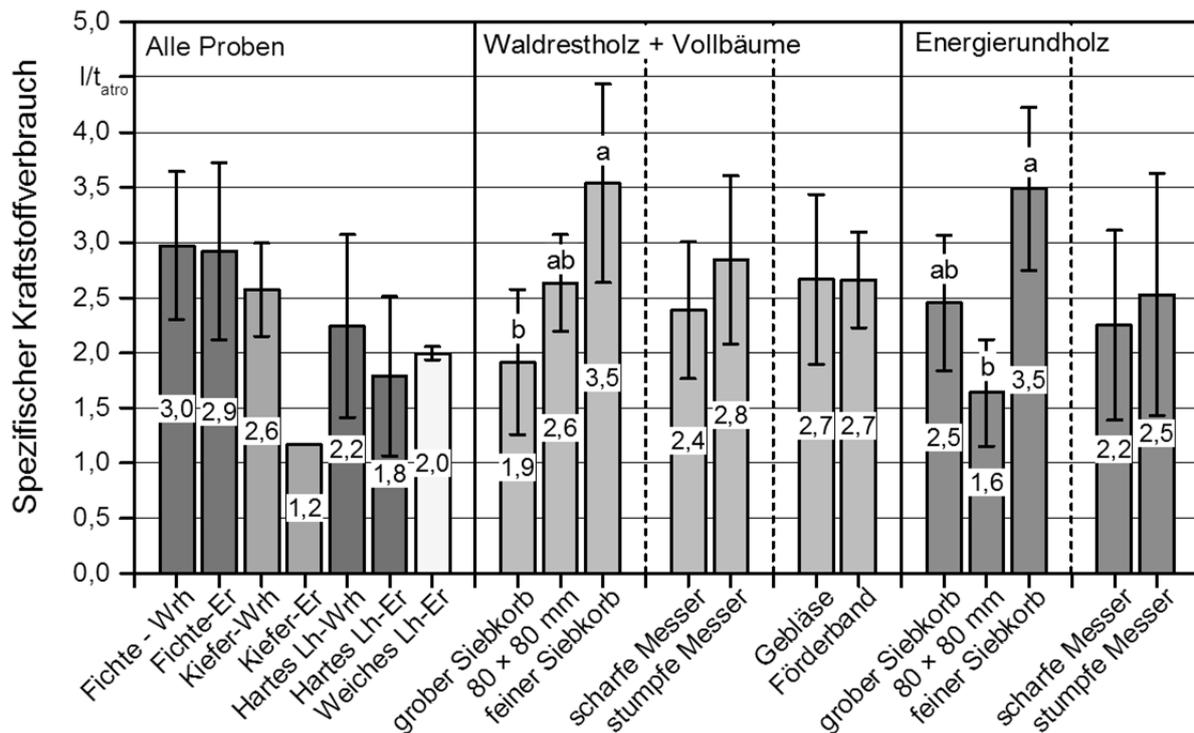


Abbildung 46: Spezifischer Kraftstoffverbrauch pro Trockenmasse (l/t_{atro}) für unterschiedliche Prozessvarianten beim Prozessschritt „Hacken“

Die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen sind mit Vorsicht zu ziehen, da z. B. der beobachtete negative Effekt feiner Siebkörbe auch durch die Leistungsklasse der Hacker bedingt sein kann. Feine Siebe werden vor allem bei der Produktion im privaten Bereich verwendet, bei der vornehmlich Hacker mit geringer Leistung zum Einsatz kommen. Auch waren viele Ergebnisse, z. B. der Einfluss der Messerschärfe, nicht signifikant. Um die beobachteten Trends genauer zu analysieren, wurde der Einfluss des Siebs, der Messerschärfe und anderer Prozessparameter auf den Energie- und Kraftstoffverbrauch in stationären Hackversuchen am TFZ gezielt abgestuft untersucht (siehe Kapitel 6).

Obwohl der Hacker als relativ energieintensiver Teil der Prozesskette erkannt wurde, lässt sich aus den bisherigen Ergebnissen wenig über seinen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz der Produktion sagen. Daher wurde in einem folgenden Schritt der spezifische Energieverbrauch für den Prozessschritt „Hacken“ (in % der im Holz gespeicherten

Energie) aus den gezeigten Ergebnissen berechnet. Hierzu wurde der Energiegehalt des Dieselverbrauchs, der für die Produktion einer Tonne Hackschnitzel benötigt wird, über den Heizwert und die Dichte des Kraftstoffs bestimmt (0,835 kg/l, 42,9 MJ/kg). Dieser wird zum Energiegehalt der dazugehörigen Tonne trockener Hackschnitzel ins Verhältnis gesetzt (berechnet für jede Feldstudie über den Heizwert der gewonnenen Hackschnitzelprobe, siehe Abschnitt 5.2.4.9). Insgesamt lag der spezifische Energieverbrauch des Prozessschrittes „Hacken“ pro Tonne Hackgut demnach zwischen 0,22 und 0,81 % der im Holz gespeicherten Energie (Mittelwert = $0,49 \pm 0,15$ %). Auffällig war, dass der spezifische Energieverbrauch der kleinen Anbauhacker (< 200 kW) mit $0,69 \pm 0,11$ % signifikant höher war als der Energieverbrauch der großen Anbauhacker (> 200 kW, $0,45 \pm 0,15$ %) sowie der selbstfahrenden Hacker und Chippertrucks ($0,49 \pm 0,11$ %, jeweils mit $p \leq 0,05$). Aus den Ergebnissen wird somit erneut die hohe Effizienz der leistungsstärkeren Maschinen ersichtlich.

5 Hackschnitzelqualität (physikalisch)

DANIEL KUPTZ, PETER TUROWSKI & HANS HARTMANN

Hackschnitzel zählen zu den kostengünstigeren biogenen Festbrennstoffen. Die Brennstoffqualität ist dabei für viele Produzenten und Konsumenten immer noch ein eher untergeordneter Punkt. Vor allem kleine Feuerungen sind auf hohe Brennstoffqualitäten angewiesen, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Auch steigende Anforderungen an das Emissionsverhalten der Anlagen (2. Stufe der BImSchV ab 2015) erhöhen die Ansprüche an einen sauberen, qualitativ hochwertigen Brennstoff. Ziel der hier präsentierten Untersuchung ist es daher, die physikalische Brennstoffqualität in Abhängigkeit des Rohmaterials und des Herstellungsprozesses aufzuzeigen und Empfehlungen für die Praxis zu erstellen. Die inhaltstoffliche Brennstoffqualität wird in TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“ gesondert behandelt.

5.1 Stand des Wissens

In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst erläutert, welche physikalischen Eigenschaften für die Qualität von Waldhackschnitzeln ausschlaggebend sind und welche Nachweismöglichkeiten sich für die Praxis ergeben. Anschließend wird auf mögliche technische und rohstoffbedingte Einflüsse eingegangen, welche die Hackschnitzelqualität schon während der Produktion im Wald beeinflussen könnten.

5.1.1 Definition Qualitätshackschnitzel

Qualitativ hochwertige Hackschnitzel zeichnen sich durch eine Reihe physikalischer Eigenschaften aus. Häufig findet man hierzu in der Literatur vereinfachte Auflistungen wie in Tabelle 54:

Tabelle 54: Typische Einteilung der Hackschnitzelqualität

Qualitätsparameter	„Gute“ Qualität	„Schlechte“ Qualität
Wassergehalt	niedrig	hoch
Aschegehalt	niedrig	hoch
Heizwert	hoch	niedrig
Partikelform	scharfkantig	rau
Feinanteil	niedrig	hoch
Überlängen	niedrig	hoch
Störstoffgehalt (Erde etc.)	niedrig	hoch
Grünanteil	niedrig	hoch

Für die unterschiedlichen Verwertungsoptionen gelten verschiedene Qualitätsanforderungen. Sind einzelne Parameter (z. B. niedriger Aschegehalt, geringe mineralische Verschmutzung) für sämtliche Anlagentypen wichtig, so sind andere vor allem für den Gebrauch in kleinen Hackschnitzelheizungen < 150 kW ausschlaggebend (niedriger Anteil an Feinmaterial und Überlängen, scharfkantige Partikelform). Vor allem hinsichtlich des optimalen Wassergehalts unterscheiden sich die Anforderungen der Feuerungsanlagen erheblich. Dieser kann zwischen 10 und 50 Ma-% liegen, abhängig davon, ob der Feuerraum für trockene oder waldfrische Hackschnitzel optimiert wurde. Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Qualitätsparameter eingegangen. Weiterführende Informationen finden sich u. a. im Handbuch „Bioenergie Kleinanlagen“ [75].

5.1.1.1 Qualitätsparameter Wassergehalt

Ein entscheidendes Qualitätsmerkmal von Waldhackschnitzeln ist der Wassergehalt der Brennstoffe (in Ma.-%). Er hat direkten Einfluss auf die tatsächlich nutzbare Wärmemenge, das Emissionsverhalten der Anlage, die Lagerfähigkeit der Brennstoffe und die Aschebildung während der Verbrennung [89]. Unter dem Wassergehalt versteht man das Verhältnis der Masse Wasser im Brennstoff bezogen auf die gesamte Biomasse:

$$w = \frac{m_w}{m_b + m_w} * 100 \quad \text{Formel [5-1]}$$

Hierbei gibt w den Wassergehalt in Ma-%, m_w die Masse Wasser im Brennstoff und m_b die Masse der trockenen Biomasse wieder.

Der Wassergehalt beeinflusst die Energieausbeute bei der Verbrennung. Das sich im Brennstoff befindliche Wasser muss bei der Verbrennung unter Einsatz von Wärmeenergie verdampft werden. Diese Wärmeenergie kann in der Regel nicht zurückgewonnen werden, weil Heizungskessel mit Kondensationswärmetauscher (d. h. sogenannte „Brennwertfeuerungen“) zurzeit nur eine untergeordnete Rolle spielen (siehe Abschnitt 5.1.1.3). In einigen Fällen kann komplett darrtrockenes oder stark übertrrocknetes Holz ebenfalls nachteilig für die Verbrennung sein und sollte vermieden werden. Dies gilt vor allem für Scheitholz in Einzelraumfeuerungen [178]. Weiterhin findet bei Wassergehalten unter 20 Ma-% keine Zersetzung des Brennstoffs durch holzerstörende Pilze mehr statt, wodurch Biomasseverluste während der Lagerung und die Bildung gesundheitsschädlicher Sporen minimiert werden [92].

Frische Waldhackschnitzel weisen häufig Wassergehalte von mehr als 50 Ma-% auf, wohingegen technisch oder natürlich vorgetrocknete Hackschnitzel deutlich niedrigere Werte von 10 bis 35 Ma-% haben können. Komplett darrtrockene Hackschnitzel unter 10 Ma-% Wassergehalt werden ohne Warmlufttrocknungsverfahren in der Praxis dagegen nicht erreicht [90].

5.1.1.2 Qualitätsparameter Aschegehalt

Unter dem Aschegehalt (in Ma.-%) versteht man die Menge an Asche, die bei der vollständigen Verbrennung des Brennstoffs in der Feuerung verbleibt [89]. Hierbei gibt es qualitativ große Unterschiede sowohl in der Struktur der verbleibenden Asche (pulverförmig, Schlacke) als auch in der chemischen Zusammensetzung (z. B. beim Gehalt an Schwermetallen). Die anfallende Asche zählt rechtlich als Abfall bzw. bei starker Schwermetallbelastung als „gefährlicher Abfall“ im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, der fachgerecht entsorgt werden muss. Abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung wird Asche stofflich verwertet (z. B. als Düngemittelbestandteil oder als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung) oder auf geeigneten Deponien (ggf. unter Tage) entsorgt. Hierdurch fallen für die Betreiber mitunter erhebliche Kosten an.

Hohe Anteile an Asche können auch für die Anlagentechnik problematisch sein. So führen hohe Mengen hochreaktiver Elemente (z. B. Chlor) zu Korrosion und Verschleiß der Feuerungen. Auch das Anhaften und Agglomerieren der entstehenden Schlacke kann mechanische Störungen und erhebliche Kosten hervorrufen [89]. Auf die inhaltstoffliche Brennstoff- und Aschequalität wird in TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“ gesondert eingegangen.

Für Waldhackschnitzel liegt der Aschegehalt zwischen 0,3 und 5,0 Ma.-%, abhängig davon ob reines Holz oder Holz mit hohen Anteilen an Rinde, Nadeln und Blätter verbrannt wird. Bei erheblichen Erdanhaftungen kann der Aschegehalt sogar über 10 Ma.-% liegen.

5.1.1.3 Qualitätsparameter Heizwert

Die bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte Wärme wird als Brennwert oder als Heizwert angegeben. Unter dem Brennwert (auch „oberer Heizwert“ in MJ/kg) versteht man die absolute Menge an Energie (in MJ), die bei der Verbrennung einer festgelegten Menge an Brennstoff (in der Regel 1 kg) freigesetzt wird. Der Brennwert beinhaltet neben der freigesetzten Wärme auch die Energie, die sich in Form von Wasserdampf im Abgas befindet und mittels Kondensationswärmetauscher in manchen Anlagen als Wärme genutzt werden kann („Brennwerttechnik“). Beim Heizwert (auch „unterer Heizwert“ in MJ/kg) wird dagegen davon ausgegangen, dass die Energie im Wasserdampf nicht genutzt werden kann und mit dem Abgas verloren geht [89].

Der Heizwert ist linear abhängig vom Wassergehalt der Brennstoffe, da das Verdampfen des Wassers einen erheblichen Energieaufwand benötigt. Standardmäßig wird der Heizwert daher für absolut trockene Brennstoffe angegeben, er kann daraus für jeden beliebigen Wassergehaltszustand errechnet werden.

Neben dem Wassergehalt hat das verwendete Rohmaterial, z. B. die Holzart, Einfluss auf den Heizwert. Die zu erwartenden Werte für Hackschnitzel auf wasserfreier Basis liegen normalerweise zwischen 18,0 und 19,5 MJ/kg. Nur bei hoher mineralischer Verschmutzung oder bei selektivem Ligninabbau durch spezielle Pilze während der Lagerung kann der Heizwert auch nennenswert darunter liegen. Den höchsten Heizwert

einheimischer Hauptbaumarten hat die Kiefer aufgrund ihres hohen Gehalts an Lignin und Harz mit ca. 19,2 MJ/kg. Daneben ist das Mischungsverhältnis von Nadeln, Rinde und Holz ausschlaggebend, da der Heizwert von Nadeln und teilweise auch von Rinde aufgrund hoher Extraktstoffanteile deutlich höher liegt als der von reinem Holz [89].

5.1.1.4 Qualitätsparameter Partikelgröße und Partikelform

Neben Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert sind die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform für private und kommunale Heizanlagen wichtig [149][151]. Hohe Anteile an Feinmaterial (< 3,15 mm Durchmesser), aber auch an Überlängen (> 120 mm Länge) können im erheblichen Maße das Fließverhalten der Brennstoffe beeinflussen und führen zum Verstopfen der Förderschnecken [89] sowie zur Bildung von Hohlräumen im Lager [101]. Letzteres, als „Brückenbildung“ bezeichnetes Phänomen wird auch durch die Partikelform beeinflusst, wobei scharfkantig geschnittene Hackschnitzel ein deutlich besseres Fließverhalten aufweisen [101]. Scharfkantige Hackschnitzel bieten zudem weniger Angriffsflächen für holzerstörende Pilze, wodurch Biomasseverluste durch Abbauprozesse im Lager, aber auch gesundheitliche Belastungen für die Betreiber durch Sporenflug minimiert werden [92][161]. Große Mengen an Feinmaterial können vor allem beim Befüllen der Lagerräume hohe Staubemissionen hervorrufen und (bei sehr trockenen Brennstoffen) die Brandgefahr erhöhen. Insgesamt ist somit für kleinere Anlagen, d. h. im privaten oder kommunalen Bereich, eine geringe Menge an Feinmaterial, aber auch ein geringer Anteil an Überlängen ausschlaggebend für einen reibungslosen Betrieb [152]. Die Hackschnitzel sollten dabei eine gleichmäßige, scharfkantige Form aufweisen.

5.1.1.5 Qualitätsparameter Fremdanteil

Unter dem Fremdanteil versteht man den prozentualen Anteil an Material, der nicht zum Brennstoff gezählt wird. Hierzu zählen neben Metallteilen, Steinen und Müll (grober Fremdanteil), die unbeabsichtigt mitgehackt werden können, vor allem Anhaftungen von Humus und Mineralboden (feiner Fremdanteil), die durch den Transport des ungehackten Holzes und bei der Zwischenlagerung im Wald am Rohmaterial haften bleiben.

Der grobe Fremdanteil wirkt sich vor allem negativ auf den eigentlichen Hackprozess aus, da Steine oder Metallteile den Hacker, aber auch die Förderschnecken der Heizsysteme beschädigen können. Hierbei kann es bis zum Totalausfall des Geräts kommen. Erdanhaftungen führen zu einem erhöhten Verschleiß an den Hackermessern und erhöhen den Aschegehalt bei der Verbrennung. Weiterhin können sich durch Fremdkörper und Erdanhaftungen die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs und damit auch das Ascheerweichungsverhalten negativ verändern, z. B. durch die Anreicherung mit Silizium oder Schwermetallen (siehe auch TFZ-Bericht „Qualität von Holz hackschnitzeln aus Bayern“).

5.1.1.6 Produktnormen für feste Brennstoffe

Die Brennstoffqualität von Hackschnitzeln lässt sich mithilfe internationaler Normen beschreiben. In der Praxis werden drei Regelwerke angewendet, die ÖNorm M7133 [159], die DIN EN 14961 [48][49] und die DIN EN ISO 17225 [58][61]. Durch Veröffentlichung der ISO-Norm im Jahr 2014 werden die beiden erstgenannten Normen ihre Gültigkeit verlieren, weshalb im Folgenden nur auf die ISO-Norm eingegangen wird.

Die DIN EN ISO 17225 gliedert sich in sieben Teile. In Teil 1 (DIN EN ISO 17225-1 [58]) werden pflanzliche Rohmaterialien für biogene Festbrennstoffe hinsichtlich Pflanzenart, Herkunft und Sortiment klassifiziert. Daneben finden sich hier die allgemeinen Beschreibungen der Rohstoffsortimente, z. B. hinsichtlich ihres Heizwerts, Aschegehalts oder ihrer chemischen Zusammensetzung, sowie allgemeine Spezifikationen möglicher Brennstofftypen, z. B. von Briketts, Pellets oder Hackschnitzel für den industriellen Gebrauch. Genauere Brennstoffanforderungen für den Handel werden in den folgenden Teilen 2 bis 7 festgelegt. Für die private Nutzung von Hackschnitzeln als Brennstoff ist beispielsweise Teil 4 der Norm, d. h. die DIN EN ISO 17225-4 [61], ausschlaggebend. Darin werden hochwertige Produktqualitäten (Klasse A1 bis B2) definiert, die genaue Anforderungen an die Partikelgrößenverteilung, den Aschegehalt oder die chemischen Zusammensetzung festlegen. Daneben sind die dafür einzusetzenden Rohmaterialien eingeschränkt. So ist z. B. der Einsatz von Waldrestholz und schwachem Stammholz für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel ab Klasse A1 erlaubt, KUP-Holz von möglicherweise belasteten Standorten aber erst ab Klasse B1 zugelassen.

Kesselhersteller, Hackschnitzelproduzenten und Brennstoffkunden können sich an den Vorgaben aus der DIN EN ISO 17225-4 [61] orientieren, um den optimalen Brennstoff für die jeweilige Feuerung zu definieren, zu produzieren oder zu erwerben. In weiterführenden Prüfnormen werden die notwendigen Messmethoden beschrieben, mithilfe derer sich die definierten Qualitätsparameter einheitlich nachweisen lassen (siehe Kapitel Material & Methoden 5.2.4). Die Verwendung der DIN EN ISO 17225-4 erfolgt freiwillig, eine gesetzliche Verpflichtung besteht nicht.

5.1.1.7 Qualitäts- und Nachhaltigkeitsnachweise für die Praxis

Aufgrund der Komplexität der gängigen Produktnormen für biogene Festbrennstoffe und um den Kauf hochwertiger Hackschnitzel für private und kommunale Kunden ohne forstlichen Hintergrund zu vereinfachen, wurden und werden leicht verständliche Nachweismöglichkeiten für den Handel erarbeitet. Tabelle 55 fasst dabei bereits verfügbare und sich in Bearbeitung befindende Gütesiegel/Zertifikate für Premium-Holz hackschnitzel zusammen. Die Zielsetzung eines Gütesiegels für qualitativ hochwertige Hackschnitzel ist es, die Produkthanforderungen aus den Normen unter einem Symbol bzw. unter einer Produktbezeichnung zusammenzufassen und somit dem Endkunden die Einarbeitung in die umfangreichen Regelwerke zu ersparen. Bisher konnte sich jedoch noch keines der Gütesiegel in der Praxis durchsetzen.

Anstelle der Zertifizierung des Endprodukts gibt es auch die Möglichkeit, die komplette Bereitstellungskette mit einem umfassenden Qualitätsmanagement zu begleiten, um durch regelmäßige interne und externe Kontrolle nach ISO 9001 [40] eine hohe Brennstoffqualität zu gewährleisten [125]. Voraussetzung ist die ausführliche und regelmäßige Schulung aller an der Bereitstellungskette beteiligten Personen von der Holzernte bis zum Transport der produzierten Hackschnitzel zum Endkunden.

Tabelle 55: Verfügbare und sich in Bearbeitung befindliche Gütesiegel/Zertifikate für qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel

Gütesiegel/Zertifikat	Zertifizierter Inhalt
ENPlus-Siegel des DEPI (in Bearb.)	Brennstoffqualität (international)
RAL Umweltzeichen 153 „Blauer Engel“ [38]	Klima- und Ressourcenschutz, Brennstoffqualität, niedrige Emissionen
RAL Gütezeichen 244 „Wald- und Landschaftspflege“	Umweltschutz und Arbeitssicherheit
RAL Gütezeichen 451 „Qualitäts-Brennholz“ [39]	Brennstoffqualität

Neben dem Nachweis einer hohen Brennstoffqualität werden zukünftig vor allem für den internationalen Handel mit biogenen Festbrennstoffen Zertifikate und Nachweismöglichkeiten für eine nachhaltige, klima- und ressourcenschonende Brennstoffproduktion unabdingbar sein. Inwieweit dies von gesetzlicher Seite vorgeschrieben wird und ob aktuelle oder an eine nachhaltige Energieholznutzung angepasste forstliche Zertifizierungssysteme wie PEFC und FSC hierfür relevant sein werden, bleibt abzuwarten.

5.1.2 Beeinflussung der Hackschnitzelqualität

Die Qualität von Waldhackschnitzeln kann an vielen Stellen innerhalb der Prozesskette positiv und negativ beeinflusst werden. Dabei haben sowohl die angewendeten Verfahren als auch die verwendeten Rohstoffe Auswirkungen auf das Endprodukt [6][74][89][135][149][151][188][189]. Im Folgenden wird auf mögliche Einflüsse während der Produktion im Wald eingegangen. Weiterführende Aufbereitungsverfahren, z. B. das Sieben oder Trocknen der Brennstoffe, werden in diesem Kapitel nicht behandelt. Auf das Thema „Technische Trocknung von Waldhackschnitzeln“ wird in Kapitel 7 separat eingegangen.

5.1.2.1 Herstellungsbedingte Einflüsse

Die Wahl der Maschine, die bei der Herstellung von Waldhackschnitzeln Anwendung findet, hat im erheblichen Maße Einfluss auf die Qualität des Brennstoffs [74][188]. Die Spanne möglicher hackerbedingter Einflussgrößen ist dabei weit. Zunächst wird unter-

schieden, ob ein Hacker oder ein Schredder verwendet wird. Während ein Hacker unter Verwendung schneidender Werkzeuge (Messer) Hackschnitzel mit scharfen Kanten herstellt, entsteht beim Schreddern durch die Verwendung stumpfer Werkzeuge zerfasertes Schredderholz (siehe Abbildung 47).

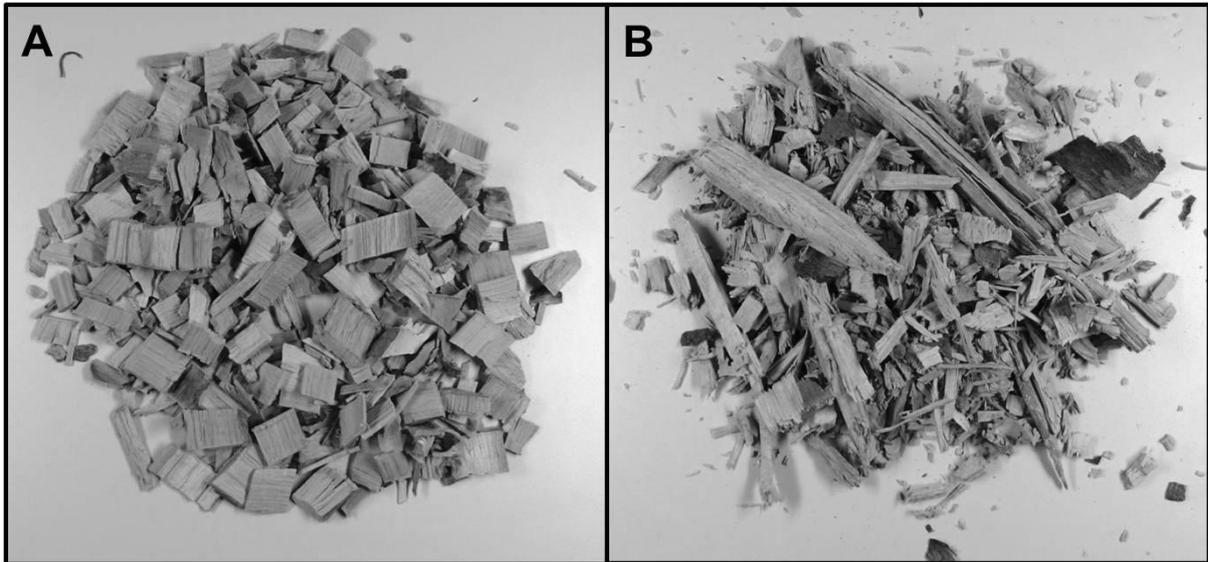


Abbildung 47: Hackschnitzel (A) und Schredderholz (B) aus Buche-Energierundholz (80 × 80 mm Siebkorb)

Hacker unterteilen sich in die drei Haupttypen: Trommel-, Scheibenrad- und Schneckenhacker, abhängig von der Konstruktion des Schneidaggregats (siehe Abbildung 48).

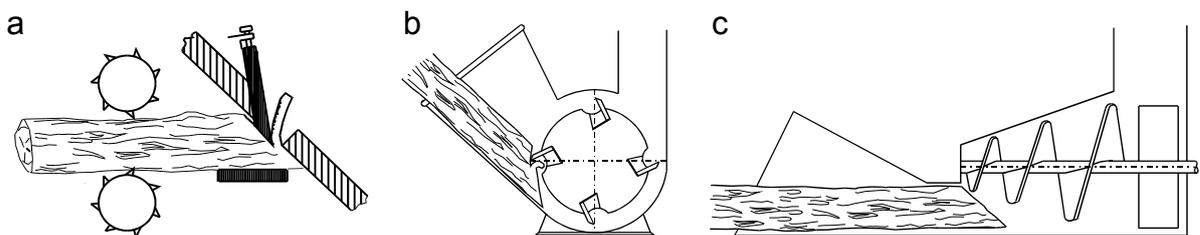


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Schneidtechnik von (A) Scheibenradhackern, (B) Trommelhackern und (C) Schneckenhackern (aus Handbuch „Bioenergie Kleinanlagen“ [75])

Tabelle 56 gibt eine Auswahl an hackerbedingten Parametern wieder, die einen möglichen Einfluss auf die Hackschnitzelqualität haben können.

Tabelle 56: Beschreibung maschinenbedingter Prozessparameter und ihr möglicher Einfluss auf die Qualität von Waldhackschnitzeln[74][89][148][149][151][188][189]

Einfluss/Parameter	Erwarteter Einfluss auf die Hackschnitzelqualität
Maschinentyp	Hacker erzeugen scharfkantige Hackschnitzel, Schredder stellen faseriges Schredderholz her.
Schneidaggregat	Hacker unterteilen sich in Trommel-, Scheibenrad- und Schneckenhacker mit jeweils unterschiedlicher Schneidtechnik.
Messerschärfe	Scharfe Messer erzeugen Hackschnitzel, mit stumpfen Messern wird teilweise auch Schredderholzqualität erzeugt.
Messeranzahl	Je nach Hackertyp liegt die Messeranzahl zwischen 1 und 4 (Scheibenrad) bzw. zwischen 2 und 40 (Trommel). Mit zunehmender Messerzahl erhöhen sich die Schnitte pro Umdrehung.
Drehzahl	Eine Erhöhung der Drehzahl des Schneidaggregats erhöht die Anzahl der Schnitte je Meter eingezogenen Holzes.
Einzugsgeschwindigkeit	Eine Erhöhung der Einzugsgeschwindigkeit verringert die Anzahl der Schnitte je Meter eingezogenen Holzes.
Siebkorböffnung	Prallsiebe dienen der Nachzerkleinerung der Hackschnitzel. Sie beeinflussen die durchschnittliche Größe sowie den Anteil an Feinmaterial und Überlängen.
Trommelbauweise	Das Schneidaggregat (Trommelkörper) kann durchlässig für Hackschnitzel sein. Es wird dadurch insgesamt leichter. Bei offenen Trommeln kommt es dabei mitunter zu einer weiteren Zerkleinerung des Brennstoffs durch Prallzerkleinerung im Innenraum der Trommel.
Messeranordnung	Durchgehende Messer sorgen für gleichmäßigere Hackschnitzel mit weniger Ausbrüchen als versetzt angeordnete Messer.
Schnittlänge	Die Vergrößerung der Öffnungsweite zwischen Messer und Gegenschneide erhöht die Partikelgröße.
Hackerschnecke	Größere Steigungen der Hackerspirale erhöhen die Hackschnitzelgröße.
Auswurfsystem	Auswurfssysteme, die mit hoher Fördergeschwindigkeit arbeiten (z. B. Fördergebläse mit Wurfschaufeln), erhöhen den Feinanteil durch zusätzliche Prallzerkleinerung der Hackschnitzel.

Neben hackerbedingten Einflüssen hat der Erfahrungsgrad des Maschinenführers erheblichen Einfluss auf die Brennstoffqualität. Unsachgemäße Kranarbeit kann z. B. einen Eintrag an Mineralboden und damit eine Erhöhung des Aschegehalts zur Folge haben. Auch sollten Trommelhacker konstant befüllt werden, da sich beim Leerlaufen der Hackertrommel überlange Partikel aufstellen und dadurch das Prallsieb passieren können.

5.1.2.2 Rohstoffbedingte Einflüsse

Zusätzlich zu den herstellungsbedingten Einflussgrößen kommt es zu erheblichen Qualitätsunterschieden aufgrund der verwendeten Holzart und des ausgewählten Holzsortiments (Tabelle 57) [6][74][148][189]. Biogene Festbrennstoffe werden dabei gemäß DIN EN ISO 17225-1 [58] nach dem Pflanzentyp (z. B. Nadel- und Laubholz), dem Sortiment (z. B. Vollbäume mit und ohne Wurzeln, Stammholz, Waldrestholz) und hinsichtlich ihrer Herkunft (z. B. Holz aus Kurzumtriebsplantagen) klassifiziert.

In Bayern fällt Energieholz für Hackschnitzel hauptsächlich in Form von Waldrestholz der Baumart Fichte an [83]. Durch den Umbau der Waldstrukturen von Nadel- zu Laubwäldern wird langfristig der Laubholzanteil steigen. Gerade der Anteil weicher Laubhölzer wird auch durch eine vermehrte Nutzung von Vorwäldern und Kurzumtriebsplantagen zunehmen. Aufgrund steigender Energiepreise werden zudem „Energierundholz“, d. h. schwaches Stammholz ohne Äste, Nadeln oder Blätter, sowie holzige Biomasse aus der Pflege von Straßen, Stromtrassen, der Landschaftspflege und dem Siedlungsraum als Brennstoff interessant. Während Ersteres zu den sehr hochwertigen Rohmaterialien im Sinne der DIN EN ISO 17225-4 [61] zählt, wird Letzteres allgemein als weniger hochwertiger Brennstoff eingestuft. Die Bandbreite möglicher Sortimente für Waldhackschnitzel ist dementsprechend sehr umfangreich [83].

Tabelle 57: Beschreibung rohstoffbedingter Parameter und ihr möglicher Einfluss auf die Qualität von Waldhackschnitzeln [149][151][89]

Parameter	Erwarteter Einfluss auf die Hackschnitzelqualität
Baumart	Durch die Baumart ist die Rohdichte des Holzes in etwa festgelegt, wodurch der Energiegehalt je Volumeneinheit sowie die chemische Zusammensetzung beeinflusst werden. Weiche Holzarten tendieren dazu, beim Hacken stärker zu reißen als hartes Holz.
Sortiment	Nadeln, Blätter, dünne Äste und Rinde unterscheiden sich vom reinen Stammholz hinsichtlich ihres Aschegehalts, ihrer chemischen Zusammensetzung und ihres Heizwerts.
Standort	Die Rohdichte und die Elementarzusammensetzung der Brennstoffe ändern sich abhängig vom Bodentyp, pH-Wert, Wassergehalt und dem Anteil an Schwermetallen am Standort.
Trocknungszustand	Holz kann frisch oder im vorgetrockneten Zustand gehackt werden.
Erданhaftungen	Verschmutzung durch Humus und Mineralboden erhöhen den Aschegehalt und den Gehalt verbrennungskritischer Elemente.
Grobe Fremdkörper	Metallteile, Steine und Abfall führen zu Beschädigung und Verstopfung der Hacker und der Heizanlagen.

5.2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen der Hackschnitzelqualität wurde eine große Bandbreite an Brennstoffproben bei Feldversuchen und bei stationären Hackversuchen am TFZ hergestellt. Zu jeder Probe wurden umfangreiche Datensätze über den Herstellungsprozess, sowie zur Art und Herkunft des Rohmaterials zusammengetragen. Alle Proben wurden auf ihre physikalischen Brennstoffeigenschaften hin analysiert.

Insgesamt wurden 152 Proben während des Projekts untersucht. Dabei stammten 36 Hackschnitzelproben aus Feldversuchen im Wald, 8 aus der Ernte von Kurzumtriebsplantagen, 8 aus der Pflege von Straßenrändern und Stromtrassen sowie 26 Proben aus dem Siedlungsbereich. Daneben wurden 58 Proben mit einem elektrisch betriebenen Trommelhacker und 16 weitere Proben mittels unterschiedlicher zapfwellenbetriebener Hacker der mittleren Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ erzeugt.

5.2.1 Feldmessungen

Die Feldmessungen fanden von September 2011 bis Mai 2013 zeitgleich mit den Aufnahmen der Zeitstudien aus Abschnitt 4.3.4 statt. Bei jeder Feldmessung wurde eine ca. 0,5 m³ große Hackschnitzelprobe gewonnen. Die Probenahme erfolgte dabei in der Regel direkt vom Lkw oder am liegenden Haufwerk. Das Verfahren orientierte sich nach DIN EN 14778 [52], wobei jeweils von unterschiedlichen Positionen im Container bzw. in der Schüttung Teilproben genommen und in einen Big Bag überführt wurden (Teilprobenmenge = 20 l, n = 25). Die Probenahme erfolgte mit einer Maisgabel mit engem Zinkenabstand.

Zu jeder Hackschnitzelprobe wurde ein umfassender Steckbrief hinsichtlich Herkunft und Art des Rohmaterials erstellt. Die Klassifizierung des Rohmaterials erfolgte optisch am Hackholzpolter in Anlehnung an DIN EN ISO 17225-1 [58]. Alle untersuchten Sortimente fielen dabei per Definition in die Gruppe 1.1 „Wald- und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz“ in der Kategorie 1 „Holzartige Biomasse“ (siehe Tabelle 58). Die Unterkategorien „1.1.2 Vollbäume mit Wurzeln“ und „1.1.5 Stümpfe/Wurzeln“ wurden aufgrund aktueller Diskussionen zu Nährstoffbilanzen und aufgrund ihrer geringen Relevanz als Brennstoff in Bayern nicht untersucht. Ebenso wurde das Sortiment „1.1.6 Rinde“ als nicht praxisrelevant für die Produktion von Waldhackschnitzeln angesehen.

Zusätzlich zu der systematischen Einteilung des Rohmaterials wurde für jedes Polter eine schriftliche Beschreibung zum Polteraufbau und zur Baumartenmischung erarbeitet. Die Herkunft des Materials (z. B. Verjüngungsnutzung, Auslesedurchforstung etc.) wurde vom zuständigen Revierleiter erfragt. Die Befragung der Förster erfolgte dabei durch die LWF.

Tabelle 58: Einteilung der untersuchten Sortimente der Feldmessungen nach DIN EN ISO 17225-1

1 Holzartige Biomasse – 1.1 Wald und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz

1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln	1.1.1.1 Laubbaumholz
	1.1.1.2 Nadelbaumholz
	1.1.1.3 Kurzumtriebs-Plantagenholz
	1.1.1.4 Büsche
	1.1.1.5 Definierte und undefinierte Mischungen
1.1.3 Stammholz	1.1.3.1 Holz mit Rinde, Laubbaumholz
	1.1.3.2 Holz mit Rinde, Nadelbaumholz
	1.1.3.5 Definierte und undefinierte Mischungen
1.1.4 Waldrestholz	1.1.4.1 Frisch/grün, Laubbaumholz (mit Blättern)
	1.1.4.2 Frisch/grün, Nadelbaumholz (mit Nadeln)
	1.1.4.3 Gelagert, Laubbaumholz
	1.1.4.4 Gelagert, Nadelbaumholz
	1.1.4.5 Definierte und undefinierte Mischungen
1.1.7 Sortiertes Holz aus Gärten, Parks, Straßenrandpflege, Wein- und Obstgärten	
1.1.8 Definierte und undefinierte Mischungen	

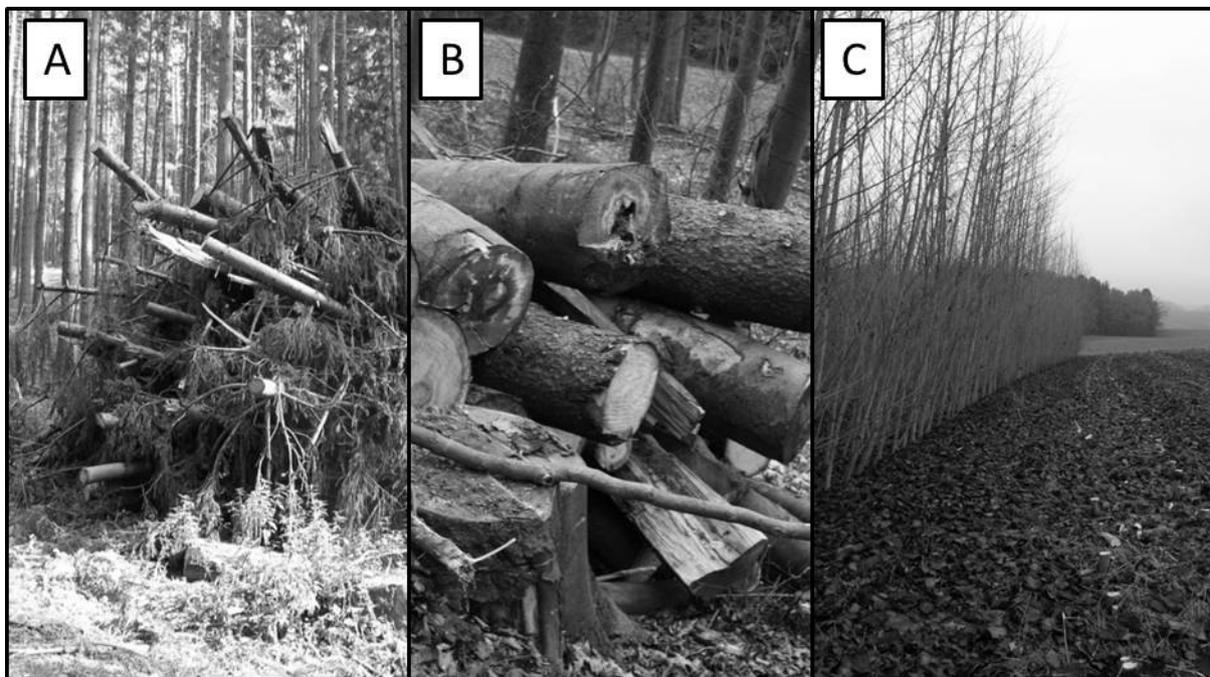


Abbildung 49: Unterschiedliche Rohmaterialien für die Produktion von Hackschnitzeln (A = Waldrestholz Fichte 1.1.4.2, B = Energierundholz Buche 1.1.3.1, C = Pappel-Kurzumtriebsplantagenholz 1.1.1.3)

Neben Informationen zu Art und Herkunft des Rohmaterials wurden zu jeder Hackschnitzelprobe die bei der Produktion verwendeten Maschineneinstellungen anhand von Befragungen der Maschinenführer im Wald erfasst (Tabelle 59). Jeder Einsatz wurde fotografisch dokumentiert und die Adressen der Lohnunternehmer und Hackgutempfänger für weitere Nachfragen notiert.

Tabelle 59: Aufgenommene Maschinendaten zu jeder Hackschnitzelprobe (Checkliste)

Aufnahmeparameter	Wert / Variante
Maschinenhersteller	Name
Maschinentyp	Typenbezeichnung und ggf. Typen-Nr.
Alter der Maschine	Alter in Jahren (a)
Hacktechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Trommelhacker (geschlossene Trommel) - Trommelhacker (offene Trommel) - Scheibenradhacker - Schneckenhacker - Feldhäcksler - Schredder
Austragssystem	<ul style="list-style-type: none"> - Gebläse - Förderband - Förderschnecke
Antriebssystem	<ul style="list-style-type: none"> - Selbstfahrend (Lkw) - Selbstfahrend (Hacker) - Anhänger (Antrieb über Zapfwelle) - Anhänger (Antrieb über eigenen Motor)
Art der Trägermaschine	<ul style="list-style-type: none"> - Selbstfahrender Hacker - Lkw - Traktor/Schlepper - Unimog
Antriebsleistung der Trägermaschine	Leistung in kW
Drehzahl der Hackertrommel	Drehzahl in U/min
Messerschärfe	<ul style="list-style-type: none"> - neuwertig - geschärft - unscharf (inkl. letzter Schärfungszeitpunkt)
Siebkorbeinsatz	Form und Größe der Löcher in mm

Bei den Feldmessungen wurde nicht steuernd in die verwendeten Maschineneinstellungen eingegriffen, um die in Bayern üblichen Produktionsbedingungen vor Ort so praxisnah wie möglich darzustellen.

5.2.2 Stationäre Hackversuche (elektrischer Trommelhacker)

Zu drei Zeitpunkten im Jahr 2012 (Februar, Juni und September) wurden am Betriebsgelände des TFZ Hackschnitzelproben zu jeweils ca. 0,5 m³ mit einem elektrisch betriebenen Trommelhacker hergestellt. Ziel war es, den Einfluss ausgewählter Prozessparameter (Messerschärfe, Siebkorbeinsatz, Einzugswalzengeschwindigkeit, Holzart und Trocknungszustand des Holzes) direkt nachzubilden.

5.2.2.1 VecoPlan-Trommelhacker

Die Hackschnitzel wurden mit einem elektrisch angetriebenen stationären Trommelhacker (VecoPlan-Trommelhacker Typ VTH 45/12/2, Bad Marienberg) produziert (Abbildung 50, Tabelle 60).

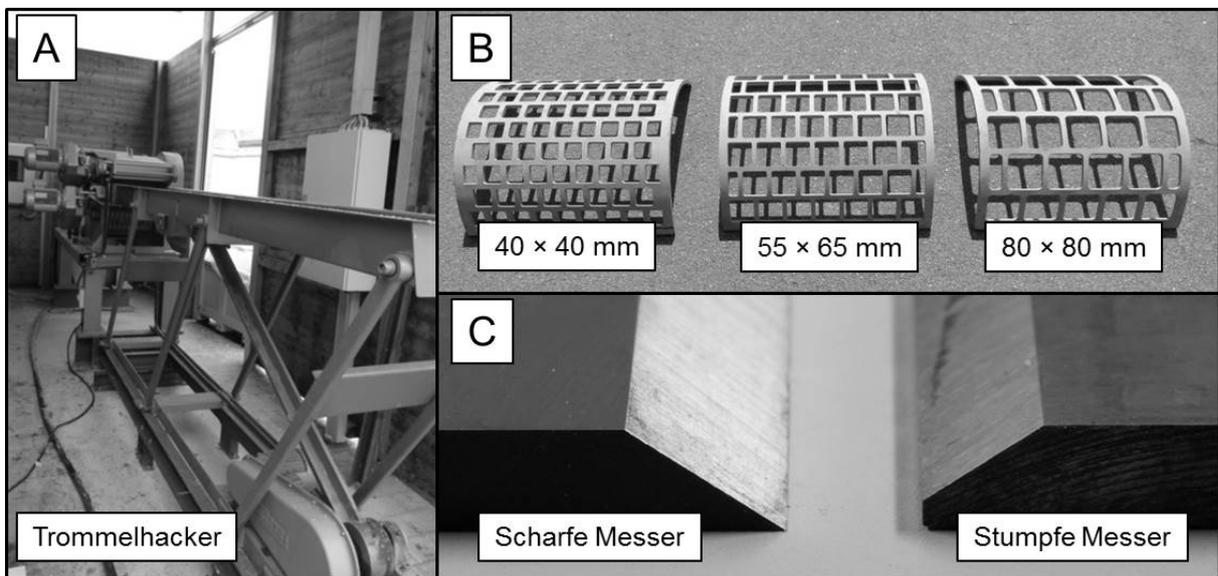


Abbildung 50: Vecoplan-Trommelhacker VTH 45/12/2 (A), verwendete Siebkörbe (B) und Messersätze (C)

Das Holz wurde dabei manuell über eine Vibrorinne und zwei Einzugswalzen zugeführt. Die Einzugswalzengeschwindigkeit kann stufenlos von 9,8 bis 25,5 m/min eingestellt werden. Die Beschickung erfolgte konstant. Aus Sicherheitsgründen, z. B. bei zu starker Abbremsung der Hackertrommel aufgrund von Überlastung des Hackers, stoppen die Einzugswalzen automatisch für kurze Zeit, damit die Hackertrommel leerlaufen kann. Der Hacker ist nicht mit einem gesonderten Austragssystem ausgestattet. Die produzierten Hackschnitzel fallen direkt unterhalb der Hackertrommel durch den jeweiligen Siebkorbeinsatz in eine Kiste (ca. 0,5 m³ Innenvolumen), sie mit einem Big Bag ausgelegt wurde.

Tabelle 60: Technische Daten des elektrischen Trommelhackers am TFZ

VecoPlan-Trommelhacker

Typ	VTH 45/12/2
Baujahr	1993
Einlaufbreite	450 mm
Einlaufhöhe	120 mm
Einzugswalzen	2
Rotordurchmesser	400 mm
Rotordrehzahl	600 U/min
Einzugsgeschwindigkeit	9,8–25,5 m/min
Antriebsleistung	max. 30 kW
Masse	ca. 1.800 kg
Messeranzahl	2
Siebkorbeinsätze	40 × 40 mm Quadratloch 55 × 65 mm Rechteckloch 80 × 80 mm Quadratloch 15 mm Rundloch

5.2.2.2 Messerschärfe, Siebkorb und Einzugswalzengeschwindigkeit

Der stationäre Trommelhacker am TFZ wurde sowohl mit scharfen als auch mit stumpfen Messern betrieben (siehe Abbildung 50). Für die Versuche mit scharfen Messern wurden werksneue oder über eine Werkzeugschleiferei im Raum Straubing nach Herstellerangaben nachgeschärfte Messersätze verwendet. Die Messer wurden regelmäßig nach etwa fünf bis sechs Probenchargen gewechselt. Für die Versuche mit stumpfen Messern wurde ein Satz scharfer Messer gezielt stumpf geschliffen. Hierzu wurde von der Messerschneide eine 3 mm breite vertikale Kante durch die Werkzeugschleiferei abgeschnitten (siehe Abbildung 50).

Der Trommelhacker wurde mit einem von vier Siebkörben bzw. ohne Sieb betrieben. Als Siebkörbe wurden Rechtecklochsiebe mit den Lochbreiten 40 × 40 mm, 55 × 65 mm und 80 × 80 mm verwendet (siehe Abbildung 50). Zusätzlich wurden einmalig zwei Proben mit einem 15 mm Rundlochsieb hergestellt (siehe Anhang 9.4). Die Einzugswalzengeschwindigkeit konnte stufenlos von 9,8 bis 25,5 m/min eingestellt werden. Standardgemäß wurden in den Versuchsreihen zwei Einzugswalzengeschwindigkeiten (9,8 m/min und 19,7 m/min) verwendet. Für Einzelversuche wurden zusätzlich die Geschwindigkeiten 14,3 und 25,5 m/min untersucht (siehe Anhang 9.4).

5.2.2.3 Rohmaterial

Der verwendete Trommelhacker ist für Sägereistholz konzipiert und hat eine maximale Einschuböffnung von 12 cm. Für die Versuche wurde daher Energierundholz mit einem

Maximaldurchmesser von 12 cm verwendet. Gehackt wurden 2 m lange Stämme von fünf verschiedenen Baumarten (Fichte, Buche, Kiefer, Birke und Pappel). Das Holz stammte von lokalen Forstunternehmen oder, im Fall der Pappel, aus Kurzumtriebsplantagen der LWF. Für jede Holzart wurde Holz aus derselben Charge verwendet. Jede Holzart wurde zu drei Zeitpunkten im Jahr 2012 gehackt (Februar, Juni und September), wodurch der Wassergehalt des Rohmaterials schrittweise reduziert wurde. Die Lagerung erfolgte überdacht in einem gut durchlüfteten Lagerraum.

Zusätzlich zu den fünf standardmäßig verwendeten Baumarten konnte einmalig im Juni 2012 Robinie gehackt werden. Das Material stammte ebenfalls aus Kurzumtriebsplantagen der LWF.

5.2.2.4 Zusammenfassung des Messprogramms

Tabelle 61 fasst die untersuchten Prozessparameter zusammen, die zu allen drei Zeitpunkten untersucht wurden. Als Referenzvariante wurde für alle Baumarten die Prozesseinstellung „80 × 80“ gewählt. Die Variationen zu Messerschärfe, Siebkorbinsatz und Einzugswalzensgeschwindigkeit wurden ausschließlich für die Baumarten Buche und Fichte untersucht.

Neben dem Standardmessprogramm wurden einmalig weitere Kombinationen ohne Siebkorb (z. B. stumpfe Messer, andere Baumarten) in das Programm integriert. Daneben wurden weitere Einzugswalzensgeschwindigkeiten (14,3 und 25,5 m/min) und das 15 mm Rundlochsieb untersucht. Die Ergebnisse der Einzelproben werden im Anhang dargestellt (siehe Anhang 9.4).

Tabelle 61: Standard-Prozessvariationen bei den stationären Hackversuchen am TFZ

Variante	Siebkorb	Messerschärfe	Einzugsgeschw.	Baumarten
„80 × 80“	80 × 80 mm	scharf	19,7 m/min	Fi, Bu, Kie, Bi, Pa, Ro
„55 × 65“	55 × 65 mm	scharf	19,7 m/min	Fi, Bu
„40 × 40“	40 × 40 mm	scharf	19,7 m/min	Fi, Bu
„ohne Sieb“	ohne	scharf	19,7 m/min	Fi, Bu
„stumpf“	80 × 80 mm	stumpf	19,7 m/min	Fi, Bu
„langsam“	80 × 80 mm	scharf	9,7 m/min	Fi, Bu

5.2.3 Stationäre Versuche (zapfwellenbetriebene Hacker)

Im September 2013 wurden weitere Hackschnitzelproben ($n = 16$) mit drei zapfwellenbetriebenen Hackern der mittleren Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ hergestellt. Verwendet wurden ein Schnecken-, ein Scheibenrad- und ein Trommelhacker. Alle drei Maschinen wurden über die Zapfwelle eines rapsölbetriebenen Schleppers (John Deere 6210R) angetrieben.

5.2.3.1 Verwendete Maschinen

Bei den Versuchen wurden drei Hacker mittlerer Leistungsklasse verwendet (siehe Abbildung 51, Tabelle 62).

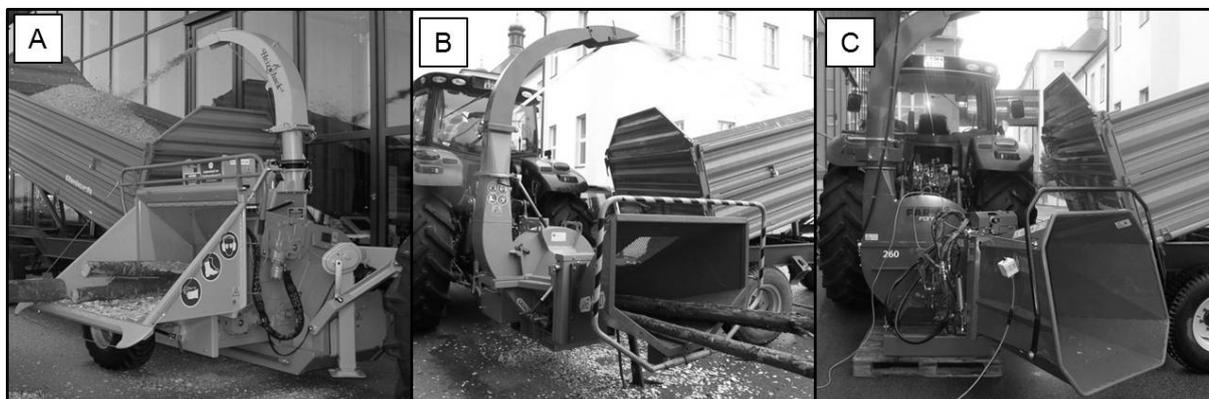


Abbildung 51: (A) Heizomat HM 8 400 Trommelhacker, (B) Laimet HP 21 Schneckenhacker und (C) Farmi CH 260 HF-2EL Scheibenradhacker für stationäre Hackversuche am TFZ

Tabelle 62: Technische Daten der drei zapfwellenbetriebenen Hacker

	Trommelhacker	Scheibenradhacker	Schneckenhacker
Hersteller	Heizomat	Farmi	Laimet
Hackertyp	Heizohack HM 8 400	CH 260 HF-2EL	HP-21
Geforderte Leistung der Trägermaschine	max. 139 kW	70–115 kW	75–110 kW
Max. Stammdurchmesser	400 mm	260 mm	170 mm
Austragssystem	Gebälse	Gebälse	Gebälse
Beschickung	manuell	manuell/Kran	manuell

Alle Hacker wurden von Hand beschickt (siehe auch Abschnitt 6.2.2). Als Trägermaschine kam ein John Deere 6210R mit einer Nennleistung von 154 kW zum Einsatz. Die Leistung des Schleppers war demnach höher als von den Hackern benötigt, wodurch jede der verwendeten Maschinen bis zu 100 % ausgelastet werden konnte. Die Hackschnitzel wurden mittels der Hackergebläse in einen landwirtschaftlichen Kipper mit bekanntem Ladevolumen überführt.

5.2.3.2 Prozessvarianten

Pro Versuch wurden ca. 9–10 Srm Hackschnitzel produziert. Als Rohmaterial wurde Energierundholz von Fichte und Buche (Er) sowie einmalig Restholz aus Weide verwendet (Wrh, siehe Tabelle 63). Die Probenahme der ca. 0,25 m³ Teilproben für die Analysen der physikalischen Brennstoffeigenschaften erfolgte analog zu Abschnitt 5.2.1.

Die verwendeten Prozessvarianten sind in Tabelle 63 zusammengefasst, wobei für den Trommelhacker unterschiedliche Siebkorbeinsätze, für den Scheibenradhacker unterschiedliche Zapfwellengeschwindigkeiten und für den Schneckenhacker unterschiedliche Hackerschnecken verwendet wurden. Die Messerschärfe wurde für den Trommel- und den Scheibenradhacker variiert. Für die Varianten mit stumpfen Messern wurden stark abgenutzte Messer (Trommelhacker) bzw. Messersätze verwendet, die mithilfe eines Winkelschleifers analog zu den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker stumpf gemacht worden waren (Scheibenradhacker) (Abschnitt 5.2.2.2). Beim Hacken mit stumpfen Messern wurde beim Trommelhacker ein 80 × 80 mm großer Siebkorb, beim Scheibenradhacker die Zapfwellendrehzahl 540 U/min verwendet.

Tabelle 63: Prozessvarianten bei den stationären Versuchen mit zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistungsklasse

Hackertyp	Variante	Fichte (Er)	Buche (Er)	Weide (Wrh)
Trommelhacker	45 × 60 mm Sieb	X	X	
	60 × 60 mm Sieb	X		
	80 × 80 mm Sieb	X	X	
	stumpfe Messer	X		
Scheibenradhacker	Zapfwelle 540 U/min	X	X	
	Zapfwelle 1000 U/min	X	X	
	Stumpfe Messer	X		
Schneckenhacker	Schnecke 2-80 20–30 mm	X	X	X
	Schnecke 1-80 30–50 mm	X		
	Schnecke 1-104 40–70 mm	X		

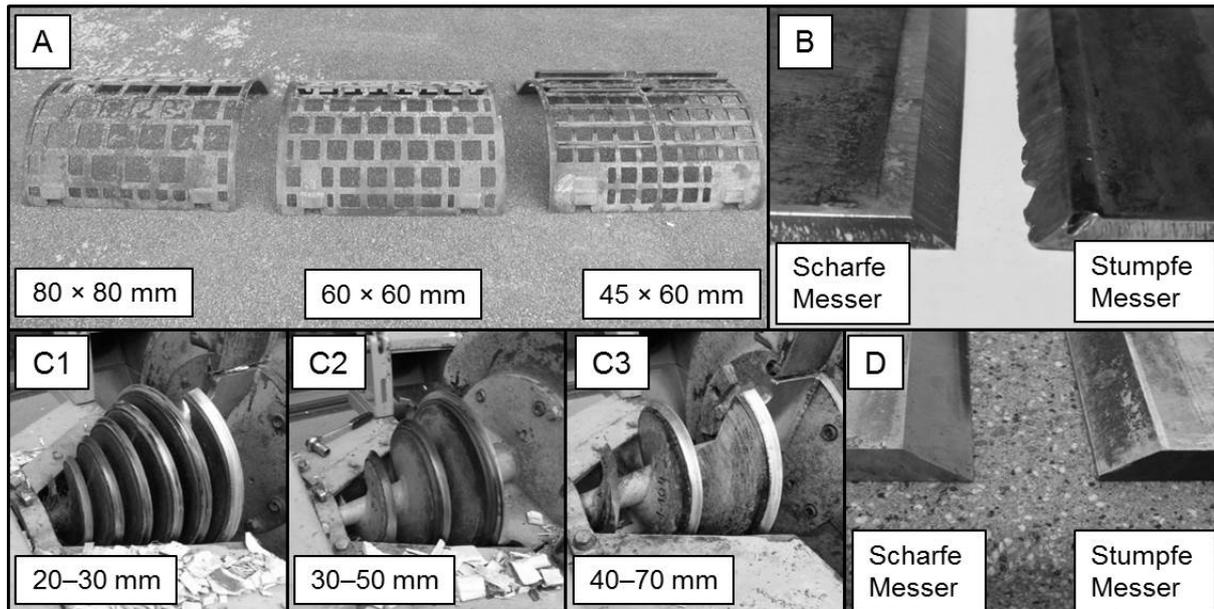


Abbildung 52: Siebkörbe für Trommelhacker (A), Messersätze für Trommelhacker (B), Schnecken (C) und Messer für Scheibenradhacker (D)

5.2.4 Hackschnitzelanalysen

Alle Hackschnitzelproben wurden in den Laboren des TFZ und der LWF nach einer fest definierten Reihenfolge analysiert (siehe Abbildung 53). Bei den angewendeten Messmethoden handelt es sich sowohl um Standardanalysen gemäß den geltenden DIN-EN-Prüfnormen für biogene Festbrennstoffe als auch um neu entwickelte Untersuchungsverfahren (siehe Abbildung 53).

5.2.4.1 Gesamtmasse der Probe

Als erste Analyse am TFZ wurde die Ausgangsmasse (m_a in kg) der frischen Gesamtprobe bestimmt (siehe Abbildung 53). Hierzu wurde die Probe im Big Bag mithilfe eines Lastenkrans angehoben. Eine Kranwaage (DINI ARGEO MCW1500, AS-Wägetechnik GmbH) maß dabei die Masse der Probe inklusive des Big Bags. Letztere war von der Gesamtmasse abzuziehen.

5.2.4.2 Probenhomogenisierung und Probenteilung

Für die meisten Analysen musste die ca. $0,5 \text{ m}^3$ umfassende Gesamtprobe auf kleinere Probenmengen reduziert werden (siehe Abbildung 53). Bei der Probenteilung wurde nach DIN EN 14780 [46] vorgegangen und die Gesamtprobe auf einen sauberen, ebenen Untergrund entleert. Dabei entstand ein loser Schüttgutkegel. Das Probenmaterial wurde dreimal komplett mithilfe einer Schaufel umgeschichtet, um eine homogene Mischung zu erzeugen. Anschließend wurde die Probe in vier gleichgroße Teilhaufen unterteilt (Teilvolumen ca. $0,125 \text{ m}^3$, siehe Abbildung 54).

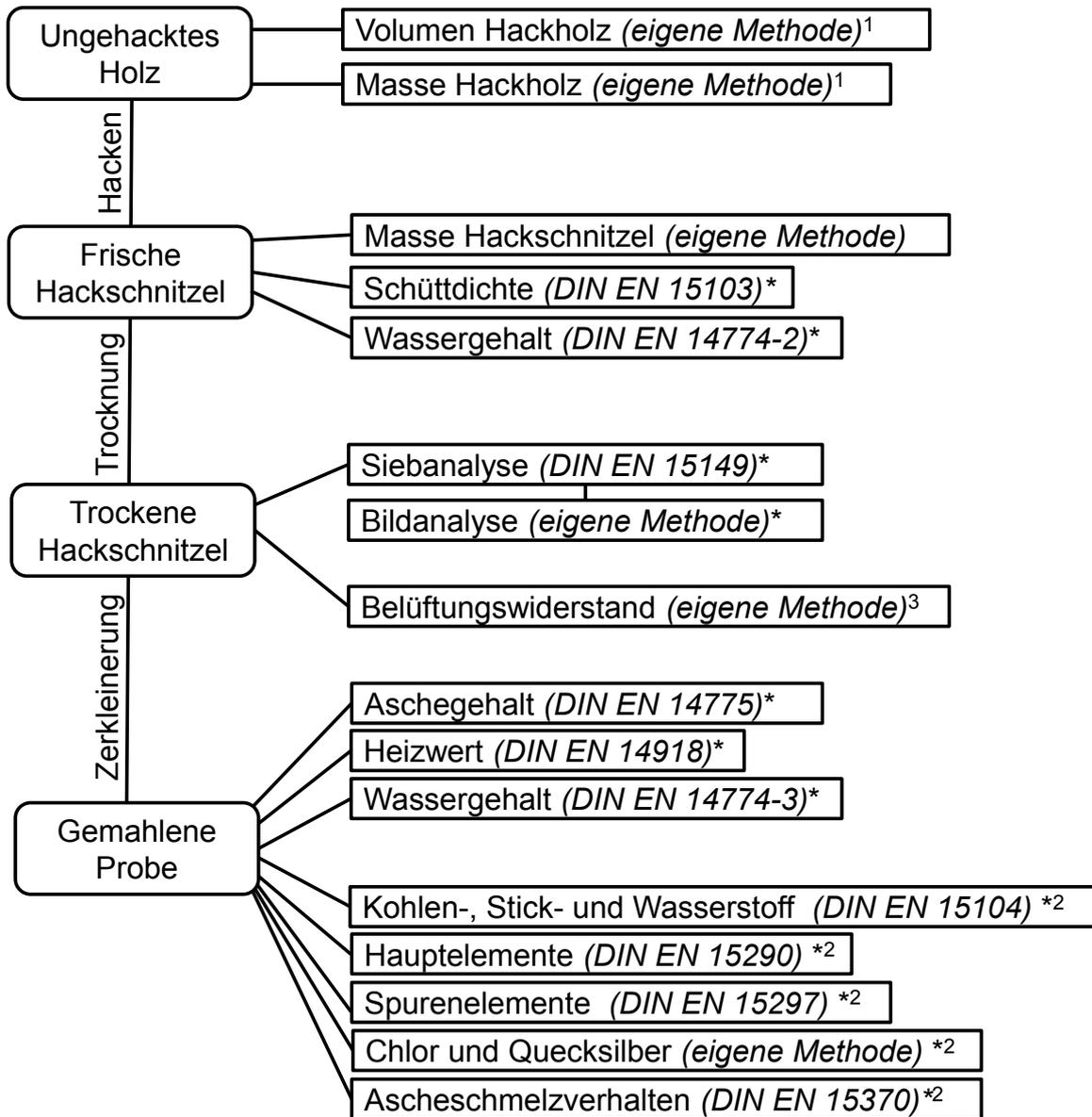


Abbildung 53: Ablauf und verwendete Methoden der Brennstoffanalysen (* = homogene Teilprobe, ¹ = nur bei stationären Hackversuchen, ² = siehe TFZ-Bericht „Qualität von Holz hackschnitzeln aus Bayern“, ³ = siehe Kapitel „Belüftungswiderstand“)

Mithilfe eines selbst konstruierten Probenteilers wurde ein Viertel der Gesamtprobe erneut in vier homogene Teilproben getrennt (siehe Abbildung 54). Hierzu wurde eine der 0,125-m³-Teilproben in einen auf einem Gerüst montierten Trichter gefüllt. Durch Öffnen der Trichterunterseite fiel das Probenmaterial über einen Kegel gleichmäßig in vier Metallbehälter unterhalb der Trichteröffnung. Eine 0,125 m³ große Teilprobe wurde so zunächst auf ca. 31 l, bei erneutem Teilen auf ca. 8 l, dann auf 2 l reduziert.

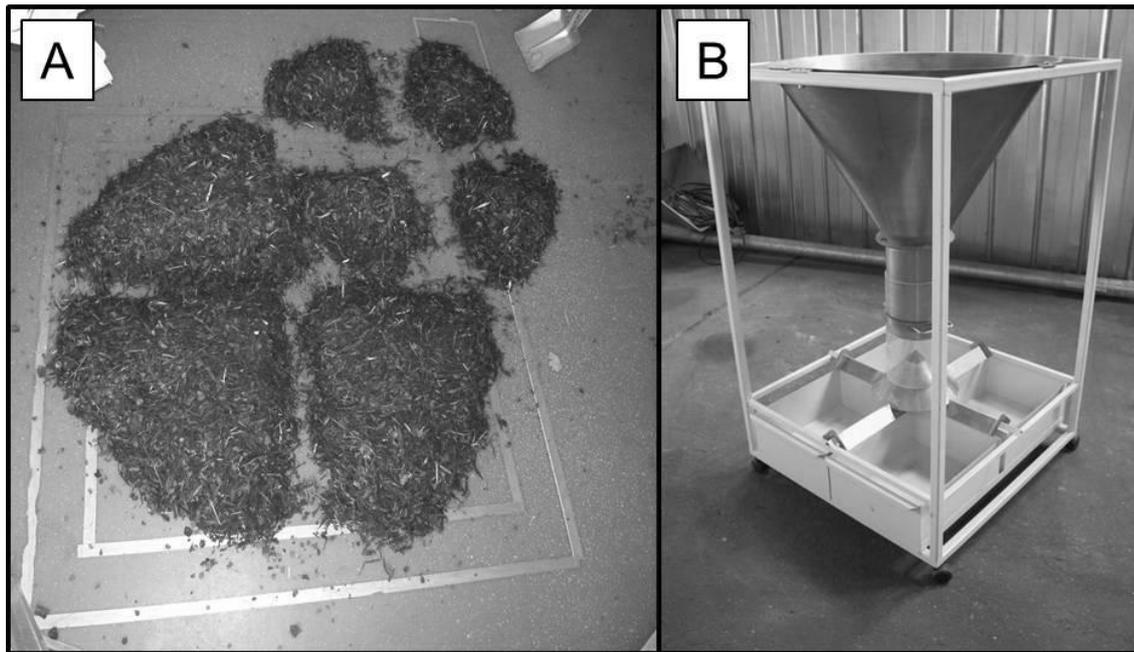


Abbildung 54: Probenteilung großer Schüttgutproben in homogene Teilproben ohne (A) und mit Probenteiler (B)

5.2.4.3 Schüttdichte und Stauchfaktor

Als zweite Analyse am Tag der Probenahme erfolgte die Bestimmung der Schüttdichte („Bulk Density“ BD in kg/m^3), die das Verhältnis der Masse des losen Brennstoffs zu seinem Volumen beschreibt (Abbildung 53). Für jede Hackschnitzelprobe wurden drei Schüttdichteparameter ermittelt: die Schüttdichte im genormten 50-l-Behälter (BD), die Schüttdichte im Transportcontainer vor dem Transport ins Heizwerk (BD_{Lkw}) und der Stauchfaktor (SF). Die Bestimmung von BD erfolgte nach DIN EN 15103 [50]. Die Messung wurde dabei für jede Probe zweimal wiederholt ($n = 3$). Um Autoreplikation zu vermeiden, wurde dabei Material aus jeweils unterschiedlichen, homogenen $0,125\text{-m}^3$ -Teilproben der Gesamtprobe verwendet (siehe Abschnitt 5.2.4.2).

Die Berechnung der Schüttdichte im Lkw-Container (BD_{Lkw}) erfolgte analog der Berechnung von BD , wobei als Volumenbehälter nicht der auf 50 l genormte Behälter, sondern direkt der Transportcontainer verwendet wurde. Das Volumen der im Wald produzierten Hackschnitzel wurde über das Leervolumen vor und nach dem Befüllen ermittelt (siehe Abschnitt 8.2.2.4). Die Masse der Lkw-Ladung wurde am Heizwerk gemessen und dem TFZ schriftlich mitgeteilt.

Für die Schüttdichtebestimmung nach DIN-EN-Norm erfuhr die Probe vor der Messung eine manuelle Stoßanwendung (siehe DIN EN 15013 [50]). Der Stauchfaktor (SF) beschreibt dabei die prozentuale Verdichtung der Schüttdichte der ungestauchten Probe ($BD_{ungestaucht}$) zur Schüttdichte der gestauchten Probe ($BD_{gestaucht}$):

$$\left(1 - \frac{BD_{ungestaucht}}{BD_{gestaucht}}\right) * 100$$

Formel [5-2]

Unterschiedliche Wassergehalte im Holzkörper beeinflussen die Gesamtmasse des Brennstoffs und damit die Schüttdichte. Zudem schwindet Holz unterhalb des Fasersättigungspunkts (Wassergehalt $w < 25$ Ma-%). Nach Messung des Wassergehalts (siehe Abschnitt 5.2.4.4) wird die Schüttdichte daher auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von 15 Ma-% korrigiert (BD_{15} bzw. $BD_{Lkw_{15}}$, [89]), wobei sowohl Massenverluste als auch Volumenänderungen berücksichtigt werden [25][50].

5.2.4.4 Wassergehalt

Direkt im Anschluss an die Bestimmung der Schüttdichte wurde der Wassergehalt der Proben ermittelt (w in Ma-%). Die Wassergehaltsbestimmung erfolgte am TFZ nach DIN EN 14774-2 [43] und nach DIN EN 14774-3 [44]. Beide Verfahren verwenden die Trockenschrankmethode, bei welcher der Wassergehalt über den Massenverlust der Probe während der Lagerung in einem Trockenschrank bei 105 °C (FED 720, Binder GmbH, Tuttlingen, Deutschland) bestimmt wird. Die genannten Verfahren finden trotz der Entwicklung zahlreicher optischer, thermogravimetrischer, elektrischer oder hygrometrischer Verfahren aufgrund ihrer hohen Genauigkeit als Standard-Referenzverfahren Anwendung [89]. Der Wassergehalt der Gesamtprobe (w) wird dabei nach DIN EN 14774-2 [43], der von gemahlene Proben nach DIN EN 14774-3 [44] bestimmt. Letzteres wird auch als analysefeuchter Wassergehalt (w_a in Ma-%) bezeichnet. Bei der Bestimmung von w und w_a wird eine Dreifachbestimmung ($n = 3$) durchgeführt.

5.2.4.5 Probentrocknung

Für viele Analysen bietet es sich an, Hackschnitzel mit einem einheitlichen Wassergehalt zu verwenden, da hierdurch Prozesse wie Schrumpfung und Quellung des Materials nicht berücksichtigt werden müssen. Alle Hackschnitzelproben wurden deshalb nach den Analysen der Gesamtmasse, der Schüttdichte und des Wassergehalts auf einen einheitlichen Wassergehalt von ca. 15 Ma-% heruntergetrocknet (siehe Abbildung 53). Die Trocknung der Hackschnitzel erfolgte mit einer speziell angefertigten Belüftungseinheit (siehe Abbildung 55). Dabei wurde die Gesamtprobe in eine eigens konstruierte Holzkiste (1160 × 390 × 790 mm) gefüllt. Als Bodenplatten für die Holzkiste wurden Lochsiebe mit 15 mm Lochdurchmesser verwendet. Die gefüllte Holzkiste wurde auf eine passgenaue Bodengruppe gestellt (Abbildung 55). Die Trocknung erfolgte durch Belüftung der Probe mittels eines mobilen Gebläses.

Bei geringer Lufttemperatur oder bei einer hohen Luftfeuchte kann ein Heizregister zwischen Gebläse und Trocknungskiste geschaltet werden. Die Holzkiste wird mithilfe einer Kranwaage (DINI ARGEO MCW1500, AS-Wägetechnik GmbH) gewogen. Die aktuelle Masse der Probe ergibt sich dabei aus der um das Leergewicht der Trocknungskiste verringerten Gesamtmasse.

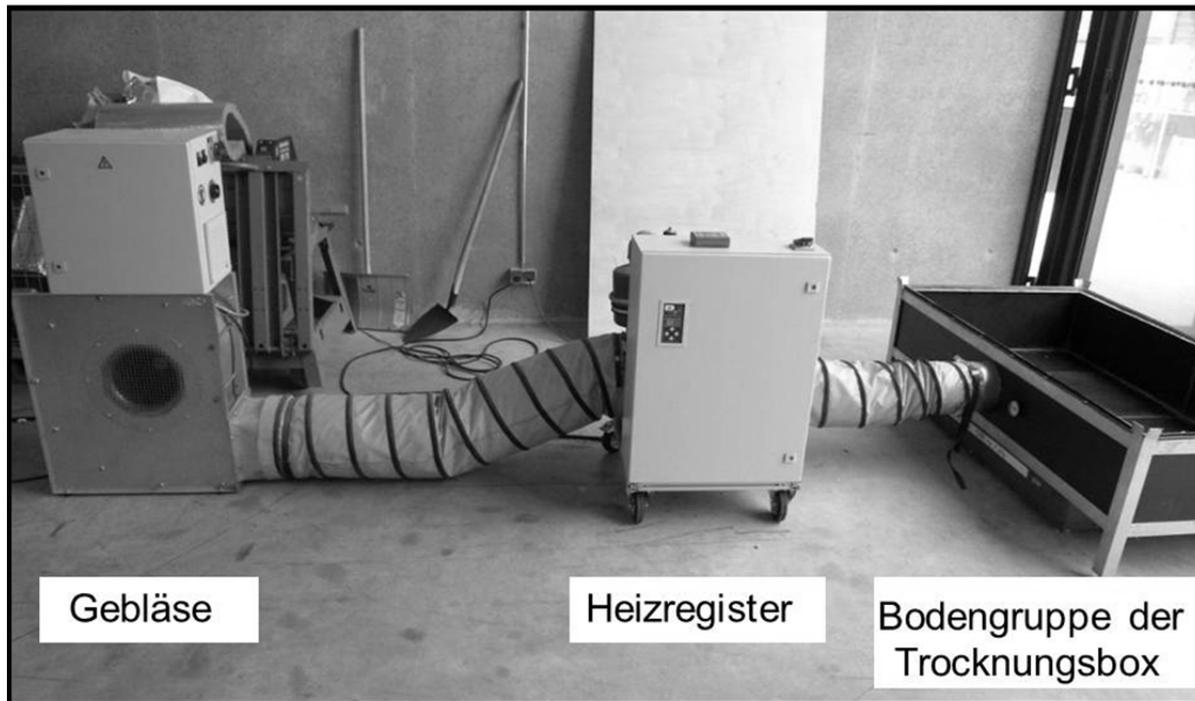


Abbildung 55: Trocknungseinrichtung für große Schüttgutproben

Durch die Wasserabnahme während der Trocknung sinkt die Masse der Probe. Die gewünschte Zielmasse (m_z) bei 15 Ma-% Wassergehalt lässt sich aus dem Ausgangswassergehalt am Tag der Probenahme (w , Abschnitt 5.2.4.4) und der Ausgangsmasse (m_a , siehe Abschnitt 5.2.4.1) berechnen:

$$m_z = \frac{m_a \cdot (100-w)}{(100-15)} \quad \text{Formel [5-3]}$$

Die Probe wurde während des Trocknens mithilfe der Kranwaage regelmäßig gewogen, bis die gewünschte Zielmasse erreicht war. Anschließend wurde die getrocknete Probe wieder homogenisiert und homogene Teilproben hergestellt.

5.2.4.6 Siebanalyse

Die Partikelgrößenverteilung der Proben wurde mittels Plansiebverfahren mit Rundlochsieben > 1 mm bestimmt (DIN EN 15149-1 [51]). Hierzu wurde eine vorgetrocknete, homogene 8-l-Teilprobe der Gesamtprobe untersucht (Abschnitt 5.2.4.2). Beim Plansiebverfahren werden die Einzelpartikel der Teilprobe durch horizontales Sieben mit mehreren übereinanderliegenden Rundlochsieben in einzelne Partikelfractionen aufgetrennt. Die Siebung erfolgt automatisch für 15 Minuten bei 200 bis 300 Bewegungen pro Minute (KS1 Plansiebmaschine, Retsch GmbH, Haan). Trenngröße ist der Teilchendurchmesser, mit dem ein Partikel eine Sieböffnung passiert. Für die Analyse wurden sechs Rund-

lochsiebe und eine Auffangschale verwendet. Die Lochdurchmesser lagen bei 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm und 63 mm. Der prozentuale Anteil der jeweiligen Partikelfraktion (F_x in Ma.-%) an der Gesamtprobe berechnet sich über die Nettomasse der Siebrückstände (m_x in g) und die Gesamtmasse (m_g in g) der Probe:

$$F_x = \frac{m_x}{m_g} * 100 \quad \text{Formel [5-4]}$$

Anhand der Siebfractionen lassen sich die einzelnen Hackschnitzelproben in Partikelgrößenklassen nach DIN EN ISO 17225-4 [61] einordnen. Hierzu müssen zusätzlich die maximale Länge der Partikel (in mm) und der maximale Teilchenquerschnitt (in cm^2) per Hand bestimmt werden.

Nachteilig an allen gängigen Siebanalyseverfahren ist, dass individuelle Partikel mit einem hohen Länge-zu-Breite-Verhältnis durch senkrechte Ausrichtung zum Sieb einzelne Siebböden passieren können, obwohl ihre maximale Partikellänge den Lochdurchmesser überschreitet [89][24], sodass es zu einer systematischen Unterschätzung der tatsächlichen Partikelgröße kommt. Im Anschluss an jede Siebanalyse nach DIN-Norm wurde deshalb das wesentlich genauere Bildanalyseverfahren durchgeführt.

5.2.4.7 Bildanalyseverfahren

Mithilfe des am TFZ verfügbaren Bildanalyseverfahrens (CP4, Haver & Boecker, Münster, Abbildung 56) kann die tatsächliche Partikelgrößenverteilung der Hackschnitzelproben mit einer hohen Genauigkeit dargestellt werden [24][101]. Neben der Partikelgrößenverteilung misst das Bildanalyseverfahren eine Reihe weiterer Parameter, welche die Partikelform beschreiben.

Beim Bildanalyseverfahren wurde für jede Hackschnitzelprobe dieselbe 8-l-Teilprobe wie beim Siebanalyseverfahren verwendet (Abschnitt 5.2.4.6). Die Einzelpartikel des Schüttguts werden mittels einer Vibrorinne (langsamer Transport) und eines Förderbands (schneller Transport) räumlich voneinander aufgetrennt (siehe Abbildung 56). Danach passiert jedes individuelle Partikel eine linienförmige Lichtquelle, die gegenüber einer digitalen CCD-Kamera angebracht ist. Über den Schattenriss der Teilchen auf das Sichtfeld der Kamera wird für jedes Hackschnitzel eine zweidimensionale Silhouette registriert (Abbildung 57). Die Kamera misst dabei kontinuierlich 4096 Pixel über eine Breite von 382 mm. Die Auflösung pro Pixel beträgt $98 \times 98 \mu\text{m}$. Aus der aufgenommenen zweidimensionalen Silhouette berechnet die Analysesoftware für jedes Partikel eine Reihe von Größen- und Formparametern, die anschließend für die einzelnen Partikelgrößenklassen als Mittelwerte zusammengefasst werden (Abbildung 57). Tabelle 64 beschreibt die wichtigsten Parameter, die mittels Bildanalyseverfahren am TFZ gemessen werden.

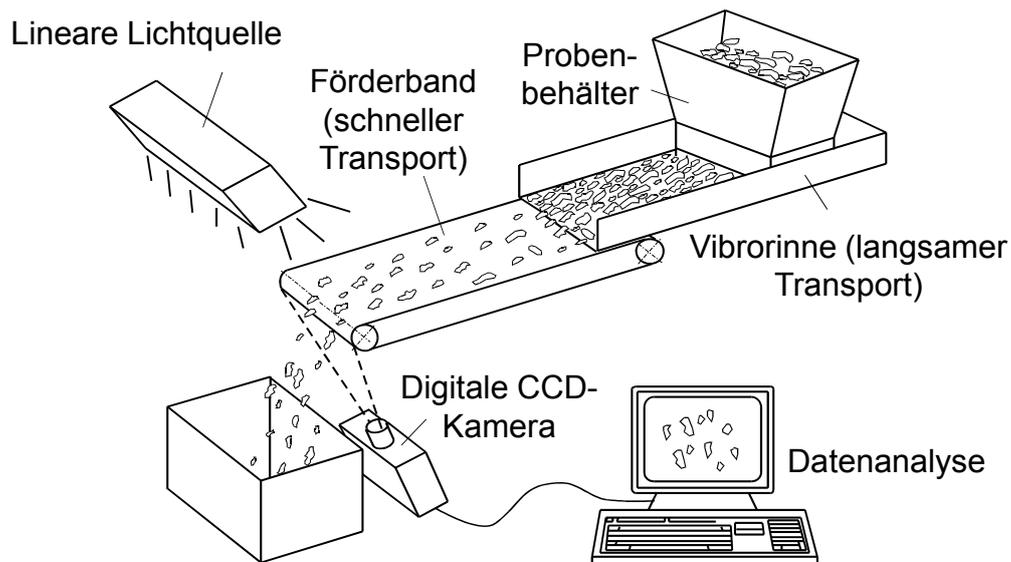


Abbildung 56: Schematische Darstellung des Bildanalyseverfahrens

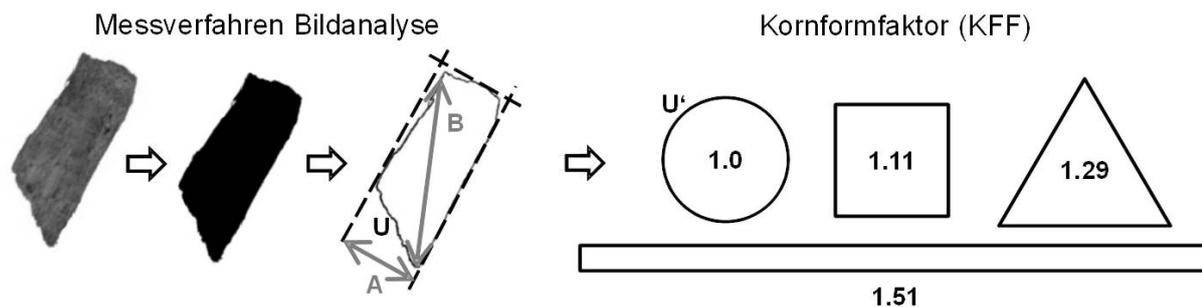


Abbildung 57: Messprinzip des Bildanalyseverfahrens und Kornformfaktoren unterschiedlicher Partikelformen, A = minimaler Feret, B = maximale Partikellänge, U = Partikelumfang, U' = Umfang eines flächengleichen Kreises

Die Einteilung in einzelne Partikelgrößenklassen erfolgt beim Bildanalyseverfahren nach dem technologisch wichtigen Parameter der „maximalen Partikellänge“ (Tabelle 64), wohingegen beim Siebanalyseverfahren der deutlich weniger repräsentative Teilchendurchmessers („minimaler Feret“) gemessen wird. Die Partikelgrößenklassen orientieren sich beim Bildanalyseverfahren an der ISO 565 Siebnebenreihe R20 [108], zuzüglich der Siebgrößen 0,5 mm, 150 mm, 200 mm und 300 mm. Der Anteil der jeweiligen Partikelgrößenklasse an der Gesamtprobe ergibt sich aus dem Verhältnis der aufsummierten Flächen aller Partikel einer Größenklasse und den aufsummierten Flächen aller Partikel der Gesamtprobe. Ausgehend von der Partikelgrößenverteilung lassen sich der Medianwert (*Median* in mm) sowie die Lage der 25%- und 75%-Quantile (Q_{25} und Q_{75} in mm) durch Interpolation bestimmen (siehe Abbildung 58).

Tabelle 64: Ausgewählte Längen- und Formparameter des Bildanalyseverfahrens

Parameter	Beschreibung
Maximale Länge (<i>MaxL</i> in mm)	Die maximale Länge eines Partikels, gemessen als größter Abstand zweier Pixel auf dem Schattenriss des Partikels
Minimaler Feret-Durchmesser (<i>MinFer</i> in mm)	Der minimale Feret-Durchmesser, gemessen als kleinstmöglicher Abstand zweier das Partikel berührender, paralleler Tangenten
Länge-zu-Breite-Verhältnis (<i>LzuB</i> , dimensionslos)	Das Verhältnis von <i>MaxL</i> zu <i>MinFer</i> .
Kornformfaktor (<i>KFF</i> , dimensionslos)	Der Kornformfaktor charakterisiert die Rundheit des Partikels. Hierzu wird der Umfang eines flächengleichen Kreises (U') ins Verhältnis zum tatsächlichen Umfang (U) des Partikels gesetzt ($KFF = U'/U$).

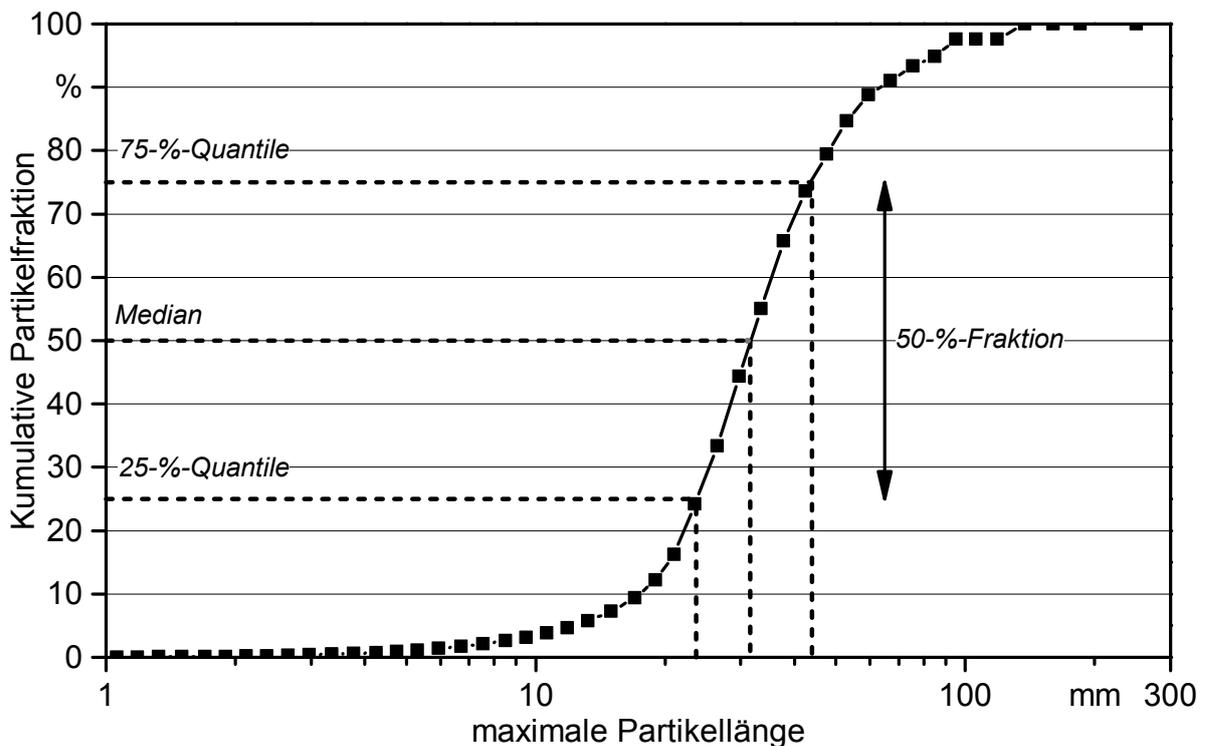


Abbildung 58: Beispiel für die Berechnung des Medianwerts und der 25%- und 75%-Quantile der Partikelklassenerteilung mittels Bildanalyseverfahren

Mittlere Werte für die Parameter *KFF*, *LzuB*, *MaxL* und *MinFer* der Gesamtprobe werden berechnet, indem die Mittelwerte jeder Partikelfraktion an deren prozentualen Anteilen an der Gesamtprobe gewichtet werden.

Mit der technisch inzwischen ausgereiften Bildanalysetechnik liegen am TFZ umfangreiche Erfahrungen und Vergleichsmessungen vor. Es ist denkbar, dass das Bildanalyseverfahren die konventionelle Siebung langfristig aufgrund seiner deutlich höheren Ge-

nauigkeit und seiner detaillierteren Messung ablösen oder ergänzen wird. Aufgrund der Vielzahl an Bildanalysegeräten (ISO 13322-2 [109]) wird aktuell am TFZ an einer Norm-Kalibriervorschrift für die Überprüfung beliebiger Geräte für den Einsatz mit Biomasse-Festbrennstoffen gearbeitet. Ein entsprechender Normenentwurf wurde dem ISO TC 238 („Solid Biofuels“) bereits vorgelegt.

5.2.4.8 Probenzerkleinerung

Für alle weiteren Analysen musste von jeder Hackschnitzelprobe eine homogene 2-l-Teilprobe mit einer Grobmühle (Retsch SM2000, Retsch GmbH & Co. KG, Haan, Deutschland) vorzerkleinert und anschließend mit einer Zentrifugalmühle (ZM100, Retsch GmbH, Haan, Deutschland) auf Partikel mit einer Durchschnittsgröße von 0,5 mm gemahlen werden. Das pulverige Material wurde erneut homogenisiert und in ca. 0,3 l fassende Behälter gefüllt.

5.2.4.9 Aschegehalt und Heizwert

Der Aschegehalt (A in Ma-%) wird als prozentualer Massenrückstand bei der vollständigen Verbrennung einer Probe in einem Muffelofen (L15/S, Nabertherm GmbH, Lilienthal, Deutschland) nach DIN EN 14775 [45] bestimmt. Der Heizwert der Brennstoffproben (H_u in MJ/kg) wurde mithilfe eines Bombenkalorimeters (C 2000 basic, Ika Analysetechnik, Staufen, Deutschland) nach DIN EN 14918 [47] festgestellt. Für beide Analysen wurde gemahlenes Probenmaterial verwendet (Abschnitt 5.2.4.8). Aschegehalt und Heizwert werden auf wasserfreier Bezugsbasis angegeben, weshalb parallel der Wassergehalt zum Analysezeitpunkt mitbestimmt werden muss (Abschnitt 5.2.4.4). 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 LWF analysiert (siehe TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“).

Für die Bestimmung des Aschegehalts und des Heizwerts wurden Doppelbestimmungen durchgeführt ($n = 2$), bei hohen Abweichungen waren es Dreifachbestimmungen ($n = 3$).

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Feldversuche

5.3.1 Probenherkunft

Bei den Feldversuchen wurden 67 Hackschnitzelproben gesammelt und analysiert (siehe Tabelle 65). Daneben wurden elf weitere Proben aus grob vorzerkleinertem, jedoch noch nicht gehacktem Siedlungsholz untersucht. Die Herkunft der Proben beschränkte sich größtenteils auf den Bereich Südbayern, weitere Einzelproben wurden in Unterfranken gesammelt. Die meisten Sortimente wurden zeitnah zum Hiebseinsatz gehackt ($n = 60$), in Einzelfällen wurde das Holz dagegen gezielt im ungehackten Zustand zur Reduktion des Wassergehalts über einen Sommer im Freien gelagert ($n = 7$).

Tabelle 65: Liste der Feldversuchsproben

Sortimentsbezeichnung (nach DIN EN ISO 17225-1)	Baumart	Anzahl ¹
1.1.1.1 Vollbäume Laubholz	Buche	1
1.1.1.2 Vollbäume Nadelholz	Fichte	1
1.1.1.3 Kurzumtriebsplantagenholz	Pappel/Weide/Robinie	8 (1)
1.1.3.3 Stammholz Laubbaumholz	Buche/Eiche/Pappel	4
1.1.3.3 Stammholz Nadelbaumholz	Fichte/Kiefer/Douglasie	9 (4)
1.1.4.1 Waldrestholz Laubbaum (frisch)	Buche/Esche	5
1.1.4.2 Waldrestholz Nadelbaum (frisch)	Fichte/Kiefer	12
1.1.4.3 Waldrestholz Laubbaum (gelagert)	Eiche	1
1.1.4.4 Waldrestholz Nadelbaum (gelagert)	Fichte	1 (1)
1.1.4.5 Waldrestholz Mischungen	Mischungen	2
1.1.7 Sortiertes Holz	Verkehrswegebegleitgrün	7
	Stromtrassenaufhieb	1
	Siedlungsholz	15 + 11

¹ Werte in Klammern = Anzahl an Proben, die im ungehackten Zustand für mindestens einen Sommer vorgetrocknet wurden

Bei der Produktion kamen fast durchweg Trommelhacker zum Einsatz ($n = 62$). Im Fall einzelner Hackschnitzelproben aus Kurzumtriebsplantagen wurden selbstfahrende Feldhäcksler verwendet ($n = 5$). Die Hacker unterteilten sich in zapfwellenbetriebene Anbauhacker, die mit Schleppern betrieben wurden, in Chippertrucks (d. h. auf Lkw montierte Hacker) und in selbstfahrende Hacker. Die Trägermaschinen der Trommelhacker hatten dabei ein Leistungsspektrum von 81 bis 456 kW. Als Prallsieb wurde in 60 % der Fälle eine 80 × 80 mm große Siebbespannung verwendet. Daneben kamen sowohl gröbere (z. B. 100 × 100 mm) als auch feinere Siebe (z. B. 40 × 40 mm) zum Einsatz. Gehackt

wurde mit scharfen Messern (61 %) und mit stumpfen Messern (39 %). Als stumpf wurden Messer angenommen, wenn sie länger als einen halben Arbeitstag seit dem letzten Messerwechsel in Betrieb waren. Bei drei Versuchen wurde ein Förderband anstelle eines Gebläses für den Hackschnitzelaustrag verwendet.

Beim Holz aus dem Siedlungsbereich wurden insgesamt fünf verschiedene Verfahrensketten zur Aufbereitung der Brennstoffe an den Kompostwerken/Biomassehöfen beobachtet (siehe Tabelle 66). Das Siedlungsholz stammte vornehmlich aus kommunalen Grüngutsammelstellen und aus der Pflege von Parkanlagen. Einzelfallweise wurde das Holzige Material vorab manuell aussortiert, gehackt und in Form von Hackschnitzeln getrocknet (Kette 1). Bei allen anderen Verfahrensketten (Kette 2 bis 5) wurde das komplette Material zunächst mittels eines Brechers, z. B. mithilfe eines Zerspaners, vorzerkleinert. Anschließend wurden mit einem Sternsieb die groben Holzanteile (Kette 2) oder mit einem Trommelsieb alle Partikel > 30 mm abgetrennt (Kette 3 bis 5). Das gesiebte Material wurde in Mieten gelagert/getrocknet (Kette 2 und 3), vor Ort gehackt (Kette 4) und mit Waldhackschnitzeln gemischt (Kette 5).

Tabelle 66: Aufbereitungsverfahren holzigen Materials aus kommunalen Grüngutsammelstellen am Kompostwerk/Biomassehof

Verfahrenskette	1	2	3	4	5
Vorsortierung	X				
Zerkleinerung		X	X	X	X
Siebung (grob)		X			
Siebung (> 30 mm)			X	X	X
Hacken	X				
Trocknung im Haufwerk	X	X	X	X	X
Hacken				X	X
Mischung mit Waldhackschnitzeln					X
Anzahl Fallstudien	6	1	10	7	2

5.3.2 Physikalische Brennstoffeigenschaften

5.3.2.1 Wassergehalt

Der mittlere Wassergehalt der Hackschnitzel aus frischem Holz betrug $49,8 \pm 6,8$ Ma.-%. Die Spanne reichte dabei von 36,4 bis 64,8 Ma.-% (Abbildung 59). Maximale Wassergehalte wurden für Hackschnitzel aus Waldrestholz (Fichte) und für Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen gemessen. Während größere Heizwerke mit Wassergehalten > 50 Ma.-% in der Regel problemlos zurechtkommen, benötigen kleine Feuerungsanlagen häufig Wassergehalte < 35 Ma.-%. Die frischen Hackschnitzel müssen daher getrocknet werden. Dies geschieht häufig in großen Lagermieten mit teils enormen Tro-

ckenmasseverlusten von jährlich 25–40 Ma.-% [6][92][161], aber auch unter Fremdenergieeinsatz bei der technischen Hackgutttrocknung (siehe Kapitel 7). Alternativ kann das Holz im ungehackten Zustand an sonnigen und luftigen Lagerstätten über die Dauer eines Sommers zur Reduktion des Wassergehalts gelagert werden. Dies war bei sieben der untersuchten Proben der Fall (Waldrestholz, Energierundholz und KUP-Material). Dabei führte die Lagerdauer von mindestens einem Sommer zu deutlich reduzierten Wassergehalten von $31,0 \pm 5,8$ Ma.-% (Abbildung 59). Trockenmasseverluste wurden dabei nicht bilanziert, sollten jedoch aufgrund der geringeren Oberfläche im Vergleich zu den feinen Partikeln im Haufwerk stark minimiert sein [161]. Somit kann die Trocknung im ungehackten Zustand aus Sicht der Brennstoffqualität empfohlen werden, wobei jedoch weitere Aspekte, z. B. Natur- und Waldschutz, berücksichtigt werden müssen.

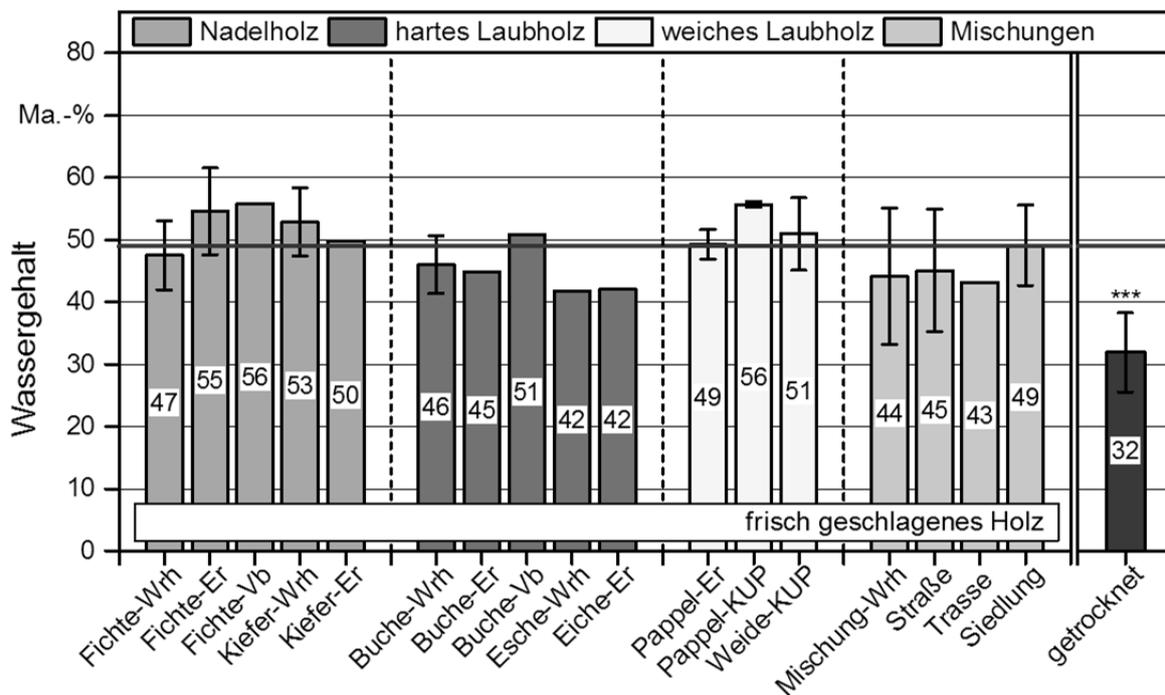


Abbildung 59: Mittlerer Wassergehalt der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. *** = signifikante Abweichung, Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, Vb = Vollbäume, KUP = Kurzumtriebsplantagen. Variante „getrocknet“: ungehackte Lagerung über Sommer

5.3.2.2 Aschegehalt und Heizwert

Der Heizwert der untersuchten Proben lag zwischen 16,0 und 19,8 MJ/kg (Waldholz: 17,9 bis 19,8 MJ/kg, siehe Abbildung 60). Maximale Heizwerte wurden für Waldrestholz aus Nadelbäumen gemessen, minimale Heizwerte für Mischungen aus Waldrestholz und für Holz aus dem Siedlungsbereich. Hohe Werte lassen sich u. a. auf hohe Anteile an Harz und Lignin in der Nadelholz-Biomasse zurückführen [89], niedrige Werte sind vor-

nehmlich durch hohe Anteile nicht brennbaren Materials im Brennstoff bedingt (siehe unten).

Der Aschegehalt der Proben hängt hauptsächlich vom Holzsortiment ab. Waldrestholz weist dabei Aschegehalte von 0,8 bis 5,4 Ma.-% auf. Energierundholz zeigt deutlich niedrigere Werte von 0,4 bis 1,7 Ma.-% und KUP-Hackschnitzel liegen dazwischen mit 1,2 bis 2,0 Ma.-% (Abbildung 60). Hohe Anteile an Rinde, Nadeln und Blättern im Brennstoff führen bei der Verbrennung zu höheren Aschegehalten als bei der Verbrennung von reinem Holz, da in diesen Pflanzenpartien die Anteile an Spurenelementen für den Pflanzenmetabolismus stark erhöht sind. Die meisten dieser Elemente gehen bei der Verbrennung nicht über den Schornstein verloren, sondern verbleiben in der Asche. Einzelne Elemente, die durch signifikante Anteile an grüner Biomasse erhöht werden, können sich dabei sehr negativ auf die Verbrennung (z. B. Chlor) oder auf die Entsorgung der Asche auswirken (Schwermetalle). Diese Problematik wird im TFZ-Bericht „Qualität von Holz hackschnitzeln aus Bayern“ separat diskutiert.

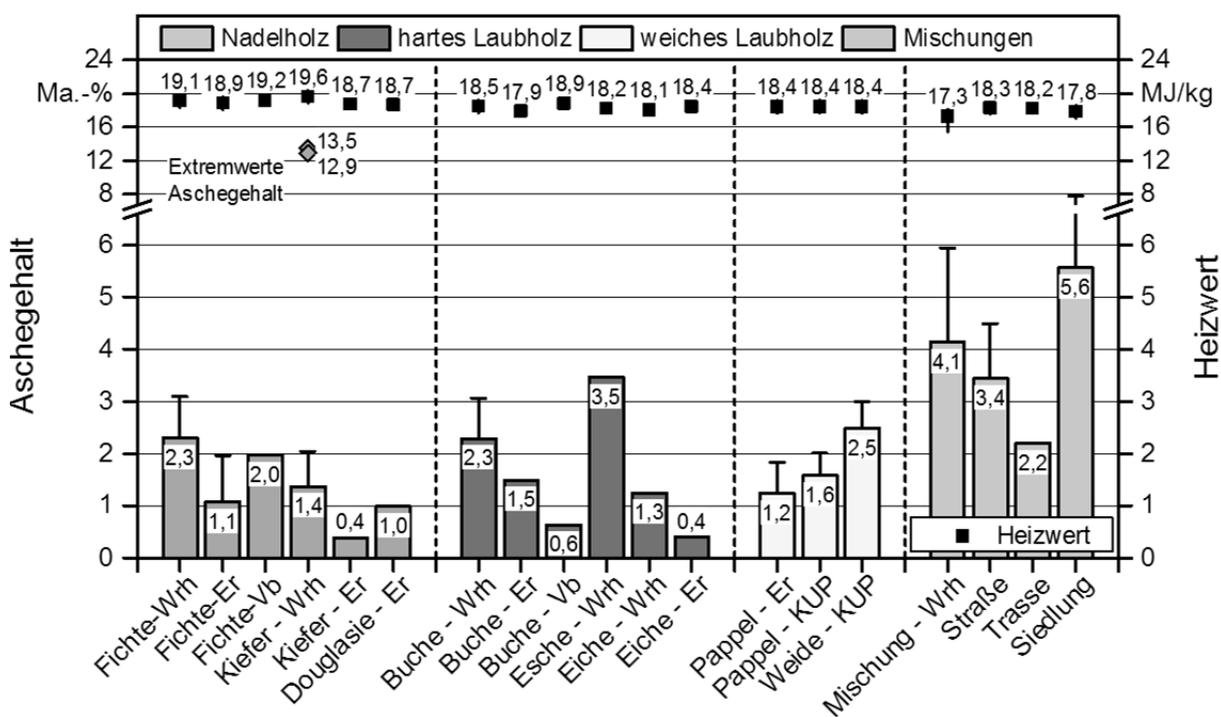


Abbildung 60: Mittlerer Aschegehalt und mittlerer Heizwert der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. Wrh = Waldrestholz, Er = Energierundholz, Vb = Vollbäume, KUP = Kurzumtriebsplantagen

Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 [61] (Klasse A1 und A2) sollten Aschegehalte von 1 bis 1,5 Ma.-% aufweisen. Folglich kann nur Energierundholz für die Produktion solcher Qualitätshackschnitzel empfohlen werden, andere Sortimente sind

weniger geeignet (Abbildung 60). Zu beachten ist dabei auch, dass manche Sortimente, z. B. KUP-Holz, nach DIN EN ISO 17225-4 nur für Klasse B zugelassen sind.

Einzelproben aus Waldrestholz und Holz aus dem Siedlungsbereich (gehackt und ungehackt) weisen deutlich höhere Aschegehalte auf als die übrigen Proben (> 10 Ma.-%). Solch hohe Gehalte an Asche sind nicht mehr als rohstoffbedingt anzusehen (vgl. DIN EN ISO 17225-1 [58]), sondern deuten auf eine Verschmutzung der Proben hin. Diese Hypothese wird gestützt durch die erhöhten Siliziumgehalte in den entsprechenden Proben, die den Eintrag von Mineralboden in die Proben nahelegen (hierzu auch TFZ-Bericht „Qualität von Holz hackschnitzeln aus Bayern“). Die Gehalte an Silizium übersteigen dabei teils deutlich die typischen Werte, die für Pflanzen angenommen werden können (maximal 12.000 mg/kg [114]). Ein hoher Anteil an Mineralboden im Brennstoff führt dabei nicht nur zu hohen Aschegehalten sondern senkt auch den Heizwert. Weiterhin kann ein hoher Anteil an Silizium im Brennstoff die Erweichungstemperatur der Asche senken, weshalb es zu einer erhöhten Schlackebildung in der Brennkammer kommen kann (siehe auch TFZ-Bericht „Qualität von Holz hackschnitzeln aus Bayern“).

Tabelle 67: Aschegehalt und Heizwert der einzelnen Verfahrensketten zum Siedlungsholz (Mittelwert \pm Standardabweichung)

Verfahrenskette	Aschegehalt	Heizwert	Anzahl
1	3,44 \pm 1,59	18,14 \pm 0,19	6
2	4,31	18,13	1
3	13,56 \pm 5,53	16,71 \pm 0,94	10
4	7,01 \pm 1,90	17,56 \pm 0,59	7
5	5,67 \pm 2,56	17,64 \pm 0,38	2

Der Eintrag von Mineralboden kann sowohl in der Vorkette im Wald, d. h. beim Fällen und Rücken der Bäume, aber auch durch unsachgemäße Kranarbeit beim Hacken erfolgen. Auch kann die Verschmutzung mit Mineralboden bei Holz aus Grüngutsammelstellen sehr hoch sein, beispielsweise wenn sich Wurzelballen im Brennstoff befinden (Tabelle 67). Hohe Aschegehalte waren bei der Aufbereitung des Siedlungsholzes besonders in Verfahrenskette 3 zu beobachten (Tabelle 66, Tabelle 67). Hierbei wurde das frische Material lediglich grob vorzerkleinert und mechanisch mit einem Trommelsieb (Lochdurchmesser 30 mm) gesiebt, wobei feuchtes Bodenmaterial an den größeren Holzpartikeln hängenbleiben kann. Weitere Aufbereitungswege, z. B. die Trocknung im Haufwerk mit anschließendem Hacken (Kette 4) sowie die Mischung des Materials mit Waldhackschnitzeln (Kette 5), verbesserten die Qualität deutlich. Die beste Qualität für Hackschnitzel aus dem Siedlungsbereich wurde jedoch mit den Verfahrensketten 1 und 2 erzielt, bei denen die holzigen Partien entweder manuell (händisch) oder maschinell (mittels eines Sternsiefs) vom restlichen Rohmaterial (vornehmlich grüne Biomasse, Mineralboden, Abfall) getrennt wurden.

Insgesamt zeigt sich, dass Holz aus dem Siedlungsbereich eher ungeeignet für die Produktion qualitativ hochwertiger Premiumhackschnitzel mit den geforderten Aschegehalten ist. Es sollte demnach nur in angepassten Feuerungen verwendet werden. Dabei kommt dem sorgsamem Umgang mit dem Rohmaterial während der gesamten Aufbereitungskette eine besondere Bedeutung zu, um die Qualität der Brennstoffe nicht negativ zu beeinflussen und ggf. höherwertige Qualitäten abtrennen zu können.

5.3.2.3 Schüttdichte und Stauchfaktor

Die Schüttdichte der Hackschnitzel lag – normiert auf einen einheitlichen Wassergehalt von 15 Ma.-% – zwischen 171 kg/m^3 (Pappel, KUP-Holz) und 297 kg/m^3 (Buche Energiegrundholz) (Abbildung 61). Erwartungsgemäß war die Schüttdichte aufgrund unterschiedlicher Rohdichten bei harten Laubhölzern am höchsten und bei weichen Laubhölzern am geringsten. Zwischen den Sortimenten derselben Baumart und zwischen unterschiedlichen Maschineneinstellungen (Siebkorb, Messerschärfe etc.) konnte bei den Feldversuchen dagegen kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden.

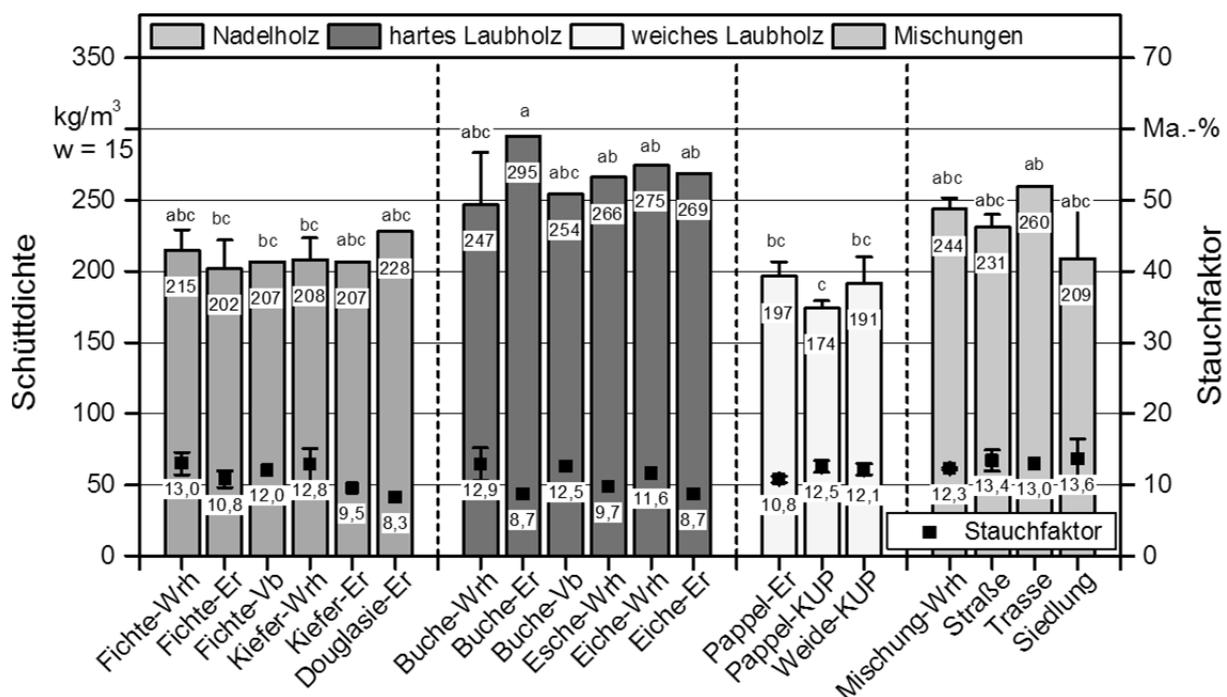


Abbildung 61: Mittlere Schüttdichten nach DIN EN 15103 (bei $w = 15 \text{ Ma.-%}$) und Stauchfaktoren der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, sortiert nach Sortiment und Baumart. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten.

Im Mittel über alle Baumarten lag der Stauchfaktor für Hackschnitzel aus Energierundholz um ca. 2,5 Ma.-% niedriger als für Hackgut aus Waldrestholz, wobei dieser Unter-

schied statistisch signifikant war. Dies lässt sich auf einen erhöhten Anteil an „weichen“ Partikeln, z. B. dünne Äste, Blätter und Nadeln, im Waldrestholzprodukt zurückführen.

Beim Vergleich der Schüttdichte im 50-l-Normbehälter und der dazugehörigen Schüttdichte im Lkw (gemessen direkt nach dem Hacken und somit vor dem Transport ins Heizwerk) konnte kein eindeutiger Trend beobachtet werden (Abbildung 62). Somit kann die Schüttdichte im Lkw sowohl höher als auch niedriger als die Schüttdichte im 50-l-Normbehälter sein. Bei Berechnung der Tonnage (atro) der Hackschnitzel einer Lkw-Ladung mittels des Volumens und der Schüttdichte im Normbehälter zeigte sich, dass die Trockenmasse im Lkw gut über das ermittelte Volumen und die ebenfalls mittels Prüfbehälter bestimmte Schüttdichte dargestellt werden kann (Abbildung 62).

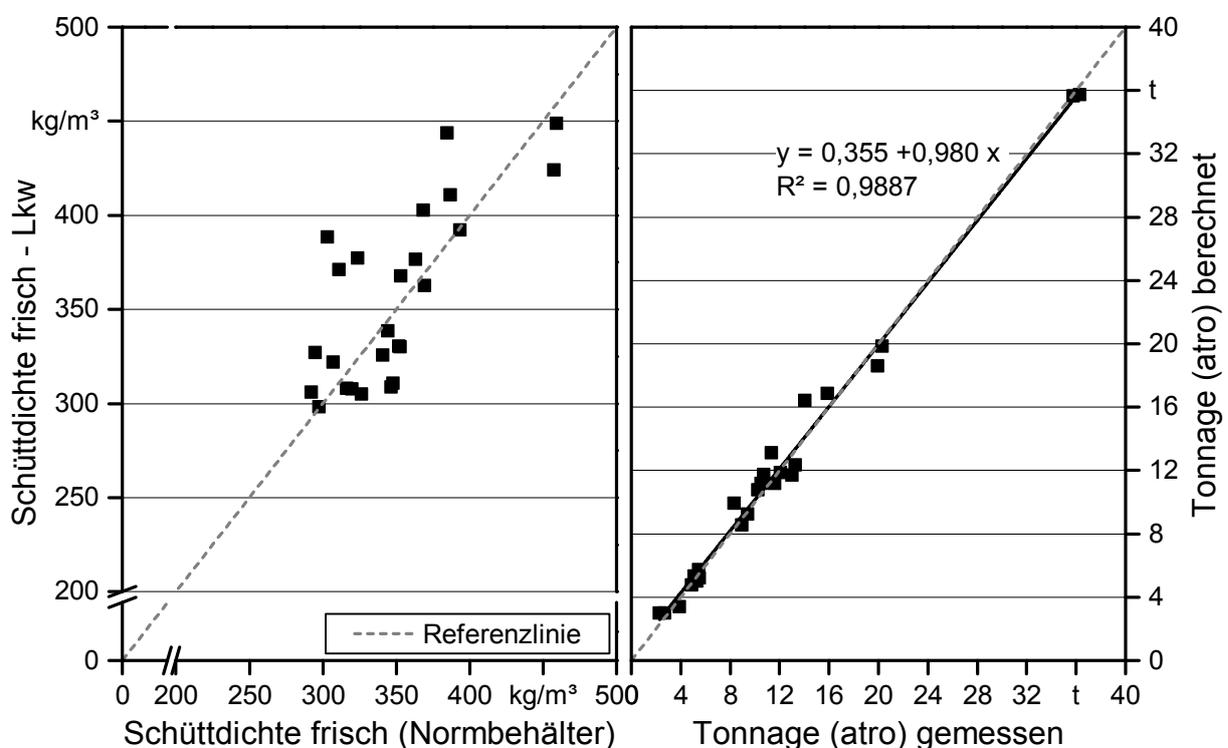


Abbildung 62: Schüttdichte im Lkw zu Schüttdichte im Normbehälter und gemessene Tonnage zu berechneter Tonnage (aus Volumen der Ladung und Schüttdichte im Normbehälter)

Mithilfe der Schüttdichte lassen sich zudem Überlegungen zur Masse der Hackschnitzel im Container bzw. im Schubboden-Lkw anstellen (Abbildung 63). Bei einer mittleren Schüttdichte von 340 kg/m^3 (gemittelt über alle Feldmessungen) wiegt die Ladung eines 40 m^3 fassenden Containers $13,6 \text{ t}$, die eines Schubboden-Lkw mit 90 m^3 Fassungsvermögen sogar $30,6 \text{ t}$. Eine Reduktion des Wassergehalts (Trocknung) von 50 Ma.-% auf 35 Ma.-% reduziert das Transportgewicht dabei um $3,1 \text{ t}$ bzw. um $6,9 \text{ t}$ (Abbildung 63). Das Volumen für ein maximal zulässiges Transportgewicht lässt sich somit relativ schnell abschätzen und das Überladen der Fuhrn vermeiden.

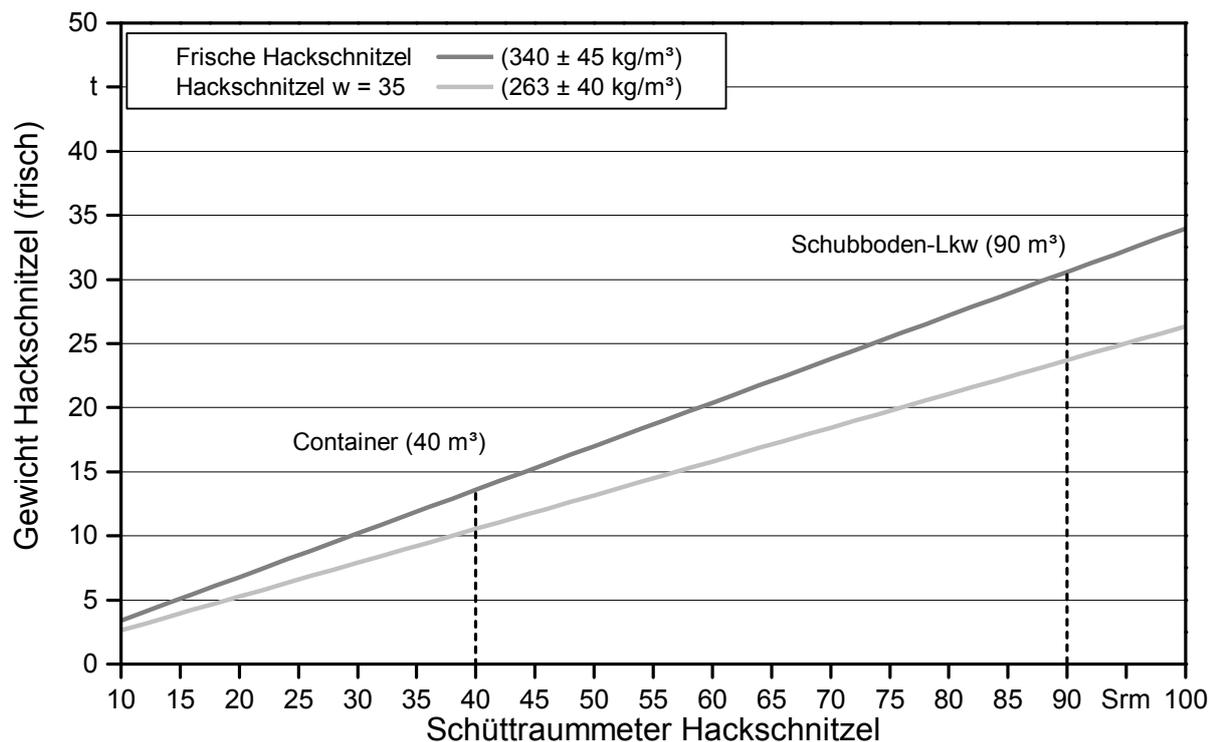


Abbildung 63: Durchschnittliches Gewicht frischer ($w = 50$ Ma.-%) und vorgetrockneter Hackschnitzel ($w = 35$ Ma.-%) im Transportfahrzeug

5.3.2.4 Partikelgröße und Partikelform

Die Partikelgrößenverteilung der Hackschnitzel, gemessen nach dem Plansiebverfahren, entsprach in 100 % der Fälle den Spezifikationen nach DIN EN ISO 17225-1 [58]. Alle Proben waren demnach für den Gebrauch in größeren Feuerungsanlagen geeignet (Abbildung 64). Die Anforderungen an die Größenverteilung für Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 [61], die vor allem für kleinere Anlagenleistungen erfüllt sein müssen, konnten jedoch nur in 36 % der Fälle erfüllt werden (P31S, P45S). Dabei konnten die Hackschnitzel oft aufgrund hoher Feinanteile (41 % der Fälle), aber auch aufgrund der maximalen Partikellänge (30 % der Fälle) keiner der vorgegebenen P-Klassen zugeordnet werden.

Wenn hochwertige Hackschnitzel (P31S bzw. P45S) anfielen, waren diese besonders häufig aus Energierundholz mit scharfen Messern erzeugt worden (Abbildung 64 [74][149][151][187]). Auch die Hackschnitzel aus KUP-Material ließen sich meistens einer der Klassen gemäß DIN EN ISO 17225-4 [61] zuordnen. Hackschnitzel aus Waldrestholz oder aus Vollbäumen waren dagegen für Premiumhackschnitzelanwendungen meistens nicht geeignet. Zu beachten ist, dass der Produktionsprozess im Wald vielerlei Einflüssen unterworfen ist und dass trotz der oben definierten optimalen Produktionsbedingungen (Energierundholz, scharfe Messer) weitere Faktoren, z. B. der Erfahrungsgrad des Maschinenführers (Leerlaufen der Hackertrommel etc.) oder Verschmutzungen der Proben mit Mineralboden in der Vorkette, die Größenverteilung der Hackschnitzel

negativ beeinflussen können. Zur Produktion hochwertiger Qualitätshackschnitzel muss daher ein sinnvolles Qualitätsmanagement vorliegen, das die gesamte Vorkette und die regelmäßige Schulung aller Mitarbeiter einschließt.

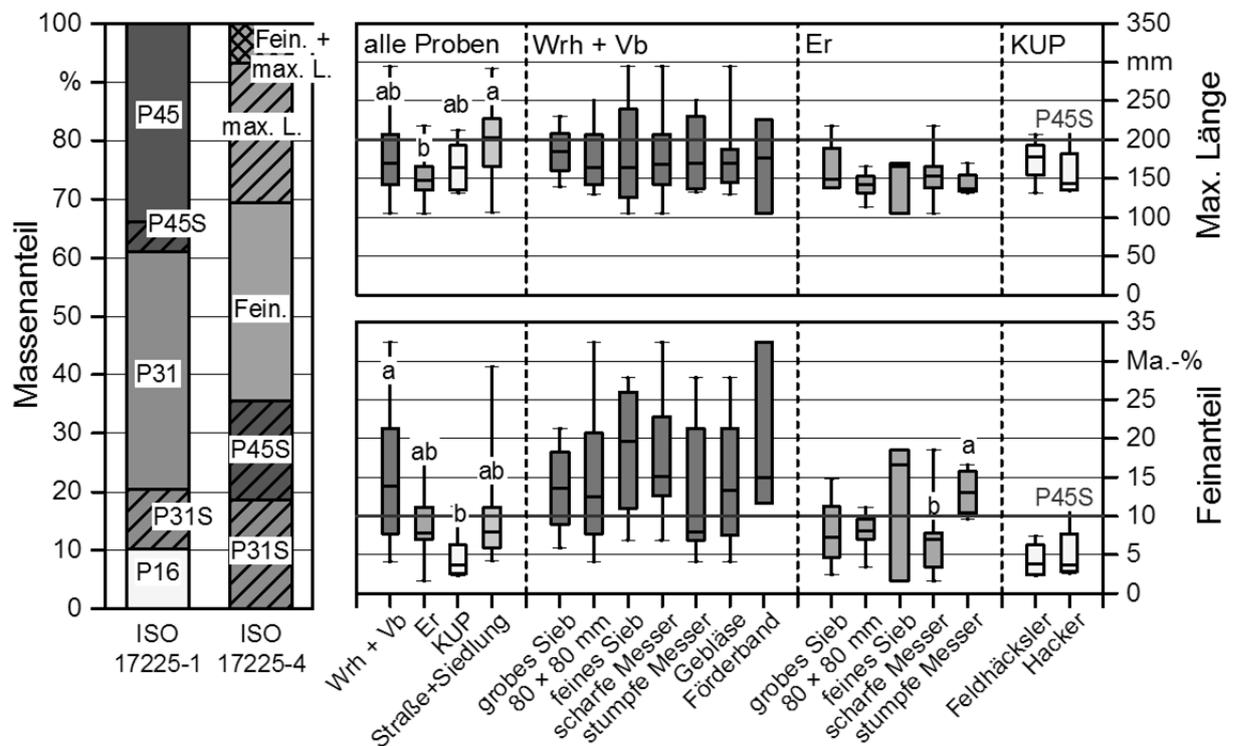


Abbildung 64: Partikelgröße nach DIN EN ISO 17225, maximale Partikellänge und Feinanteil der Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen. Balken geben 25%- und 75%-Quantile sowie Min. und Max. der Verteilungen an. Horizontale graue Linie gibt Grenzwerte für Feinanteil und maximale Länge der Klasse P45S nach DIN EN ISO 17225-4 wieder. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten.

Die Ergebnisse des Bildanalyseverfahrens bestärken die Schlussfolgerungen aus dem Siebanalyseverfahren (Abbildung 65). Auch hier erweist sich das Energierundholz als am besten geeignet für die Produktion von Qualitätshackschnitzeln. So war z. B. die durchschnittliche Partikelgröße, aber auch die Spannweite der Partikelgrößenverteilung bei Hackschnitzeln aus Energierundholz am geringsten (siehe Median und 50%-Hauptfraktion in Abbildung 65). Beides lässt auf eine sehr homogene Mischung mit durchschnittlich kleinen Partikeln schließen. Eine geringere Siebkorbweite führte dabei zu einer weiteren Reduktion der Partikelgröße.

Neben der Partikelgröße lässt sich mithilfe des Bildanalyseverfahrens auch die Partikelform darstellen. Die deutlich geringeren Kornformfaktoren des Energierundholzes im Vergleich zu Waldrestholz deuten dabei auf eine rundere und insgesamt homogenere Partikelform hin (Abbildung 65). Je runder und homogener die Partikelform ist, desto weniger mechanische Störungen sind im Anlagenbetrieb zu erwarten, z. B. durch Verstop-

fung der Förderschnecken oder durch Brückenbildung in Lagerräumen [101]. Weiterhin besitzen Hackschnitzel mit geringer Oberfläche weniger Angriffsfläche für holzerstörende Organismen, wodurch Trockenmasseverluste während der Lagerung minimiert werden könnten [161].

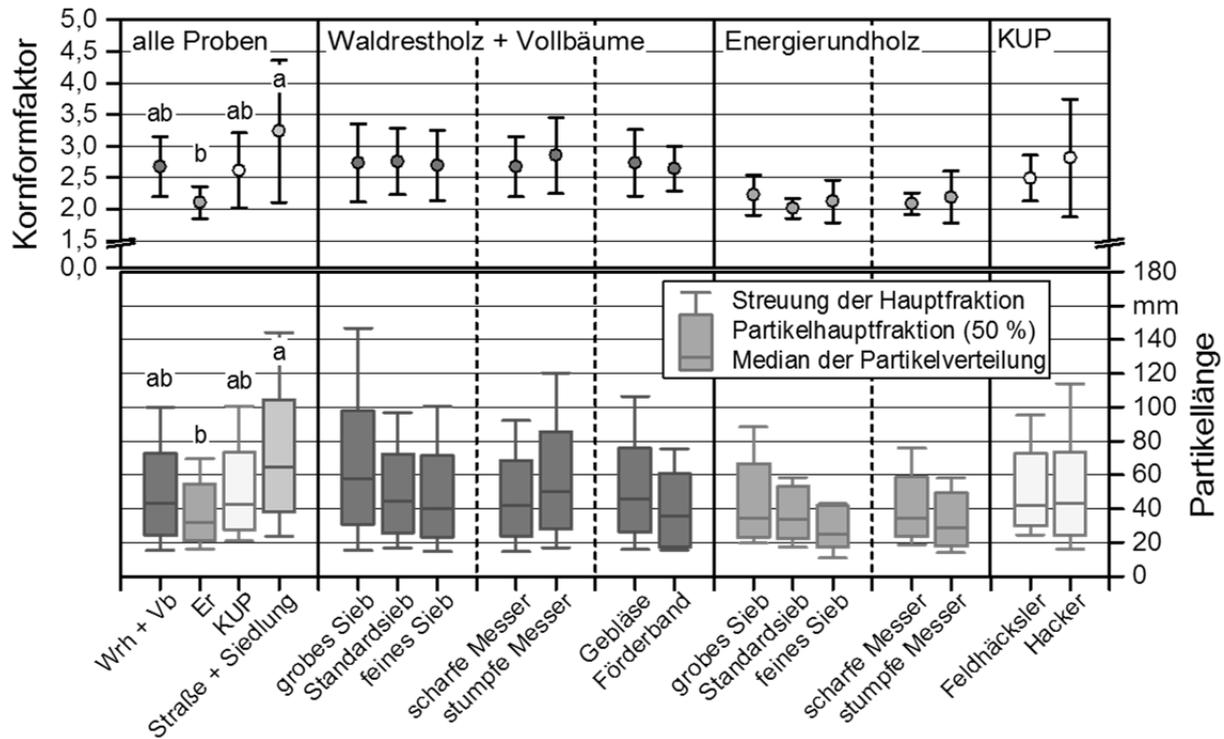


Abbildung 65: Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen der Partikel nach dem Bildanalyseverfahren. Unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Abweichung zwischen Mittelwerten

Die Ergebnisse der Feldversuche zeigen deutlich, dass die Qualität der Hackschnitzel bei der Produktion im Wald sehr heterogen ist und stark mit dem Rohmaterial und den Maschineneinstellungen schwankt. Für große Feuerungen waren die Brennstoffe durchweg geeignet, wohingegen die für kleinere Anlagen geforderten Qualitäten häufig nicht erreicht wurden.

Für die Produktion hochwertiger Qualitätshackschnitzel konnte eine Vielzahl an Empfehlungen erstellt werden. So bieten sich die gezielte Nutzung ausgewählter Sortimente (z. B. Energierundholz) und die Trocknung des Rohmaterials vor dem Hacken an. Daneben wirken sich stumpfe Messer, aber auch Verschmutzungen des Rohmaterials mit Mineralboden in der Vorkette negativ auf die Brennstoffqualität aus. Für die Produktion von Qualitätshackschnitzeln ist es erforderlich, dass die gesamte Bereitstellungskette, d. h. von der Holzernte bis zum Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk, einem sinnvollem Qualitätsmanagement unterzogen wird.

5.4 Auszug: Stoffliche Hackschnitzelqualität (TFZ-Bericht „Qualität von Holz-hackschnitzeln aus Bayern“)

Neben physikalischen Brennstoffeigenschaften haben stoffliche Parameter maßgeblichen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten von Hackschnitzelkesseln. So führen hohe Gehalte bestimmter Elemente u. a. zu erhöhten Emissionen (Feinstaub, NO_x, SO_x), zu Korrosion der Anlagen oder zu einer erhöhten Schlackebildung [89]. Die chemische Brennstoffqualität wurde für 97 Proben aus den Feldversuchen und den stationären Versuchen analysiert. Die Analysen 16 brennstoffrelevanter Elemente und des Ascheschmelzverhaltens erfolgten nach bzw. in Anlehnung an DIN-EN-Normen sowie mittels eigener Verfahren. Die Ergebnisse wurden anhand der Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-4/6/7 bewertet und hinsichtlich des Rohmaterials (Baumart, Sortiment), des Standorts und möglicher anthropogener Einträge interpretiert. Weiterhin wurden drei Versuchsreihen und ein Vergleich unterschiedlicher Aufschlussarten (HNO₃- und HF-Aufschluss) zur Qualitätssicherung der Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse sind detailliert im TFZ-Bericht „Qualität von Holz-hackschnitzeln aus Bayern“ wiedergegeben, weshalb hier nur der Vollständigkeit halber kurz darauf eingegangen wird.

Die Elementgehalte naturbelassenen, nicht durch Mineralboden verunreinigten Holzes (Waldrestholz, Energierundholz, Vollbäume) liegen durchweg unterhalb der Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-4 bzw. im Rahmen der für Waldrestholz als typisch angegebenen Wertebereiche (DIN EN ISO 17225-1). Die Rohmaterialien sind somit für Hackschnitzel der Klassen A1 bis B2 geeignet (DIN EN ISO 17225-4). Auch die Temperaturbereiche, bei denen sich die Asche erweicht, sind als eher unkritisch zu bewerten. Lediglich bei der Verwendung ausgewählter Baumarten (z. B. Weide auf ehemals stark mit Phosphat gedüngter Fläche), bei Proben mit hohem Grünanteil (z. B. Nadeln und feinen Äste, Siedlungsholz, Verkehrswegebegleitgehölz), hohen Verunreinigungen der Proben mit Mineralboden oder einem möglichen anthropogenen Eintrag (z. B. Streusalz) kommt es einzelfallweise zu Überschreitungen der Grenzwerte nach DIN EN ISO 17225-4, stellenweise sogar nach der DIN EN ISO 17225-6/7 (halmgutartige Brennstoffe). Regionale Unterschiede hinsichtlich der Elementarzusammensetzung von Böden und Gesteinen können bei einem Eintrag von Mineralboden neben einem hohen Aschegehalt auch zu einer Anreicherung von Schwermetallen und möglicherweise zur Überschreitung der Grenzwerte führen, weshalb durchweg auf eine saubere Arbeitsweise geachtet werden muss. Im Fall holziger Biomasse aus dem Siedlungsbereich (v. a. aus der Grüngutsammelstelle) bieten sich Aufbereitungsverfahren zur Minimierung des Grün- und Mineralbodenanteils an.

Werden die genannten Empfehlungen eingehalten, können Holz-hackschnitzel als unbedenklich hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung bewertet werden. Andernfalls sollten Brennstoffe, die hinsichtlich der DIN EN ISO 17225-4 kritisch sein könnten, vornehmlich in angepassten Anlagen nach der 4. BImSchV. genutzt werden.

5.5 Ergebnisse und Diskussion der stationären Hackversuche

Während der Feldversuche konnte eine Vielzahl an Einflussgrößen auf die physikalische Hackschnitzelqualität identifiziert werden. Dabei war in den Versuchen nicht steuernd in die Prozesskette eingegriffen worden, folgerichtig ist die Varianz zwischen den Proben sehr hoch. In den folgenden Kapiteln werden daher einzelne Prozessparameter, z. B. die Holzart oder bestimmte Maschineneinstellungen, in stationären Versuchen gezielt untersucht.

5.5.1 Stationäre Versuche (elektrischer Trommelhacker)

Bei den stationären Hackversuchen mit dem elektrischen Trommelhacker wurden 58 Hackschnitzelproben hergestellt. Das Standardprogramm (15 Varianten zu je $n = 3$) wurde um 13 Einzelproben ($n = 1$) ergänzt, deren Ergebnisse im Anhang 9.4 dargestellt sind.

5.5.1.1 Physikalische Eigenschaften des Rohmaterials

Das Hackholz bestand aus Energierundholz mit einer Länge von 2 m. Die durchschnittliche Stammdicke betrug 65 ± 15 mm, wobei die Durchmesser für Kiefer, Pappel und Robinie deutlich über denen von Fichte, Buche und Birke lagen (Tabelle 68).

Der Ausgangswassergehalt des frisch gelieferten Rohmaterials lag zwischen 33 und 58 Ma.-% und nahm während der Zwischenlagerung im Verlauf der Untersuchung ab (Tabelle 68). Die stärksten Wasserverluste durch Trocknung wurden für Fichte beobachtet, die geringste Trocknung trat bei Kiefer ein. Letzteres lässt sich voraussichtlich auf die Dicke der Stämme in Kombination mit einer deutlich ausgeprägten Rinde von bis zu 1 cm zurückführen. Außer bei Kiefer konnte dabei stets eine Reduktion des Wassergehalts auf Werte unter 35 Ma.-% über die Trocknungsdauer von sechs Monaten beobachtet werden.

Der Aschegehalt des Hackholzes lag mit Ausnahme der Baumarten Pappel und Robinie in allen Fällen unter 1,0 Ma.-% (Tabelle 68). Er befand sich damit im erwarteten Bereich für Energierundholz ohne Verschmutzung durch Erdanhaftungen (DIN EN ISO 17225-4 [61]). Für Fichte und Kiefer zeigte sich zudem eine signifikante Halbierung des Aschegehalts mit fortlaufender Trocknung (jeweils $p < 0,01$). Sowohl für die Baumart Fichte als auch für die Baumart Kiefer wurde während der Trocknung das Abfallen trockener Rindenpartien beobachtet. Rinde hat einen deutlich höheren Aschegehalt als reines Holz, weshalb rindenfreie Hackschnitzel geringere Aschegehalte aufweisen.

Der Heizwert (wasserfrei) lag im Mittel bei $18,6 \pm 0,39$ MJ/kg. Der höchste Heizwert wurde analog zu den Feldversuchen bei Kiefer beobachtet. Heizwert, Aschegehalt und Wassergehalt (nach der Trocknung im Holzpolter) erfüllten somit problemlos die Anforderungen an Premiumhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 [61].

Tabelle 68: Mittlerer Stammdurchmesser, Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert pro Baumart und Hackzeitpunkt

Baumart	Zeitpunkt ¹	Durchmesser mm	Wassergehalt Ma.-%	Aschegehalt Ma.-% (wf)	Heizwert MJ/kg (wf)
Fichte	T0	62 ± 13	58,0 ± 3,3	0,73 ± 0,01	18,99 ± 0,01
	T1	58 ± 12	40,5 ± 3,3	0,76 ± 0,01	18,82 ± 0,00
	T2	66 ± 15	15,5 ± 2,3	0,27 ± 0,06	18,92 ± 0,01
Buche	T0	63 ± 16	38,4 ± 0,7	0,74 ± 0,02	18,18 ± 0,01
	T1	63 ± 12	25,1 ± 1,1	0,80 ± 0,01	18,34 ± 0,04
	T2	63 ± 12	13,2 ± 1,0	0,84 ± 0,01	18,28 ± 0,00
Kiefer	T0	74 ± 14	51,5 ± 2,2	0,57 ± 0,01	19,17 ± 0,01
	T1	75 ± 17	47,0 ± 1,1	0,73 ± 0,04	19,28 ± 0,01
	T2	82 ± 18	41,7 ± 1,3	0,37 ± 0,03	19,29 ± 0,01
Birke	T0	71 ± 16	39,9 ± 0,8	0,43 ± 0,02	18,61 ± 0,07
	T1	66 ± 17	32,5 ± 0,5	0,49 ± 0,03	18,58 ± 0,02
	T2	72 ± 13	19,6 ± 0,4	0,38 ± 0,03	18,59 ± 0,04
Pappel	T0	79 ± 21	53,9 ± 0,6	1,40 ± 0,01	18,40 ± 0,05
	T1	77 ± 21	43,2 ± 1,0	1,00 ± 0,00	18,36 ± 0,02
	T2	86 ± 24	32,5 ± 1,1	0,84 ± 0,02	18,28 ± 0,01
Robinie	T0	79 ± 23	32,7 ± 0,3	1,82 ± 0,03	18,08 ± 0,01

¹T0 = frisches Holz (Februar 2012), T1 = nach erster Trocknungsphase (April 2012), T2 = nach zweiter Trocknungsphase (Juli 2012); wf = wasserfrei

5.5.1.2 Schüttdichte und Stauchfaktor

Die auf einen einheitlichen Wassergehalt von 15 Ma.-% normierte Schüttdichte der Hackschnitzel lag zwischen 156 und 277 kg/m³ (Abbildung 66) und war dabei etwas geringer als bei den Feldversuchen. Wie erwartet zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Baumarten. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Maschineneinstellungen sind dagegen deutlich geringer und statistisch nicht abgesichert. Somit bestätigen sich die Ergebnisse aus den Feldversuchen (Abschnitt 5.3.2.3), wonach die Schüttdichte vornehmlich von der Rohdichte der Baumart und weniger vom Zerkleinerungsprozess abhängt.

Nichtsdestotrotz kommt es zu einem leichten Anstieg der Schüttdichte sowohl für Buche als auch für Fichte mit abnehmender Siebkorbweite (Abbildung 66). Voraussichtlich wurden bei der Verwendung kleinerer Siebkorbweiten höhere Anteile feiner Partikel produziert (siehe unten), welche die freien Luftzwischenräume im Schüttgut besser ausfüllen und damit die Packungsdichte im Brennstoff erhöhen. Dieser Trend setzte sich für sehr

feine Hackschnitzel fort, die mit einem 15-mm-Rundlochsieb hergestellt wurden (Fichte: 211 kg/m³, Buche: 311 kg/m³, siehe Anhang 9.4).

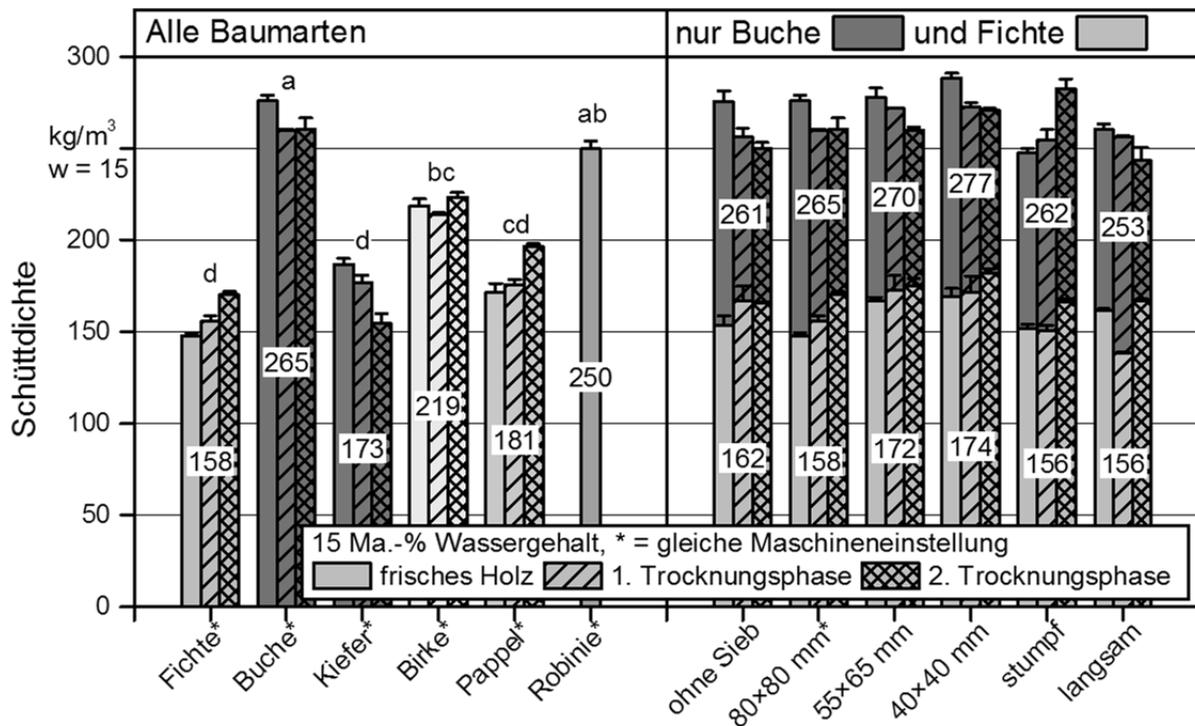


Abbildung 66: Auf 15 % normierte Schüttdichte der Hackschnitzel bei den stationären Hackversuchen am TFZ (elektrischer Trommelhacker) in Abhängigkeit von der Baumart und der Maschineneinstellung (Mittelwert \pm SD), dargestellt für alle 3 Zeitpunkte. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Varianten.

Die Stauchfaktoren lagen im Mittel bei $9,6 \pm 1,35$ Ma.-% (7,1 bis 14,1 Ma.-%) und befanden sich somit in einem Wertebereich, der für Energierundholz auch bei den Feldversuchen beobachtet wurde. Im Gegensatz zur Schüttdichte zeigten die Stauchfaktoren keine statistisch nachweisbaren Unterschiede zwischen den Einzelvarianten. Dennoch fällt auf, dass Hackschnitzel, die mit stumpfen Messern hergestellt wurden, im Mittel eine um bis zu 28 % höhere Nachverdichtung durch Erschütterung aufweisen ($11,6 \pm 1,8$ Ma.-%) als mit scharfen Messern hergestellte Hackschnitzel ($9,0 \pm 1,0$ Ma.-%). Das könnte daran liegen, dass mit stumpfen Messern längliche Partikelformen stärker ausgeprägt werden, die sich erst bei der Erschütterung im Probenbehälter parallel zueinander und damit platzsparender ausrichten (siehe weiter unten). Sowohl für den Stauchfaktor als auch für die Schüttdichte konnte kein einheitlicher Trend für die unterschiedlichen Trocknungszeitpunkte erkannt werden.

5.5.1.3 Partikelgröße und Partikelform

Die Einteilung der Partikelgröße erfolgte analog zu den Feldversuchen nach DIN EN ISO 17225-1 [58] und DIN EN ISO 17225-4 [61] (Tabelle 69). Dabei ließen sich 100 % der Proben nach Teil 1 der Norm klassifizieren, wohingegen eine Zuordnung zu den Qualitätsklassen nach Teil 4 der genannten Norm nicht in jedem Fall möglich war. Das betrifft insbesondere die mit stumpfen Messern oder ohne Verwendung eines Siebkorbs erzeugten Sortimente.

Tabelle 69: Partikelklassenzuordnung von Hackschnitzeln aus Buche und Fichte gemäß DIN EN ISO 17225-4 (Herstellung mit elektrischem Trommelhacker)

Baumart ¹	Trocknung	80 × 80	55 × 65	40 × 40	ohne Siebkorb	stumpf	langsamer Einzug
Fichte	T0	P31S	P31S	P31S	P45S	P45S	P31S
	T1	P31S	P31S	P31S	P45S	P31S	P31S
	T2	P31S	P31S	P31S	keine	P45S	P31S
Buche	T0	P31S	P31S	P31S	keine	keine	P31S
	T1	P31S	P31S	P31S	P45S	keine	P31S
	T2	P31S	P31S	P31S	P45S	keine	P31S

¹ Kiefer, Birke, Pappel und Robinie (alle 80 × 80) = P31S oder P45S

Im Fall der Varianten mit stumpfen Messern war sowohl der Feinanteil als auch die maximale Partikellänge nicht konform mit den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-4 [61]. Bei den Versuchen ohne Siebkorb war dagegen der Grobanteil zu hoch. Hierbei ist zu bemerken, dass die Verwendung stumpfer Messer in der Praxis häufig vorkommt, wohingegen die Herstellung ohne Siebkorb eher unüblich ist (siehe Feldversuche).

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Partikelgrößenverteilung selbst innerhalb derselben Norm-Spezifikation (P31S) stark variieren kann. Tabelle 70 und Abbildung 67 zeigen den Einfluss der einzelnen Prozesseinstellungen. Dabei hatte weniger die Baumart als vielmehr die Einstellungen am Hacker den stärksten Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung.

Der Siebkorb hatte maßgeblichen Einfluss auf die durchschnittliche Partikelgröße. Kleine Siebkorbweiten führten dabei zu einer Zunahme der Partikel < 16 mm. Zugleich nahm der Anteil an Partikeln > 31 mm ab (Abbildung 67). Stumpfe Messer führten zu einer Zunahme des Feinanteils und des Grobanteils und erhöhten die maximale Partikellänge (Tabelle 70). Hier wurden die höchsten Werte für den Feinanteil und die maximale Partikellänge im Vergleich zu den übrigen Chargen beobachtet. Folglich wurde die Verwendung stumpfer Messer als ungeeignet für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel eingestuft (siehe Feldversuche). Eine langsamere Einzugswalzensgeschwindigkeit

keit zeigte kaum Unterschiede im Vergleich zur Standardvariante „80 × 80“, wobei jedoch auch hier eine Zunahme der kleinen Partikel zu beobachten war (Abbildung 67). Bei einer Verringerung des Einzugs bei gleichbleibender Trommeldrehzahl kommt es zwangsläufig zu mehr Schnitten pro Meter eingezogenen Holzes, wodurch sich die durchschnittliche Partikelgröße verringert.

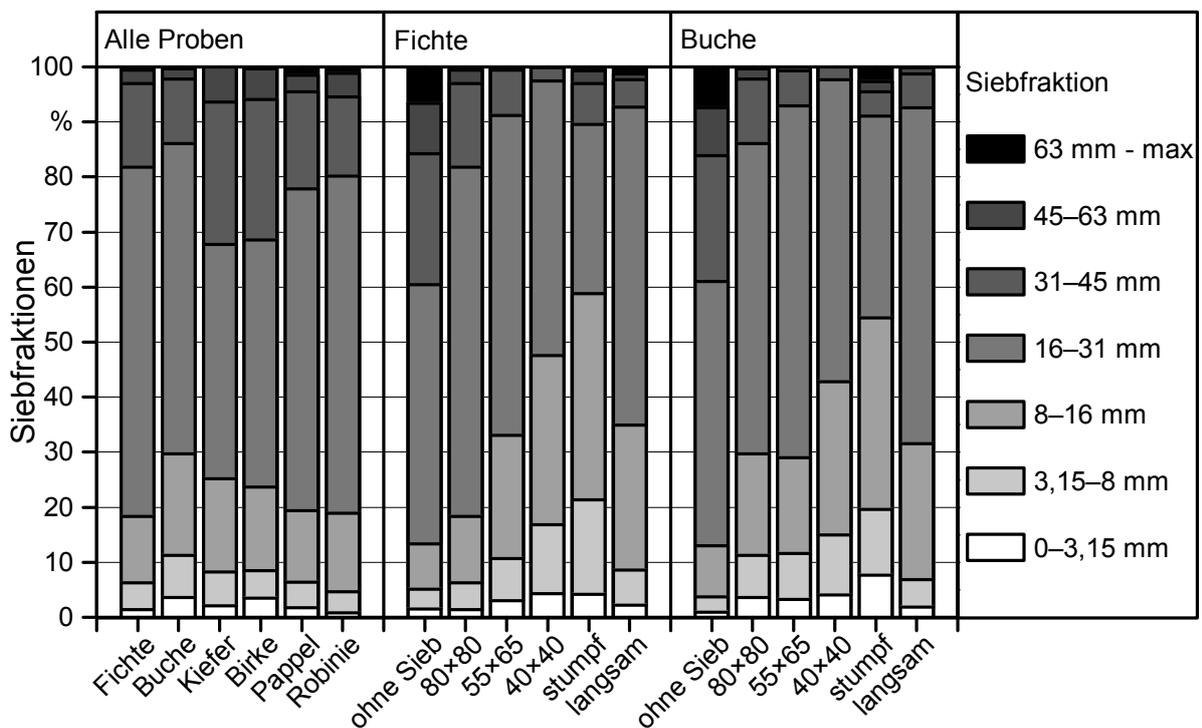


Abbildung 67: Siebfractionen der Hackschnitzelproben aus den stationären Versuchen (mit elektrischem Trommelhacker)

Tabelle 70: Feinanteil, Grobanteil und maximale Partikellänge der Hackschnitzel aus den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker (MW ± SD)

Variante	Feinanteil Ma.-%	Grobanteil ¹ Ma.-%	Maximale Partikellänge mm
ohne Sieb	1,18 ± 0,62	7,01 ± 5,40	156 ± 43
80 × 80	2,58 ± 1,54	0,47 ± 0,75	119 ± 28
55 × 65	3,11 ± 1,88	0,00 ± 0,00	107 ± 26
40 × 40	4,18 ± 2,70	0,00 ± 0,00	76 ± 15
stumpf	5,92 ± 3,32	1,64 ± 1,41	237 ± 71
langsamer Einzug	2,01 ± 0,95	0,73 ± 1,34	115 ± 22

¹Siebfraction > 63 mm analog zu Klasse P45S nach DIN EN ISO 17225-4

Die Bildanalyse bestätigt die Ergebnisse des Plansiebverfahrens. Die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform waren demnach weniger von der Baumart als vielmehr von der verwendeten Maschineneinstellung abhängig (Abbildung 68).

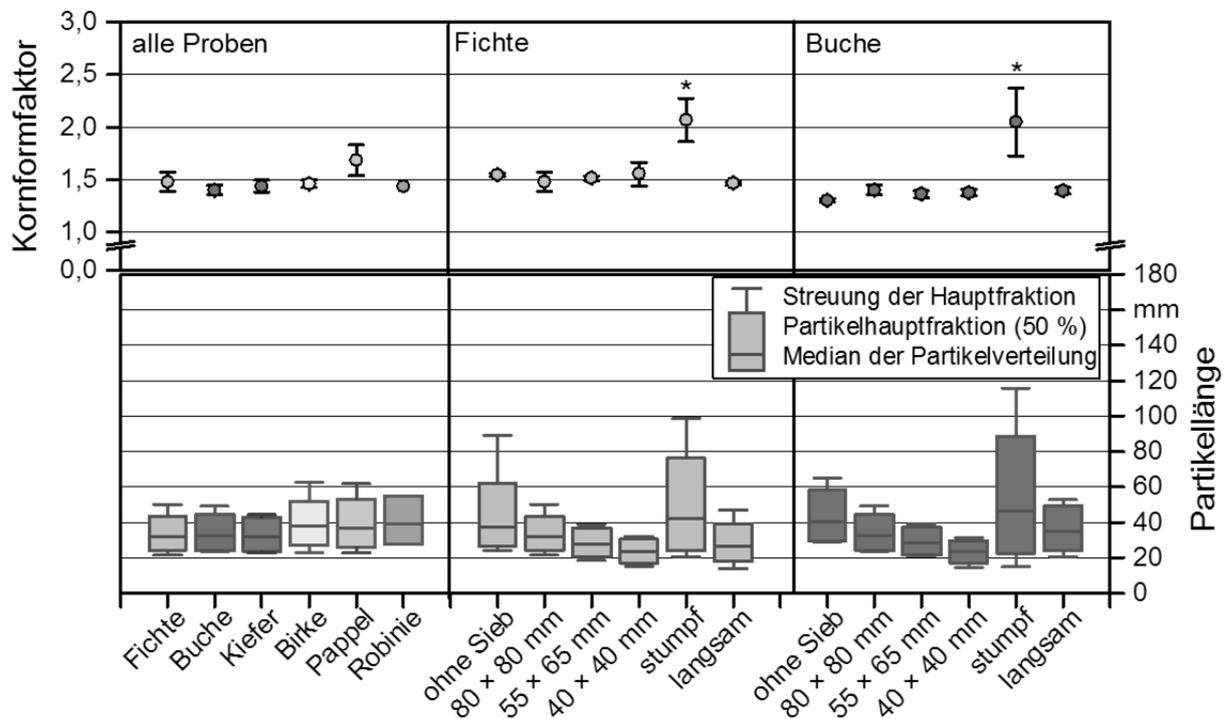


Abbildung 68: Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen nach dem Bildanalyseverfahren. Signifikanter Unterschiede zwischen Mittelwerten, dargestellt als * (Kornformfaktor, Hauptfraktion)

Insgesamt nahmen der Median der Partikelgrößenverteilung sowie die Spannweite der 50-%-Hauptfraktion bei der Verwendung feiner Siebkörbe deutlich ab. Die Partikel waren demnach kleiner und homogener als bei Verwendung von Siebkörben mit großer Lochweite. Stumpfe Messer führten zu einer deutlich inhomogeneren Partikelgrößenverteilung, vor allem durch die starke Zunahme grober Partikel. Daneben war die Partikelform deutlich heterogener als bei der Produktion mit scharfen Messern und wich wesentlich stärker von der Kreisform ab als bei den anderen Varianten (siehe die hohen Kornformfaktoren in Abbildung 68). Die Baumart und der Siebkorb hatten keinen messbaren Einfluss auf die Partikelform. Überdies wurde kein Unterschied in Partikelgröße und Partikelform aufgrund unterschiedlicher Einzugswalzengeschwindigkeiten (Abbildung 68) oder aufgrund des Trocknungszustands des Rohmaterials beobachtet (nicht gezeigt).

Die Schlussfolgerungen aus den Feldversuchen (Abschnitt 5.3.2.4) wurden in den stationären Hackversuchen mit dem elektrischen Trommelhacker bestätigt. Folglich lassen sich qualitativ sehr hochwertige Hackschnitzel aus Energierundholz herstellen [6][135], das sich durch einen niedrigen Aschegehalt und, bei Vortrocknung des Materials, einen

niedrigen Wassergehalt auszeichnet. Nadelholz hatte dabei leicht höhere Heizwerte als Laubholz. Die Schüttdichte wird vornehmlich durch die Baumart bestimmt, die Partikelgröße und die Partikelform dagegen durch den Herstellungsprozess. Engere Siebkörbe führten zu generell kleineren Partikeln und zu einer geringeren Spannweite der Hauptfraktion, aber auch zu einer Erhöhung des Feinanteils. Stumpfe Messer wirkten sich sehr negativ auf die Hackschnitzelqualität aus, wobei sie einen erhöhten Feinanteil, eine erhöhte maximale Partikellänge sowie eine deutlich inhomogenere Partikelform zur Folge hatten [74][148][149][189].

Im direkten Vergleich zu den Feldversuchen waren die Hackschnitzel, die mit dem elektrischen Trommelhacker hergestellt worden waren, von höherer Qualität. Unter Verwendung scharfer Messer und eines Siebkorbs waren die Chargen durchweg für kleine Feuerungen nach DIN EN ISO 17225-4 [61] geeignet.

5.5.2 Stationäre Versuche (zapfwellenbetriebene Hacker)

In den bisher vorgestellten Versuchen (Feldversuche, stationäre Versuche mit elektrischem Trommelhacker) wurde die für landwirtschaftliche Betriebe interessante Leistungsklasse der zapfwellenbetriebenen Hacker mit 100 bis 200 kW nur selten untersucht. Auch konnte der Einfluss unterschiedlicher Hackertypen (Trommel-, Scheibenrad- und Schneckenhacker) bisher weder in den Feldversuchen noch in den stationären Versuchen analysiert werden. Deshalb wurde im September 2013 eine weitere stationäre Versuchsreihe mit drei Hackern mittlerer Leistungsklasse durchgeführt.

5.5.2.1 Physikalische Eigenschaften des Rohholzes

Gehackt wurde Energierundholz (Buche und Fichte) sowie einmalig Restholz aus Weide. Die Stämme wurden auf 15 Chargen von mindestens 3 m³ reinen Holzvolumens aufgeteilt (Tabelle 71). Lediglich für die Versuche mit Weide konnte das Volumen des Rohmaterials vorab nicht bestimmt werden.

Die Stammdicke der Chargen orientierte sich am Maximaldurchmesser, der für die jeweilige Maschine zugelassen ist. Entsprechend war der Durchmesser der Stämme für den Schneckenhacker am geringsten und für den Trommelhacker am höchsten. Aufgrund der höheren Anzahl dünner Stämme konnten für den Schneckenhacker dabei nur eine geringere Menge an Rohmaterial verwendet werden (Tabelle 71).

Der Wassergehalt der Stämme lag zwischen 37,8 und 47,9 Ma.-% und war für die Chargen mit dünneren Stämmen etwas niedriger als bei den Versuchen mit dickeren Stämmen (Tabelle 71). Aschegehalt und Heizwert des Rohmaterials wurden nicht bestimmt.

Tabelle 71: *Stammdurchmesser, Volumen und Wassergehalt des Hackholzes bei den stationären Versuchen mit Hackern mittlerer Leistung*

Hacker	Variante	Durchmesser mm	Volumen m ³	Wassergehalt Ma.-%
Trommel- hacker	Fichte 45 × 60 mm	209 ± 42	3,93	46,7 ± 1,0
	Fichte 60 × 60 mm	201 ± 29	4,00	44,3 ± 0,4
	Fichte 80 × 80 mm	217 ± 45	4,01	47,9 ± 0,3
	Fichte stumpf	194 ± 43	3,86	46,1 ± 0,9
	Buche 45 × 60 mm	209 ± 22	4,35	42,7 ± 0,3
	Buche 80 × 80 mm	204 ± 14	3,23	43,5 ± 0,2
Schnecken- hacker	Fichte 20–30 mm	115 ± 18	3,15	37,8 ± 1,7
	Fichte 30–50 mm	114 ± 18	3,14	39,8 ± 2,3
	Fichte 40–70 mm	119 ± 19	2,16	46,3 ± 1,4
	Buche 20–30 mm	112 ± 14	1,21	39,7 ± 0,1
	Weide 20–30 mm			44,9 ± 0,9
Scheibenrad- hacker	Fichte Z540	159 ± 21	3,58	45,9 ± 0,6
	Fichte Z1000	163 ± 21	4,10	47,5 ± 0,3
	Fichte stumpf	153 ± 19	3,25	47,1 ± 0,3
	Buche Z540	150 ± 26	3,23	41,4 ± 0,3
	Buche Z1000	156 ± 22	3,72	42,0 ± 0,4

5.5.2.2 Schüttdichte und Stauchfaktor

Die auf einen Wassergehalt von 15 Ma.-% normierte Schüttdichte der Hackschnitzel lag zwischen 163 und 285 kg/m³ (Abbildung 69). Sie befand sich somit in derselben Größenordnung, die für Waldhackschnitzel beobachtet wurde (Abschnitt 5.3.2.3). Ebenso lag der Stauchfaktor mit 9,1 bis 10,4 Ma.-% in dem aus den Feldversuchen erwarteten Bereich. Analog zu den Ergebnissen der Feldversuche und der stationären Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker hing die Schüttdichte vornehmlich von der Baumart ab und war für Buche deutlich höher als für Fichte und Weide. Hackertyp und die Maschineneinstellung hatten dagegen nur geringen Einfluss (Abbildung 69).

Aus den Ergebnissen ist aber auch erkennbar, dass Hackschnitzel, die mit dem hier verwendeten Schneckenhacker hergestellt worden waren, geringfügig niedrigere Schüttdichten aufwiesen als Hackschnitzel, die mit dem Trommelhacker produziert worden waren (Abbildung 69). Als Erklärung kann hier die Partikelgrößenverteilung dienen, wobei die Hackschnitzel des Schneckenhackers kaum Partikel mit weniger als 16 mm Durchmesser aufwiesen und somit insgesamt größere Luftzwischenräume im Haufwerk bildeten (siehe unten).

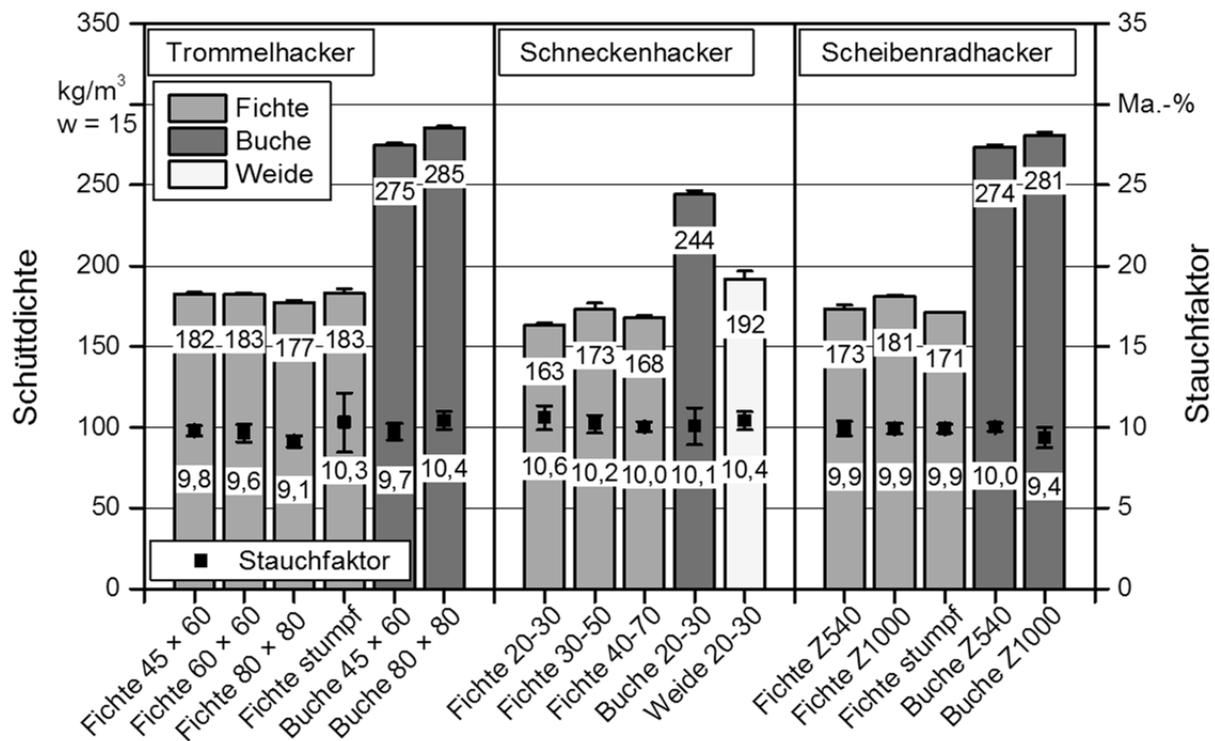


Abbildung 69: Schüttdichte (bezogen auf Wassergehalt $w = 15\%$) und Stauchfaktor der Hackschnitzelproben, produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ

5.5.2.3 Partikelgrößenverteilung und Partikelform

Die Partikelgrößenverteilung wurde analog der Feldversuche nach ISO-Norm mittels Plansiebverfahren bewertet. Erneut konnten alle Hackschnitzelproben nach DIN EN ISO 17225-1 [58] klassifiziert werden. Ebenso konnten die meisten Hackschnitzel in die Anforderungsklassen nach Teil 4 der Norm eingeordnet werden, wobei allerdings bei Proben, die mit einer groben Hackschnecke produziert worden waren, keine Zuordnung nach DIN EN ISO 17225-4 [61] möglich war (Tabelle 72), weil keine ausreichend große Hauptfraktion gebildet werden konnte. Zudem überschritt der Grobanteil die Grenzwerte der Norm (Tabelle 72). Zu beachten ist dabei, dass die Hackerschnecken mit den Schnittweiten 30–50 mm und 40–70 mm für die Produktion von Hackschnitzeln für die Holzvergasung ausgelegt sind, bei der homogene, aber sehr grobe Partikel mit wenig Feinanteil erwünscht sind. Die Partikelgrößenverteilung dieser Proben ist mit der Klasse P63 nach DIN EN ISO 17225-1 und mit Feinanteilen < 1 Ma.-% für diesen Anwendungszweck ideal. Eine Produktion von Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 [61] ist dagegen mit den beiden groben Schnecken nicht vorgesehen. Im Gegensatz dazu ist die Verwendung der Schnecke mit der Schnittweite von 20 bis 30 mm für kleine Feuerungen ausgelegt. Bei dieser Variante wurden die Anforderungen nach DIN EN ISO 17225-4 [61] problemlos erfüllt.

Tabelle 72: Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225-4 der Hackschnitzelproben produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ

Hackertyp	Variante	Klasse nach DIN EN ISO 17225-4	Ausschlusskriterium ¹
Trommelhacker	Fichte 45 × 60 mm Sieb	P31S	
	Fichte 60 × 60 mm Sieb	P31S	
	Fichte 80 × 80 mm Sieb	P31S	
	Fichte stumpf	P31S	
	Buche 45 × 50 mm Sieb	P31S	
	Buche 80 × 80 mm Sieb	P31S	
Schneckenhacker	Fichte 20–30 mm	P31S	
	Fichte 30–50 mm	keine ²	H, G
	Fichte 40–70 mm	keine ²	H, G
	Buche 20–30 mm	P31S	
	Weide 20–30 mm	P31S	
Scheibenradhacker	Fichte Z540	P31S	
	Fichte Z1000	P31S	
	Fichte stumpf	P31S	
	Buche Z540	P31S	
	Buche Z1000	P16S	

¹H = Hauptfraktion, G = Grobanteil, ²Probe entspricht der Klasse P63 nach DIN EN ISO 17225-1

Die mit dem Trommelhacker hergestellten Hackschnitzel folgten dem gleichen Trend wie bei den stationären Versuchen (Abbildung 70, Abschnitt 5.5.1.3). Erneut führte eine geringe Lochweite des Siebkorbs zu einer Erhöhung des Feinanteils, zu einer Erhöhung der kleinen Partikelfractionen < 16 mm sowie zu einer Abnahme der groben Partikelklassen > 31 mm. Stumpfe Messer erhöhten beim Trommelhacker den Feinanteil sowie die Anteile der Partikelfractionen < 16 mm.

Hackschnitzel, die mit dem Schneckenhacker produziert worden waren, zeigten im Vergleich zu den anderen beiden Hackern die niedrigsten Feinanteile (≤ 1 Ma.-%, Abbildung 70) [188]. Lediglich die Variante mit Weide (Restholz) hatte Feinanteile > 1 Ma.-%, wobei ihr Feinanteil mit 2,8 Ma.-% immer noch als sehr niedrig zu bewerten ist. Daneben waren die Anteile kleiner Partikel < 16 mm in der Weidenprobe aufgrund hoher Anteile an Blättern und feinen Ästen erhöht. Bei den übrigen Versuchen mit der feinen Hackerschnecke (20–30 mm) waren die Partikel sehr homogen und lagen zu mindestens 75 Ma.-% in der

Siebfraktion 16–31 mm. Eine Erhöhung der Schnittweite führte erwartungsgemäß zu einer Zunahme der groben Fraktionen > 31 mm.

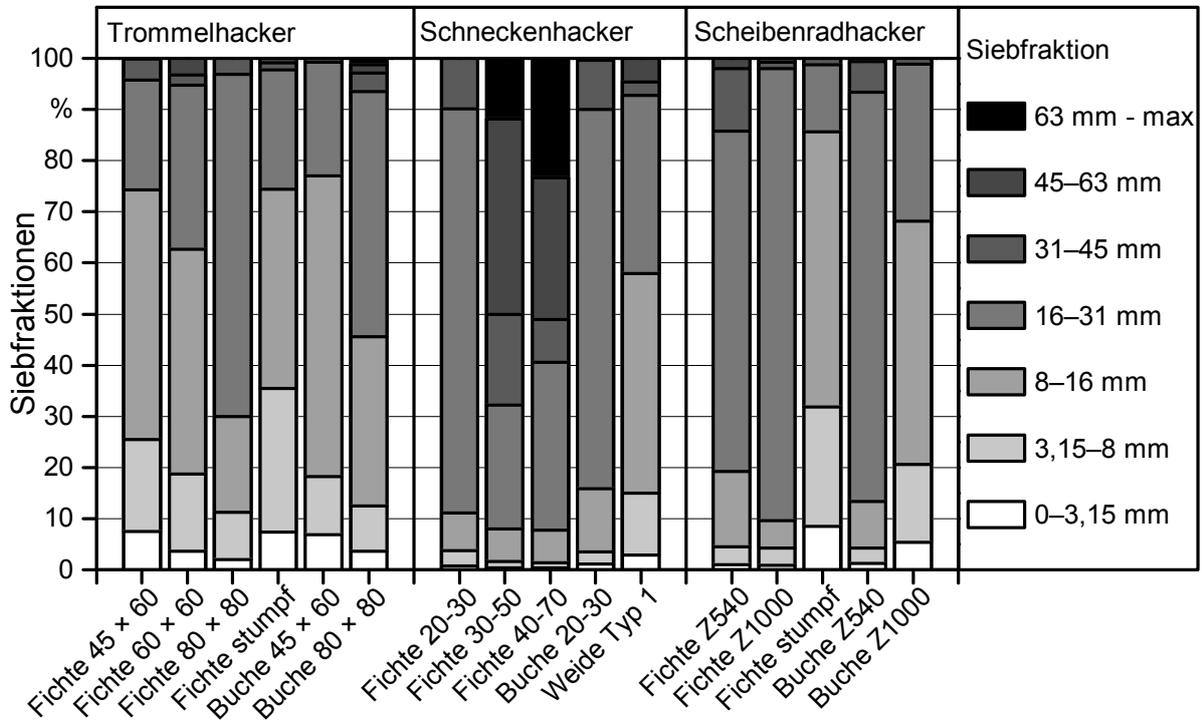


Abbildung 70: Siebfraktion der Hackschnitzelproben aus den stationären Versuchen der Hackschnitzelproben, produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ

Im Fall des Scheibenradhackers hatte die Verwendung stumpfer Messer eine Zunahme des Feinanteils und der Partikelfraktionen < 16 mm zur Folge (Abbildung 70). Dies wurde ebenso bei einer Erhöhung der Zapfwellendrehzahl für Buche, nicht jedoch für Fichte gemessen. Beim Hacken der harten Baumart Buche (Zapfwellendrehzahl = 1000 U/min), sowie bei der Verwendung stumpfer Messer (Fichte) wurde die Zapfwelle durch die höhere Belastung der Maschine häufig abgebremst (Unterkapitel 6.3). Die automatische Sicherung des Hackers („No-Stress-Funktion“), die bei einem starken Abfall der Zapfwellendrehzahl reagiert, bewirkte, dass der Einzugs regelmäßig gestoppt wurde. In diesem Fall lief das Schneidaggregat jedoch weiter. Durch die regelmäßigen kurzen Unterbrechungen erfolgten somit mehr Schnitte pro Meter eingezogenen Holzes, wodurch die Anteile feiner Partikel insgesamt zunahm.

Die Ergebnisse des Bildanalyseverfahrens bestätigen und ergänzen die Erkenntnisse aus dem Siebanalyseverfahren (Abbildung 71). Feinere Siebkörbe (Trommelhacker) führten auch nach dieser Analyse zu einer Verringerung der durchschnittlichen Partikelgröße (Medianwert). Die geringere Spannweite der 50%-Hauptfraktion bei der Verwendung von Siebkörben mit kleinen Lochweiten deutet dabei auf eine geringere Varianz

innerhalb der Partikelgrößenverteilung hin (Abschnitt 5.5.1.3). Stumpfe Messer erhöhten im Fall des Trommelhackers die Anteile grober Partikel, die maximale Partikellänge und die Varianz in der Partikelgrößenverteilung. Dies konnte aber mit dem Siebanalyseverfahren nicht gezeigt werden (siehe oben). Das Siebanalyseverfahren sortiert die Partikel nach dem Partikeldurchmesser und nicht nach der Partikellänge. Ein höherer Anteil kleiner Partikelklassen in der Siebanalyse bei gleichzeitig höherem Anteil langer Partikel aus der Bildanalyse deutet somit auf eine Erhöhung des Verhältnisses von Länge zu Breite hin (vgl. auch Partikelform weiter unten). Das produzierte Schüttgut war demnach insgesamt deutlich heterogener als bei der Verwendung scharfer Messer.

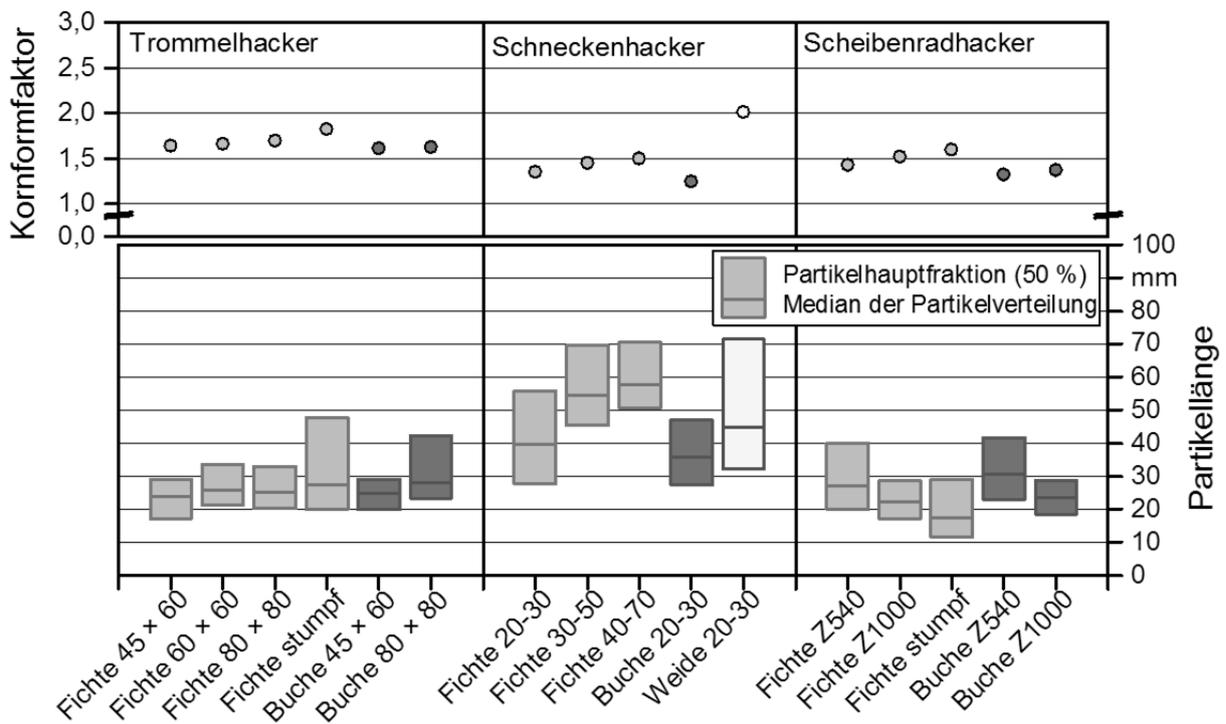


Abbildung 71: Kornformfaktor, Median der Partikellängen und Hauptfraktionen nach dem Bildanalyseverfahren der Hackschnitzelproben, produziert mit Hackern mittlerer Leistungsklasse in stationären Versuchen am TFZ

Im Fall des Schneckenhackers führte eine gröbere Hackerschnecke zu einer deutlichen Erhöhung der durchschnittlichen Partikellänge aus der Bildanalyse. Erneut zeigten sich beim Schneckenhacker geringere Anteile feiner Partikel im Vergleich zu den anderen beiden Hackern. Erwartungsgemäß war die Varianz der Partikel beim Hacken des Restholzes (Weide) am höchsten.

Eine Erhöhung der Zapfwellendrehzahl des Scheibenradhackers hatte eine deutliche Verringerung der durchschnittlichen Partikelgröße zur Folge. Da die Erhöhung der Drehzahl im Fall des verwendeten Hackers die Drehzahl des Schneidaggregats direkt erhöht, kommt es bei gleichbleibender Einzugsgeschwindigkeit zu mehr Schnitten pro Meter

eingezogenen Holzes. Stumpfe Messer führten analog zur Siebanalyse zu einem höheren Anteil an feinen Partikeln.

Im Fall des Schneckenhackers, bei dem die Drehung der Hackerschnecke auch für den Einzug in das Hackaggregat verantwortlich ist, führt eine Erhöhung der Zapfwellendrehzahl naturgemäß nicht zu einer Veränderung der Schnittweite. Beim Trommelhacker hat die Zapfwellendrehzahl dagegen wiederum starken Einfluss auf die Größenverteilung.

Die Partikelform aller Proben war im Vergleich zu den Feldversuchen sehr homogen. Die insgesamt sehr niedrigen Kornformfaktoren deuteten dabei auf sehr scharfkantig geschnittene Hackschnitzel hin (Abbildung 71). Die gleichmäßigste Partikelform wies der Schneckenhacker auf [188]. Größere Siebkörbe, größere Hackerschnecken, eine höhere Zapfwellendrehzahl und vor allem stumpfe Messer erhöhten die Varianz in der Hackschnitzelform. Vor allem führte jedoch die Verwendung von Restholz zu deutlich heterogenerem Material. Die Ergebnisse decken sich somit mit den Erkenntnissen aus den Feldversuchen.

Insgesamt konnten mit allen drei Hackern unter den gegebenen Versuchsbedingungen am TFZ qualitativ sehr hochwertige Hackschnitzel aus Energierundholz hergestellt werden. Alle drei Maschinen sind somit gut für die Produktion von Hackschnitzeln aus dem Premiumsegment nach DIN EN ISO 17225-4 [61] für kleine Feuerungen geeignet. Insgesamt ist dabei mit dem verwendeten Trommelhacker aufgrund seines breiten Einzugs die größte Bandbreite unterschiedlicher Rohmaterialien möglich. Die beste Hackschnitzelqualität für kleine Feuerungen wurde dagegen mit dem verwendeten Schneckenhacker unter Verwendung der Hackerschnecke mit geringer Schnittweite erzielt. Hervorzuheben ist dabei die Eignung des Schneckenhackers für die Produktion von Hackschnitzeln für die Anwendung in Festbettvergäsern. Der Scheibenradhacker stellte mit mittlerer Einzugsbreite und ebenfalls optimaler Brennstoffqualität eine Zwischenstufe der Vorteile von Trommel- und Schneckenhacker dar.

Bei den hier dargestellten Ergebnissen handelt es sich um eine Fallstudie, bei der alle Maschinen unter möglichst gleichbleibenden Prozessbedingungen getestet wurden. Daher sollte erwähnt werden, dass die Hackschnitzelproduktion für jede Maschine und für das jeweilige Rohmaterial weiter optimiert werden kann, z. B. durch eine gezielte Anpassung der Einzugsgeschwindigkeit.

5.6 Zusammenfassung der Einflüsse auf die physikalische Hackschnitzelqualität

Während der Feldversuche (Unterkapitel 5.3) konnte eine Vielzahl möglicher Einflüsse auf die Qualität von Hackschnitzeln nachgewiesen werden. Dabei hatten sowohl das Rohmaterial, die Vorkette und der verwendete Maschinentyp als auch die Maschineneinstellung erheblichen Einfluss auf die Brennstoffqualität. Die stationären Versuche am TFZ (Kapitel 5.5) stärkten dabei die Schlussfolgerungen aus den Feldversuchen und ergänzten diese durch systematische Abstufung der Einflussgrößen. Im Folgenden werden die wichtigsten Beobachtungen aus den Versuchsreihen zusammengefasst und Praxisempfehlungen abgeleitet.

Baumart (Feldversuche, stationäre Versuche): Die Baumart hat maßgeblichen Einfluss auf die Schüttdichte der Brennstoffe, die im Wesentlichen durch die holzartenspezifische Rohdichte festgelegt wird. Weiterhin hat die Baumart Einfluss auf den Heizwert der Hackschnitzel und auf den Wassergehalt des frisch geschlagenen Holzes. Die Rohdichte der Baumarten beeinflusst dabei indirekt auch die Partikelgrößenverteilung, wenn z. B. die Maschine beim Hacken durch die Härte des Holzes überlastet wird (vgl. Scheibenradhacker in Abschnitt 5.5.1.3).

Sortiment (Feldversuche, stationäre Versuche): Das Sortiment beeinflusst den Aschegehalt und den Heizwert der Hackschnitzel, der direkt vom Anteil an Rinde, Blättern, Nadeln und reinem Stammholz abhängt. Waldrestholzsortimente zeigen hohe Anteile an Feinmaterial und an Überlängen. Die aus Waldrestholz produzierten Hackschnitzel sind dementsprechend deutlich inhomogener als Hackschnitzel aus Energierundholz. Energierundholz wurde in allen Versuchsreihen als am besten geeignetes Rohmaterial für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel für kleine Feuerungen identifiziert.

Trocknungszustand (Feldversuche, stationäre Versuche): Frische Waldhackschnitzel übersteigen den idealen Wassergehalt für kleine Feuerungen (≤ 35 Ma.-%), jedoch lässt sich dieser durch Trocknung im ungehackten Zustand über die Dauer von mindestens einem Sommer erreichen.

Eintrag von Mineralboden (Feldversuche): Ein Eintrag von Fremdmaterial im Brennstoff, vor allem durch Mineralboden, führt zu einer erheblichen Erhöhung des Aschegehalts und senkt den Anteil des brennbaren Materials. Die damit verbundenen hohen Anteile an Silizium und anderen Elementen (z. B. Schwermetalle) können zu einem veränderten Ascheschmelzverhalten führen oder die Entsorgung der Asche erschweren (siehe TFZ-Bericht „Qualität von Holzhackschnitzeln aus Bayern“). Weiterhin führt ein erhöhter Bodenanteil im Brennstoff zu stärkerem Verschleiß der Hackmesser. Der Eintrag von Mineralboden kann in allen Abschnitten der Verfahrenskette stattfinden und sollte in jedem Fall vermieden werden.

Schneidaggregat (stationäre Versuche): Das Schneidaggregat beeinflusst die Partikelform der Hackschnitzel sowie deren Feinanteil. Dabei zeigen Hackschnitzel, die mit einem Schneckenhacker hergestellt werden, die geringsten Feinanteile (Fallstudie). Höhe-

re Feianteile werden dagegen bei Trommelhackern beobachtet. Als Folge ist die Schüttdichte beim Schneckenhacker geringer als beim Trommelhacker.

Messerschärfe (Feldversuche, stationäre Versuche): Die Verwendung stumpfer Messer führt zu hohen Feianteilen, zerfaserten Partikelrändern und zu einer Erhöhung der Anteile grober Partikel und Überlängen. Die Größenverteilung der produzierten Hackschnitzel ist dabei in der Regel nicht klassifizierbar nach DIN EN ISO 17225-4. Eine Verwendung dieser Hackschnitzel in kleinen Feuerungen ist daher häufig problematisch. Weiterhin kann die Verwendung stumpfer Messer die Maschine stark belasten (vgl. Scheibenradhacker Abschnitt 6.4.2). Die erhöhte Partikeloberfläche kann zudem die Trockenmasseverluste bei der Lagerung erhöhen (nicht untersucht). Für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel sollte die Verwendung stumpfer Messer daher dringend vermieden werden.

Siebkorböffnung (Feldversuche, stationäre Versuche): Feinere Siebkörbe mit geringerer Lochweite führen beim Trommelhacker zu einer Verringerung der durchschnittlichen Partikelgröße und verringern die Anteile an Überlängen. Daneben erhöhen kleine Siebkorböffnungen allerdings auch den Feianteil. Ein idealer Siebkorb konnte für die Produktion von Hackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225-4 nicht identifiziert werden.

Austragsystem (Feldversuche): Ein Einfluss des Austragsystems konnte in den hier durchgeführten Feldversuchen aufgrund der geringen Probenanzahl mit Förderband nicht nachgewiesen werden. Allerdings erscheint es wahrscheinlich, dass der Feianteil und die Schüttdichte im Lkw etwas geringer sind, wenn anstelle eines Gebläses ein Förderband eingesetzt wird [151][189].

Schnittweite der Hackerschnecke (stationäre Versuche): Die Hackerschnecke bestimmt maßgeblich die Partikelgrößenverteilung beim Schneckenhacker. Je größer die Schnecke, desto größer ist auch die Hauptfraktion der Brennstoffe. Abhängig von der Nutzung sollten daher geringe (private Feuerungen) oder gröbere Schnittweiten (Festbettvergaser, Heizwerke) verwendet werden.

Einzugswalzengeschwindigkeit, Zapfwelldrehzahl und Drehzahl des Schneidaggregats (stationäre Versuche): Das Verhältnis der Einzugsgeschwindigkeit zur Drehzahl des Schneidaggregats ändert maßgeblich die Größe der Hackschnitzel sowie deren Feianteil. Eine Verringerung der Einzugswalzengeschwindigkeit führt dabei zu einer Zunahme der kleinen Partikelfraktionen, da sich die Anzahl an Schnitten pro Meter eingezogenen Holzes erhöht. Eine Verringerung der Drehzahl des Schneidaggregats bewirkt das Gegenteil. Die Zapfwelldrehzahl hat dann einen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung, sobald sich mit ihr die Drehzahl des Schneidaggregats bei gleichbleibender Einzugsgeschwindigkeit ändert (siehe Scheibenradhacker Abschnitt 5.5.2.3). Auf Hackertypen, die das Holz direkt über das Schneidaggregat einziehen (z. B. bei stationär verwendetem Schneckenhacker), hat die Drehzahl der Zapfwelle dagegen keinen Einfluss. Die ideale Abstimmung des Einzugs und der Drehzahl des Schneidaggregats sollte für die jeweilige Maschine und für das jeweilige Rohmaterial vor Ort optimiert werden.

Trommelbauweise und Messerschnittweite (nicht untersucht): Die Hackertrommel kann durchlässig für Hackschnitzel sein. Bei offenen Trommeln kann es somit zu einer weiteren Prallzerkleinerung der Partikel kommen. Dies konnte in der aktuellen Studie nicht untersucht werden, da entweder nur offene Trommeln (Feldversuche, stationäre Versuche mit Schlepper) oder nur eine geschlossene Trommel zum Einsatz kam (elektrischer Trommelhacker). Weiterhin kann die Schnittweite zwischen Messer und Gegen-schneide beim Trommel- und beim Scheibenradhacker in der Regel stufenlos eingestellt werden, wodurch sich die mittlere Partikelgröße verändert. Die Schnittweite muss zusammen mit der Drehzahl des Einzugs, der Drehzahl des Schneidaggregats und im Fall von Trommelhackern mit dem verwendeten Prallsieb an das Rohmaterial und den Verwendungszweck angepasst werden.

Erfahrungsgrad des Maschinenführers (Feldversuche, stationäre Versuche): Entscheidend für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel ist neben dem Ausgangsmaterial und der Maschine vor allem der Maschinenführer. Abhängig vom Erfahrungsgrad des Bedieners kann es hierbei zu erheblichen Qualitätsunterschieden bei der Brennstoffproduktion kommen. Unsaubere Kranführung kann einen erhöhten Eintrag von Mineralboden zur Folge haben. Auch ist eine gleichmäßige Beschickung des Hackers nötig, bei der z. B. die Hackertrommel nicht leerläuft. Beim regelmäßigen Leerlaufen der Trommel haben grobe Partikel die Möglichkeit, sich senkrecht zum Prallsieb aufzustellen und dieses zu passieren. Hierdurch erhöht sich der Anteil an Überlängen, sodass die Verwendung des Brennstoffs in kleinen Feuerungen kritisch wird. Im Gegensatz dazu führt die Überlastung der Maschine durch zu starke Beschickung zu regelmäßigen Unterbrechungen des Einzugs, wodurch sich u. a. der Feinanteil stark erhöhen kann.

Für die Produktion von Hackschnitzeln für kleine Feuerungen lassen sich gezielt Empfehlungen für die Praxis erstellen (Tabelle 73).

Tabelle 73: Empfehlung für die Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel für kleine Feuerungen (nach DIN EN ISO 17225-4 [61])

Variante	Empfehlung
Rohmaterial	Energierundholz
Trocknung	vorgetrocknet im Polter, technische Trocknung (Kapitel 7)
Mineralboden	Eintrag vermeiden
Schneidaggregat	kein unmittelbarer Einfluss
Messerschärfe	scharfe Messer
Auswurfssystem	evtl. Vorteile für Förderbänder
Siebkorb	grobe Siebkörbe (> 80 × 80 mm) vermeiden
Hackerschnecke	geringe Schnittweite (20–30 mm)
Einzug	Abzustimmen auf Drehzahl des Schneidaggregats
Maschinenführer	hoher Erfahrungsgrad, regelmäßige Schulung

Insgesamt hat sich die Verwendung von Energierundholz als ideal für die Produktion von Hackschnitzeln der Klassen A1 und A2 (nach DIN EN ISO 17225-4 [61]) erwiesen. Brennstoffe, die hohe Anteile an grüner Biomasse beinhalten (z. B. Waldrestholz, Holz aus der Straßenrandpflege, Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Holz aus dem urbanen Bereich), erreichen dagegen i. d. R. maximal die Klassen B1 und B2 und sind zudem meist für kleinere Feuerungen nicht ohne weitere Aufbereitung (z. B. Trocknung, Siebung) geeignet. Kritische Sortimente sollten deshalb vermehrt für größere Anlagen (z. B. ab 1.000 kW, nach 4. BImSchV) vorgesehen werden.

Bei Vortrocknung im ungehackten Zustand, wie es im landwirtschaftlichen Bereich häufig der Fall ist, werden die gewünschten Wassergehalte erreicht, weshalb dieses Verfahren im Sinne einer hohen Brennstoffqualität zu empfehlen ist. Für Premiumhackschnitzel ist zudem zwingend die Verwendung scharfer Messer ausschlaggebend.

Schlussendlich hängen die Empfehlungen, die hinsichtlich der Brennstoffqualität getroffen werden können, vornehmlich vom vorgesehenen Einsatzzweck ab. Hierbei gilt es zu beachten, dass bei der Produktion qualitativ hochwertiger Hackschnitzel nicht über das Ziel hinaus gearbeitet wird. Während kleine Feuerungen oder auch Festbettvergaser auf eine hohe und definierte Brennstoffqualität angewiesen sind, steigt die Brennstoffflexibilität bei großen Heizwerken.

6 Energiebedarf und Durchsatzleistung (stationär)

DANIEL KUPTZ, PETER TUROWSKI & HANS HARTMANN

Der spezifische Energiebedarf und die Durchsatzleistung stellen wesentliche Verfahrenskenngrößen bei der Herstellung von Hackschnitzeln dar. Bislang gibt es hierzu jedoch kaum belastbare Daten. Eine grobe Abschätzung der Verbrauchswerte in Abhängigkeit der Maschinenleistung konnte durch die Aufnahmen bei den Feldversuchen erarbeitet werden (Abschnitt 4.3.5). Dabei zeigte sich, dass Kraftstoffverbrauch und Durchsatzleistung von der Holzart, dem Sortiment, der Leistung der Trägermaschine und den Maschineneinstellungen abhängen können. Hierbei handelt es sich jedoch um Fallstudien, bei denen nicht steuernd in die Prozesskette eingegriffen wurde. Die Ergebnisse unterliegen demnach einer hohen Streuung.

Ziel des Kapitels 6 ist es, ausgewählte Prozessparameter in stationären Hackversuchen zu variieren, um deren Einfluss auf den Durchsatz und den Verbrauch zu ermitteln. Dabei können weitere Optimierungsempfehlungen für einen ressourceneffizienten Umgang mit den Energieträgern entwickelt werden.

6.1 Stand des Wissens

6.1.1 Kraftstoffbedarf forstwirtschaftlicher Maschinen

Der Kraftstoffverbrauch forstlicher Arbeitsmaschinen (Harvester, Forwarder, Rückschlepper) liegt zwischen 5 und 20 l pro Maschinenarbeitsstunde (MAS) [197]. Spitzenposition nehmen vor allem leistungsstarke Maschinen, z. B. Harvester > 140 kW ein. Der spezifische Verbrauch, z. B. der Kraftstoffbedarf pro Fm aufgearbeiteten Holzes (l/Fm), muss dabei nicht zwangsläufig für die leistungsstärkste Maschine am höchsten sein [197]. Vielmehr kann ein hoher Verbrauch durch eine hohe Durchsatzleistung kompensiert werden (Abschnitt 4.3.5).

Für Hacker existieren bisher kaum belastbare Verbrauchswerte. Durchschnittswerte von 36 l/h (reine Hackzeit) [23] bzw. Wertebereiche von 28,1 bis 45,7 l/h [189] decken sich jedoch mit den Ergebnissen aus Abschnitt 4.3.5 (durchschnittlich 44,5 l/h reine Hackzeit bzw. 34,6 l/MAS). Der Kraftstoffverbrauch von Hackern liegt somit deutlich über den Verbräuchen anderer Forstmaschinen.

Das Kuratorium für Waldarbeit und Forstwirtschaft (KWF) geht davon aus, dass der Kraftstoffbedarf von Forstmaschinen durch Verbesserungen in der Arbeitsweise um bis zu 20 % gesenkt werden kann [198]. Für Hacker wurde dabei ein positiver Effekt bei der Verwendung scharfer anstelle stumpfer Messer beobachtet [23][149][148]. Dieser Effekt lässt sich nicht nur auf forstliche Hacker beschränken, sondern wird in allen Bereichen der Landwirtschaft beobachtet, bei denen der Einsatz von Messern notwendig ist. So ist z. B. der Dieserverbrauch von Mähdreschern beim Häckseln von Stroh mit stumpfen Klingen um 5 bis 10 % höher als mit scharfen Klingen [36]. Neben der Messerschärfe kann die Verwendung eines feinen Siebkorbs bei Trommelhackern zu einer Zunahme

des spezifischen Kraftstoffverbrauchs führen (l/t_{atro}) [149]. Weiterhin können rohstoffbedingte Prozessparameter, z. B. die Holzart, das Sortiment und der Trocknungszustand des Holzes den Kraftstoffverbrauch verändern [189].

6.1.2 Durchsatzleistung von Hackern

Ebenso wie beim Kraftstoffverbrauch sind nur wenige belastbare Werte für die Durchsatzleistung bei der Produktion von Hackschnitzeln bekannt. Die Durchsatzleistung von Hackern wird dabei in Volumen oder in Masse pro Zeit gemessen. Einzelne in Fallstudien beobachtete Werte lagen zwischen 71,4 und 153,6 Srm/h (reine Hackzeit) [176] bzw. zwischen 7,5 und 17,5 t_{atro}/h [23][189]. Laut Herstellerangaben liegt die Durchsatzleistung einzelner Hochleistungshacker unter Idealbedingungen sogar deutlich über 200 Srm/h.

Typischerweise produzieren leistungsstarke Maschinen in der gleichen Zeit höhere Mengen an Schüttgut als leistungsschwächere Hacker [174] (Abschnitt 4.3.5). Die Werte aus den Studien sind jedoch starken Schwankungen unterworfen, da rohstoff- und maschinenbedingte Prozessparameter ebenso zu einer Erhöhung oder Verringerung der Durchsatzleistung führen können. Beispielsweise wurde eine Abnahme der Durchsatzleistung von bis zu 15 % pro h beobachtet, wenn mit stumpfen anstelle scharfer Messer gehackt wurde [74][148][190]. Die Leistung verschlechtert sich dabei kontinuierlich mit zunehmendem Abnutzungsgrad der Messer, wobei sie um bis zu 0,15 % pro t_{atro} abnehmen kann [23]. Neben maschinenbedingten Einflüssen kann auch das Rohmaterial die Durchsatzrate erheblich beeinflussen. So nimmt die Produktion von Schüttgut stark ab, wenn Waldrestholz und grobe Äste anstelle von Stammholz gehackt werden, da durch das deutlich lockerer gepackte Rohmaterial weniger Masse dem Hacker bei gleicher Arbeitszeit zugeführt wird [6][135][148][189].

Um die Belastungen für die Maschine während des Betriebs geringzuhalten, besitzen viele Hacker eine automatische Sicherung („No-Stress“), die beim Abbremsen der Hackertrommel bzw. der Zapfwelle die Einzugswalzen anhält. Hierdurch wird die Zufuhr kurzfristig gestoppt, weshalb sich der Hackprozess insgesamt verlängert. Die Durchsatzrate nimmt folglich ab. Einzelne Rohmaterialien könnten diesen Effekt aufgrund ihrer Härte stärker hervorrufen. Daneben kann eine Überlastung der Maschine auch durch zu große Mengen gleichzeitig zugeführten Hackguts erfolgen.

Betrachtet man anstelle der reinen Hackzeit die Maschinenarbeitszeit (MAS = reine Hackzeit + Rüsten, Rangieren und Unterbrechungen < 15 min) oder die Gesamtarbeitszeit (GAZ = MAS inklusive Unterbrechungen > 15 min, siehe Abschnitt 4.3.4), so haben neben maschinen- und rohstoffbedingten Einflüssen vor allem der Erfahrungsgrad des Maschinenführers und das Management der Prozesskette erheblichen Einfluss auf die Durchsatzleistung bei der Produktion. Lange Standzeiten, unsachgemäße Wartung der Maschine oder lange Pausen durch unnötiges Rangieren auf der Fläche machen mitunter bis zu 40–50 % der Arbeitszeit aus [174] (Abschnitt 4.3.4).

6.2 Material und Methoden

Die stationären Messungen zum Kraftstoffverbrauch und zur Durchsatzleistung erfolgten parallel zu den Versuchen zur physikalischen Hackschnitzelqualität (Unterkapitel 5.5). Insgesamt wurden 74 Hackschnitzelchargen analysiert. Dabei kam zunächst ein elektrischer Trommelhacker (Vecoplan VTH 45/12/2, Abschnitt 5.2.2.1), in späteren Versuchsreihen drei zapfwellenbetriebene Hacker mittlerer Leistungsklasse, d. h. ein Trommel-, ein Schnecken- und ein Scheibenradhacker zum Einsatz (Heizohack HM 8 400, Laimet HP 21 und Farmi 260 CH HF-2EL, Abschnitt 5.2.3.1). Als Trägermaschine wurde ein rapsölbetriebener John-Deere-Schlepper (Typ 6210R) verwendet.

6.2.1 Volumen und Masse des Rohmaterials

Gehackt wurde vornehmlich Energierundholz. Bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker kamen sechs Baumarten (Fichte, Buche, Kiefer, Birke, Pappel und Robinie), bei den Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern zwei Baumarten (Fichte, Buche) zum Einsatz (siehe Abschnitte 5.5.1.1 und 5.5.2.1). Einmalig wurde mit dem Schneckenhacker Restholz aus Weide gehackt. Neben unterschiedlichen Rohmaterialien wurden die Maschineneinstellungen variiert. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsreihen findet sich in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3.

Das Rohmaterial wurde vorab in Chargen unterteilt. Für jeden Stamm wurden das Volumen und die Masse bestimmt. Für die Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker wurde das Volumen als Kegelstumpf berechnet. Hierzu wurden der obere und untere Durchmesser der Stämme sowie die Länge in mm mithilfe einer elektrischen Schieblehre (Messschieber 412810 150, Horex) und eines Maßbands (Loggers Tape JA, Spencer) bestimmt. Für die Versuche mit den zapfwellenbetriebenen Hackern wurde das Volumen als Zylinder über den Mitteldurchmesser und die Länge der Stämme berechnet. Der Mitteldurchmesser wurde mithilfe einer elektronischen Messkluppe (Messer Excaliper, Savcor IT GmbH) auf mm genau gemessen. Die Länge wurde erneut mithilfe des Maßbands bestimmt. Die Bestimmung der Stammdurchmesser erfolgte jeweils durch zwei Messungen, wobei die Kluppe/Schieblehre bei der zweiten Messung im 90°-Winkel zur Erstmessung angesetzt wurde (Abbildung 72).

Das Volumen der Stämme wurde in m³ inklusive Rinde berechnet (m³ m. R.). Weiterhin wurde der Erntefestmeter mit Rinde (Efm m. R.) durch Abrunden der Durchmesser und der Erntefestmeter ohne Rinde (Efm o. R.) durch Abzug der Rinde vom Durchmesser analog der Ermittlung des forstlichen Volumens nach RVR [37] berechnet (siehe auch Kapitel 8).

Die Masse der Stämme wurde mithilfe einer Plattformwaage (GPW-30K-B1, PESA Waagen GmbH) bzw. mithilfe einer Kranwaage (DINI ARGEO MCW 1500, AS-Wägetechnik GmbH) bestimmt (Abbildung 72). Im Fall der Chargen für den elektrischen Trommelhacker wurde die Masse der Stämme auf 1 g genau gemessen, im Fall der Chargen für die zapfwellenbetriebenen Hacker auf 100 g. Nach den Hackversuchen wurde für jede

Probe der Wassergehalt bestimmt, mithilfe dessen sich die Masse der Chargen auf t_{atro} umrechnen lässt (Abschnitt 5.2.4.4).

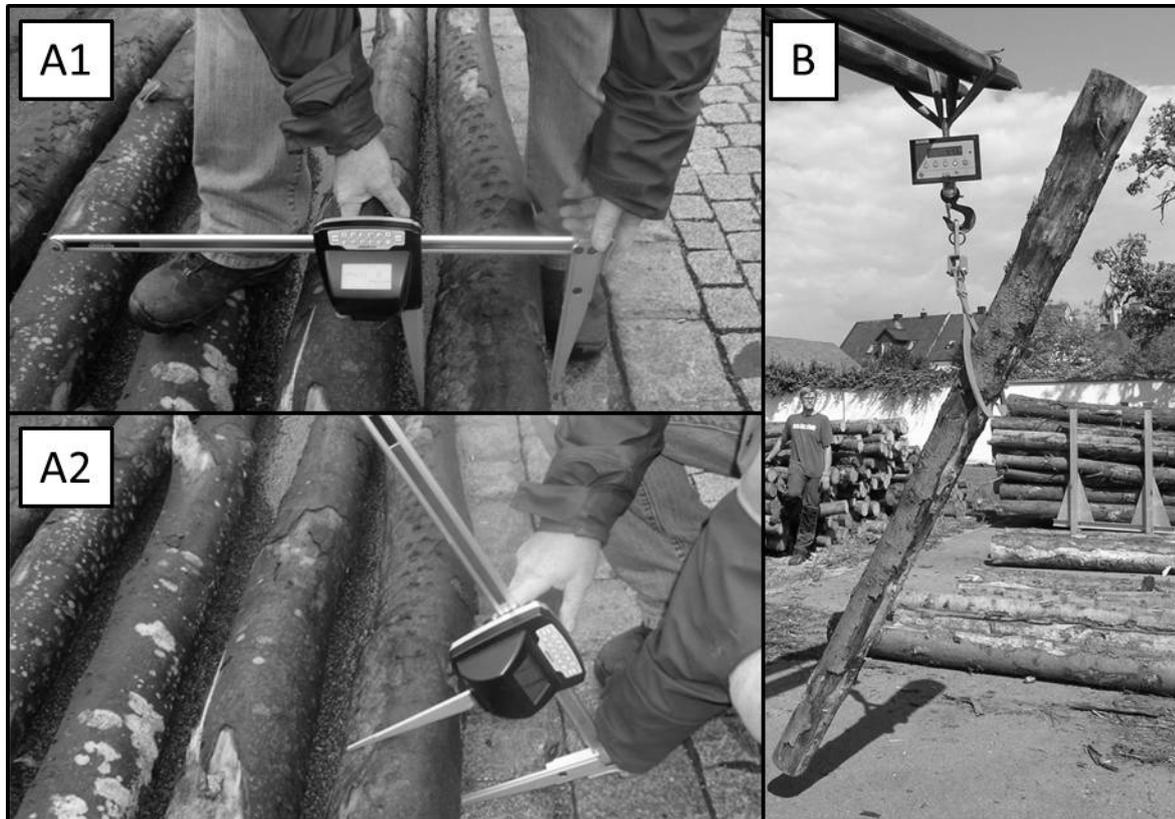


Abbildung 72: Bestimmung des Mitteldurchmessers (A1, A2) und der Masse der Einzelstämme für die stationären Hackversuche am TFZ

6.2.2 Durchführung der stationären Hackversuche

Alle Versuche wurden auf dem Betriebsgelände am TFZ durchgeführt. Für die Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker wurden die Stämme manuell über eine Vibrorinne zugeführt. Die Beschickung erfolgte dabei konstant ohne Unterbrechung des Hackprozesses. Gehackt wurde in eine Kiste, die unterhalb der Hackertrommel stand. Zur leichteren Handhabung der Hackschnitzel war die Kiste vorab mit einem Big Bag ausgelegt.

Bei den Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern war eine Handbeschickung aufgrund der Masse der Stämme nicht immer möglich. Stattdessen wurden im Fall des Trommelhackers und des Scheibenradhackers jeweils fünf bis sechs Stämme mit dem Kran eines forstlichen Rückezugs auf der Gabel eines Gabelstaplers und eines Frontladers abgelegt. Mithilfe des Staplers/Frontladers konnten die Stämme auf die Höhe des Einzugstrichters des Hackers angehoben und manuell in den Trichter geschoben werden (Abbildung 73). Hierdurch war eine konstante Beschickung von fünf bis sechs Stämmen möglich. Die parallele Verwendung zweier Maschinen zum Transport der Stämme (Gabelstapler und Frontlader) ermöglichte dabei, die Wartezeiten zwischen den Einzella-

dungen zu minimieren. Im Gegensatz zum Scheibenradhacker und zum Trommelhacker war bei den Versuchen mit dem Schneckenhacker aufgrund der geringeren Stammdurchmesser eine Beschickung per Hand möglich (Tabelle 71 in Abschnitt 5.5.1.1).

Gehackt wurde jeweils in einen kippbaren landwirtschaftlichen Container mit bekanntem Leervolumen (Abbildung 73).



Abbildung 73: Semimanuelle Beschickung der zapfwellenbetriebenen Hacker bei den stationären Versuchen am TFZ

6.2.2.1 Energiebedarfsmessung des elektrischen Trommelhackers

Während aller Versuche wurde kontinuierlich der Energiebedarf ermittelt. Der elektrisch betriebene stationäre Trommelhacker am TFZ ist hierzu mit einem Energiezähler (WM22-DIN AV5.3.D., Carlo Gavazzi GmbH) ausgestattet. Während des Hackens können so die elektrische Leistung (in kW) und der Energieverbrauch (in kWh) gemessen werden. Die Stromzufuhr der Vibrorinne erfolgt gesondert, sodass der Stromzähler ausschließlich die Energie erfasst, die durch die Hackertrommel und die Einzugswalzen verbraucht wird. Neben der Energie wurden die Geschwindigkeit der Hackertrommel (U/min) und die Geschwindigkeit der Einzugswalzen (U/min) bestimmt. Die kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte erfolgte über LabView 2010.

6.2.2.2 Kraftstoffbedarfsmessung der zapfwellenbetriebenen Hacker

Bei den Versuchen mit den drei zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistungsklasse wurde der Kraftstoffverbrauch direkt über den Verbrauch der Trägermaschine be-

stimmt. Dazu wurde am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet, dessen Gewicht über eine Waage (Tischwaage KB60.2, Mettler-Toledo) kontinuierlich ermittelt wurde. Die Gewichtsmessung erfolgte dabei im Sekundentakt, die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über lineare Regressionsberechnung alle zehn Sekunden (Abbildung 74).

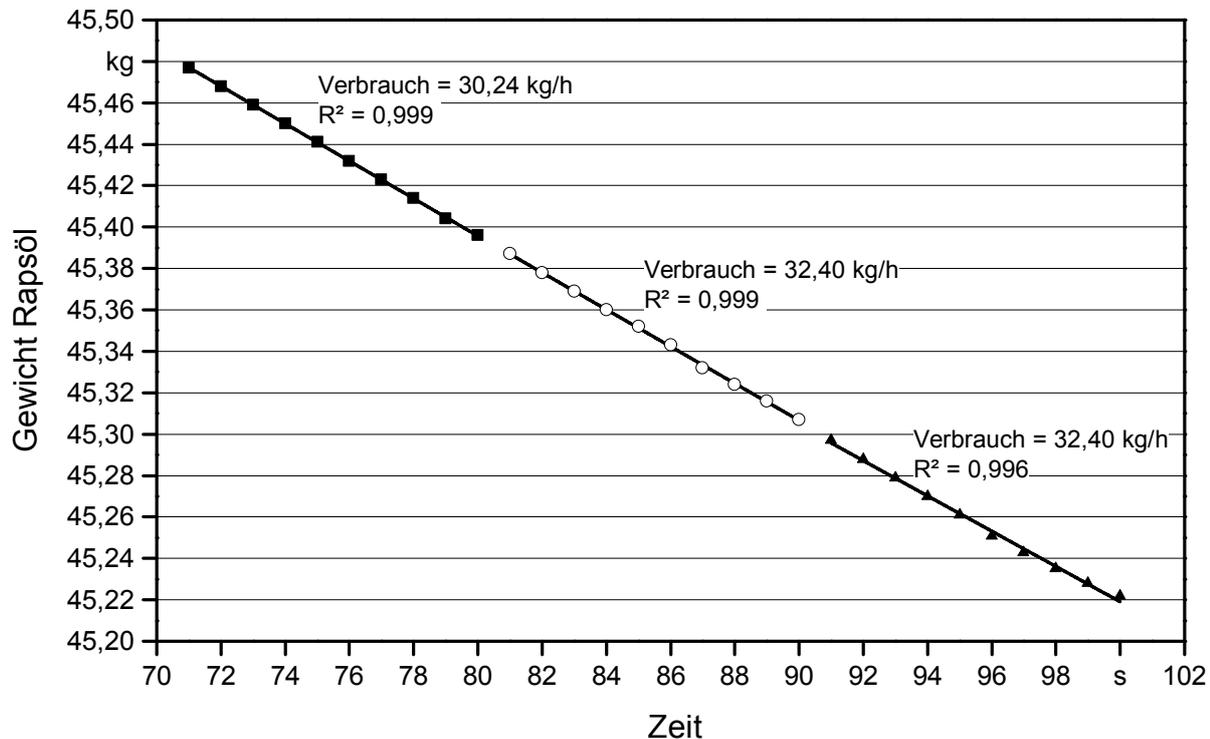


Abbildung 74: Beispiel für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über lineare Regressionen bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern

Zeitgleich wurde über die Software des Schleppers die Drehzahl der Zapfwelle gemessen. Die Erfassung der Messwerte erfolgte erneut über LabView 2010. Eine detaillierte Beschreibung des Messaufbaus zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs rapsölbetriebener Schlepper am TFZ findet sich in TFZ-Bericht 32.

6.2.2.3 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Hackzeiten

Aus den Werten der Energiebedarfs- bzw. der Kraftstoffverbrauchsmessung wurden die Hackzeit und der durchschnittliche Energiebedarf ermittelt. Abbildung 75 gibt ein Beispiel für eine typische Messung des Kraftstoffverbrauchs mit dem rapsölbetriebenen Schlepper wieder. Die Auswertung der Versuche mit dem elektrischen Hacker erfolgte analog.

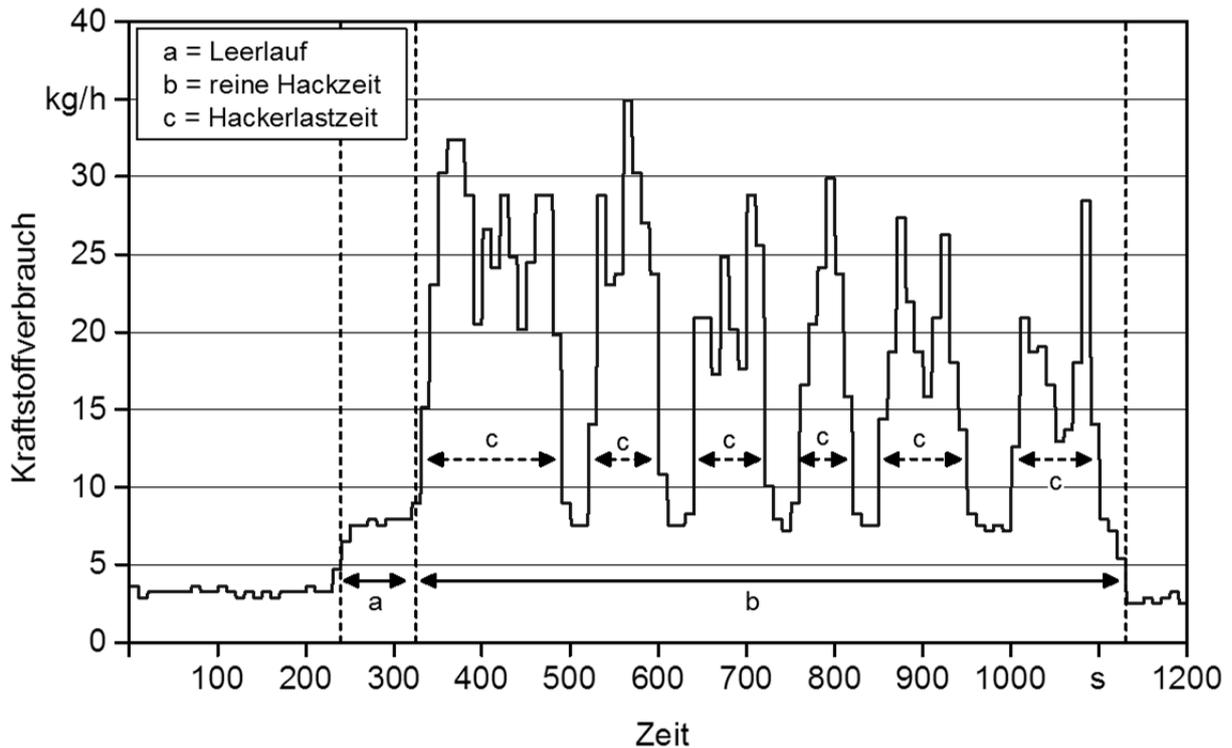


Abbildung 75: Beispiel für die Messung des Kraftstoffverbrauchs (gravimetrisch) bei den stationären Versuchen am TFZ

Zunächst wurde bei jedem Versuch der Kraftstoffverbrauch im Leerlauf bestimmt (Pfeil a in Abbildung 75). Hierzu wurde der Energiebedarf unter laufendem Hackerbetrieb inklusive Beschickung, jedoch ohne Holzzufuhr für ca. 30 Sekunden aufgezeichnet. Nach einer hinreichend langen Leerlaufzeit a erfolgte die Zugabe des ersten Stamms. Hierdurch stieg der Energiebedarf schlagartig an. Der Anstieg markiert auch den Beginn der reinen Hackzeit (b). Die Hackzeit wurde dabei als die Zeit definiert, die für das Hacken der gesamten Charge benötigt wird. Durch kurze Unterbrechungen in der Zuführung, z. B. beim Wechsel der Gabelstapler bei der Beschickung des Trommel- und Scheibenradhackers (siehe oben), kann es zu einem starken Abfall der Leistung bis hin zum Leerlauf des Hackaggregats kommen. Die Hackzeit (b) teilt sich somit in Hackerlastzeit (c) und Hackerleerlaufzeit (b–c).

Aufgrund der gestaffelten Zuführung des Hackholzes kam es während der Versuche mit dem zapfwellenbetriebenen Trommelhacker und dem Scheibenradhacker zwangsläufig zu den in Abbildung 75 beobachteten Unterbrechungen der Hackerlastzeit. Bei den Versuchen mit dem Schneckenhacker und dem elektrischen Trommelhacker konnte das Holz dagegen kontinuierlich zugeführt werden, weshalb Unterbrechungen im Hackprozess deutlich minimiert werden konnten.

6.2.3 Bestimmung der Hackschnitzelvolumens

Direkt im Anschluss an den Hackvorgang wurde das Volumen der produzierten Hackschnitzel als Schüttraummeter (Srm) bestimmt. Im Fall der schlepperbetriebenen Versuche wurde das verbleibende Leervolumen direkt im Container gemessen. Hierzu wurde das Schüttgut im Container zunächst nivelliert. Anschließend wurde das verbleibende Leervolumen analog zu den Feldversuchen mittels Meterstabs und Maßbands (Loggers Tape JA, Spencer) zurückgemessen (Abschnitt 8.2.2.4). Im Fall der Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker wurde das gehackte Material mit einem Lastenkran aus dem Big Bag in Holzkisten (1600 × 390 × 790 mm bzw. 1310 × 950 × 1050 mm) überführt. Das Schüttgut wurde mittels eines Kantholzes nivelliert. Anschließend wurde das Leervolumen mittels eines Meterstabs bestimmt.

6.3 Ergebnisse und Diskussion der stationären Hackversuche mit dem elektrischen Trommelhacker

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse zum Energiebedarf und zur Durchsatzleistung bei den stationären Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker dargestellt. Die Bezeichnung der Einzelchargen wurde dabei analog zum Kapitel „Hackschnitzelqualität (physikalisch)“ verwendet (Tabelle 61 in Abschnitt 5.2.2.4). Die Ergebnisse zu den Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern folgen in Unterkapitel 6.4.

6.3.1 Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers

Die Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers wurde auf das Volumen (S_{rm}) und auf die Trockenmasse (t_{atro}) produzierten Schüttgut pro reiner Hackzeit (h) bezogen (Abbildung 76). Abhängig von der Baumart und der Maschineneinstellung lag die Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers zwischen 1,96 und 16,79 S_{rm}/h bzw. zwischen 0,43 und 2,52 t_{atro}/h . Die Durchsatzleistung war demnach geringer als bei den Feldversuchen (Abschnitt 4.3.5). Da die maximale Leistungsaufnahme des Hackers mit 30 kW deutlich niedriger war als die Leistung der Maschinen im Wald (Abschnitt 4.3.5), lässt sich die niedrigere Durchsatzleistung gut zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4.3.5 einordnen [174].

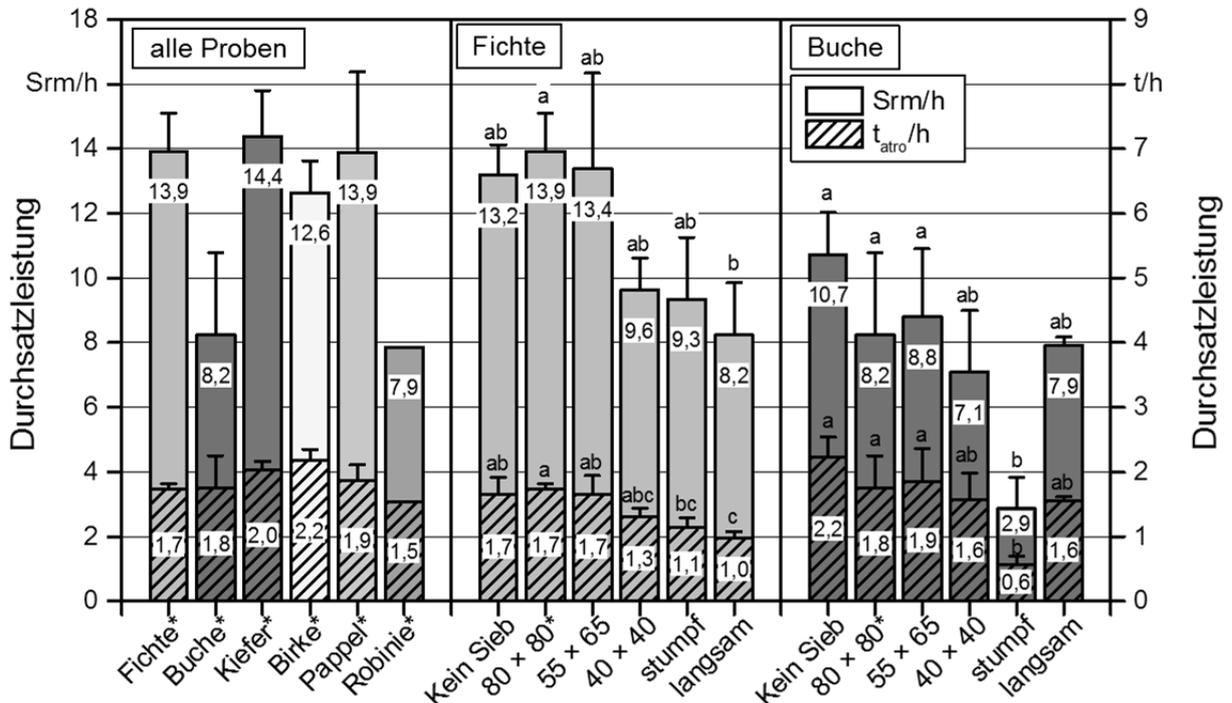


Abbildung 76: Mittlere Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers ($MW \pm SD$). Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.

Die auf das Volumen bezogene Durchsatzleistung (S_{rm}/h) war stark von der Baumart abhängig (Abbildung 76). Dabei wurde bei gleicher Maschineneinstellung eine deutliche, jedoch nicht signifikante Verringerung der Durchsatzleistung beobachtet, wenn hartes Laubholz (Buche, Robinie) anstelle von Nadelholz oder weichem Laubholz gehackt wurde. Bezogen auf die Masse (t_{atro}/h) wurde dieser Effekt durch die unterschiedliche Rohdichte der Hölzer ausgeglichen (Abbildung 76). Folglich muss bei der Produktion von Hackschnitzeln aus harten Laubhölzern mit längeren Produktionszeiten pro Containerladung gerechnet werden. Die produzierte Energiemenge pro Zeiteinheit war dagegen relativ konstant.

Aus Abbildung 76 wird zudem der Einfluss unterschiedlicher Maschineneinstellungen deutlich. Folglich sinkt die Durchsatzleistung (sowohl S_{rm}/h , als auch t_{atro}/h), wenn eine enge Siebkorbweite (z.B. 40×40 mm), stumpfe Messer oder eine langsame Einzugs- walzengeschwindigkeit verwendet werden.

Die Verwendung kleiner Siebkorbweiten führte zu einer Abnahme der Durchsatzleistung von bis zu 33 % (Siebkorb 40×40 mm, Abbildung 76). Feineres Schüttgut kann eine höhere Schüttdichte aufweisen als grobe Hackschnitzel, da die kleineren Partikel zu einer besseren Füllung der freien Luftzwischenräume führen (Ö-Norm M7132 [158], Abschnitt 5.5.1). Als Folge nehmen das Volumen produzierter Schüttraummeter und somit die auf das Volumen bezogene Durchsatzleistung ab. Interessanterweise war die auf Masse bezogene Durchsatzleistung ebenso durch die Verwendung enger Siebkörbe verringert. Somit kann eine höhere Verdichtung des Schüttguts allein nicht als Erklärung dienen. Vielmehr muss beim Hacken mit kleinen Öffnungsweiten ein höherer Widerstand aufgetreten sein, der den Hackprozess insgesamt verlangsamt hat [148].

Stumpfe Messer führten zu einer deutlichen Verschlechterung der Durchsatzleistung. Diese lag bei Fichte um 22,1 bis 44,5 %, bei Buche sogar um 56,4 bis 74,5 % unter der Variante mit scharfen Messern (t_{atro}/h). Der negative Effekt stumpfer Messer war damit deutlich ausgeprägter als bei den Feldversuchen (Abschnitt 4.3.5) [23][149]. Eine Produktion mit stumpfen Messern führt zu hohen Belastungen der Maschine, da das Holz lediglich durch die Rotation der Hackertrummel gebrochen wird. Als Folge wird die Produktion abgebremst [23][149][190]. Zudem kann die Belastung der Hackertrummel so stark sein, dass die automatische Sicherung des Hackers die Einzugsrollen regelmäßig stoppt („No-Stress“). Die sich hierdurch ergebenden häufigen Unterbrechungen im Hackprozess führten vor allem bei der harten Baumart (Buche) zu einer zusätzlichen Verringerung der Durchsatzleistung.

Neben feinen Siebkörben und stumpfen Messern hatte auch eine langsamere Einzugs- walzengeschwindigkeit in der Regel eine Verringerung der Durchsatzleistung zur Folge, da weniger Holz pro Zeiteinheit der Trommel zugeführt wurde (Abbildung 76). Für Fichte war die Durchsatzleistung um bis zu 48,2 % geringer als bei der hohen Einzugs- geschwindigkeit und somit direkt auf eine Halbierung der zugeführten Menge an Rohmaterial zurückzuführen (Abbildung 76). Für die wesentlich härtere Buche war dieser Effekt mit maximal 28,9 % weniger stark ausgeprägt. Bei sehr trockenem Holz zeigte Buche sogar eine um 16,4 % höhere Durchsatzleistung. Wenn große Mengen an Holz mit hoher

Rohdichte der Trommel zugeführt werden, kann es zur Abbremsung der Hackertrommel kommen. Als Folge wird der Einzug regelmäßig unterbrochen („No-Stress“, siehe oben). Hierdurch verringert sich die Durchsatzleistung. Tritt dieser Effekt dabei so häufig auf, dass sich die Hackzeit der Charge insgesamt gegenüber einer niedrigen Einzugs geschwindigkeit erhöht, dann führt die niedrigere Einzugs geschwindigkeit zu geringeren Belastungen der Maschine und somit zu einer besseren Durchsatzleistung. Folglich kann sich eine langsame Einzugs walzengeschwindigkeit unter Umständen positiv auf die Durchsatzleistung ausüben.

Alle beobachteten Effekte (kleiner Siebkorb, Messerschärfe) wurden im Fall von Buche durch die Verwendung sehr trockenen Rohmaterials verstärkt (Wassergehalt = $13,2 \pm 1,0$ Ma-%). Das Hacken der sehr harten Baumart im lufttrockenen Zustand sollte deshalb vermieden werden. Bei allen übrigen Baumarten konnte kein Einfluss des Wassergehalts beobachtet werden.

6.3.2 Energiebedarf des elektrischen Trommelhackers

Die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Hackers lag bei $7,15 \pm 0,29$ kW und damit deutlich unter der für die Maschine maximal zulässigen Leistung von 30 kW. Zwischen den Varianten zeigten sich nur minimale Unterschiede (Abbildung 77).

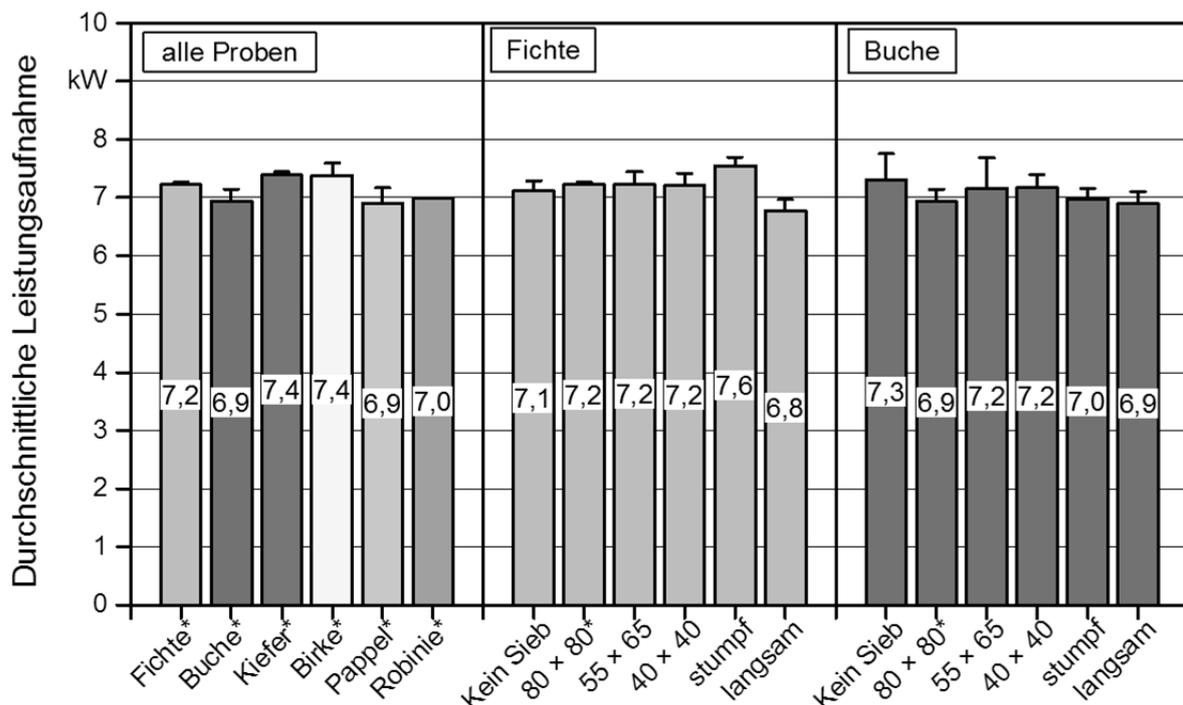


Abbildung 77: Mittlere Leistungsaufnahme (kW) des elektrischen Trommelhackers

Als Folge der relativ einheitlichen Leistungsaufnahme war der spezifische Energiebedarf (kWh/Srm, kWh/t_{atro}) primär von der Dauer des Prozessschritts „Hacken“ abhängig und folgte somit den Unterschieden in der Durchsatzleistung (Abbildung 78, Abbildung 76). Unterschiede zwischen den Baumarten waren demnach gering und der Energiebedarf war lediglich bei harten Laubhölzern (Buche, Robinie) erhöht, wenn er auf das Volumen bezogen wurde (kWh/Srm). Weiterhin stieg der spezifische Energieverbrauch bei der Verwendung feiner Siebkörbe und einer langsamen Einzugschalzengeschwindigkeit deutlich an. Vor allem kam es jedoch bei der Verwendung stumpfer Messer zur Verdoppelung (Fichte) bis zur Verdreifachung des Energiebedarfs (Abbildung 78). Die Verwendung stumpfer Messer ist somit für eine ressourceneffiziente Hackschnitzelproduktion zwingend zu vermeiden [23][74][187].

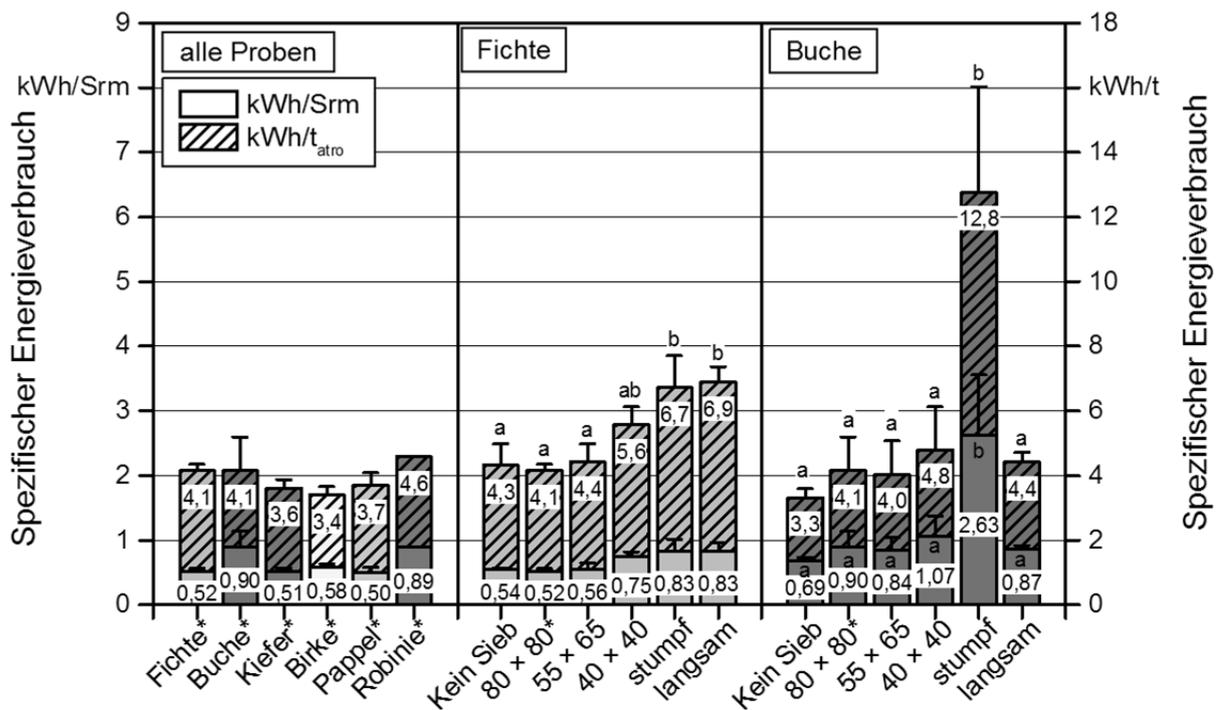


Abbildung 78: Spezifischer Energieverbrauch (MW ± SD) des elektrischen Trommelhackers. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.

Der spezifische Energiebedarf des elektrischen Trommelhackers lag insgesamt zwischen 0,45 und 3,63 kWh/Srm bzw. zwischen 3,43 und 16,35 kWh/t_{atro} (Abbildung 78). Er war somit deutlich geringer als bei den Feldversuchen (11,4 bis 41,1 kWh/t_{atro}). Die benötigte Menge an Energie für den Prozessschritt „Hacken“ entsprach dabei einem Anteil von 0,06 bis 0,32 % der im Holz gespeicherten Energie (Abbildung 79). Sie war somit um mehr als die Hälfte geringer als bei der Produktion im Wald (Abschnitt 4.3.5).

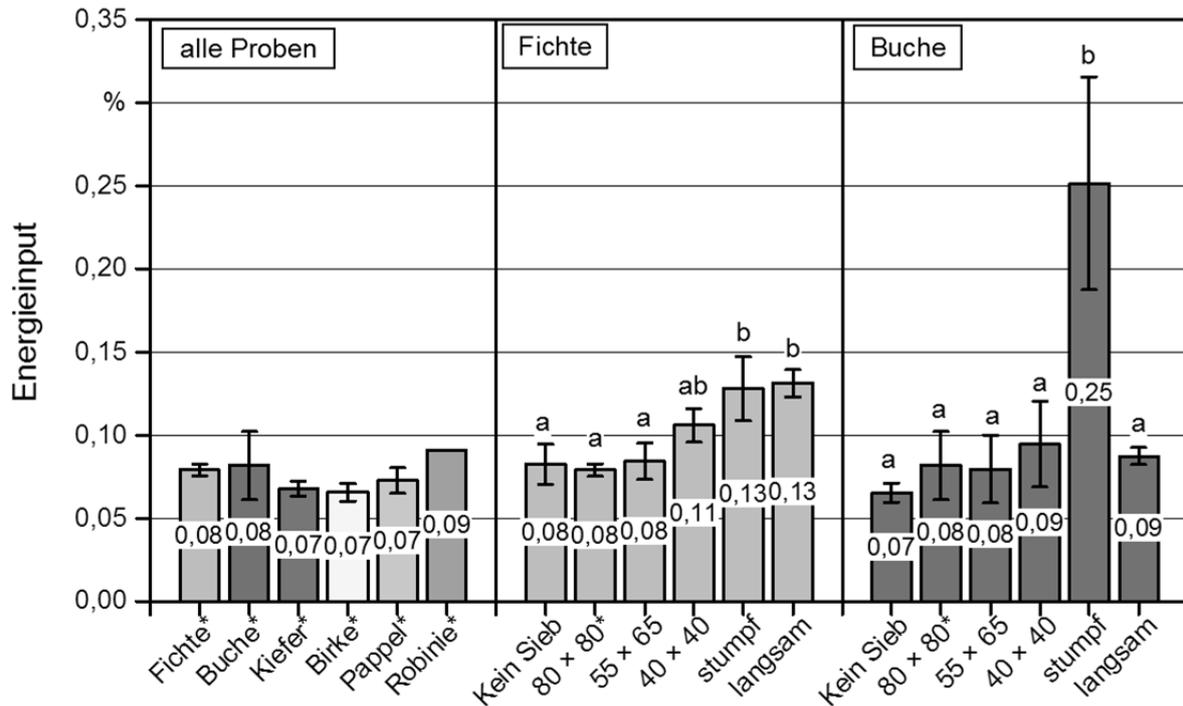


Abbildung 79: Mittlere Energieinput (in % der Energie im Holz, MW \pm SD). Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen Varianten.

6.3.3 Vergleich der Ergebnisse mit den Feldversuchen

Die Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker bestätigen die Erkenntnisse aus den Feldversuchen. Folglich ist mit einer starken Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs und einer Verringerung der Durchsatzleistung zu rechnen, wenn stumpfe Messer zum Hacken verwendet werden [23][149]. Weiterhin zeigt sich, dass die in den Feldversuchen beobachtete Erhöhung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei der Verwendung enger Siebkorbweiten nicht nur auf die Leistung der Trägermaschine (< 200 kW Leistung, siehe Abschnitt 4.3.5), sondern auch auf den Siebkorb selbst zurückzuführen ist [148]. Daneben führte das Hacken harter Laubhölzer vor allem im sehr trockenen Zustand zu einer erhöhten Belastung der Maschine. Eine langsamere Einzugsgeschwindigkeit kann sich in diesem Fall sogar positiv auf den Verbrauch auswirken, wenn hierdurch eine Holzzufuhr ohne Unterbrechungen möglich ist.

6.4 Ergebnisse und Diskussion der stationären Versuche mit drei zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistungsklasse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der stationären Versuche mit den zapfwellenbetriebenen Hackern beschrieben. Die Bezeichnung der Einzelchargen erfolgt dabei analog zum Kapitel „Hackschnitzelqualität (physikalisch)“ (Tabelle 63 aus Abschnitt 5.2.3.2).

6.4.1 Durchsatzleistung

Die auf das Volumen bezogene Durchsatzleistung der drei Maschinen lag zwischen 18,5 und 58 Srm/h (reine Hackzeit) bzw. zwischen 29,8 und 61,8 Srm/h Hackerlastzeit (Abbildung 80). Die auf die Masse bezogene Durchsatzleistung zeigte sich ähnlich variabel und reichte von 2,8 bis 10,1 t_{atro}/h reiner Hackzeit bzw. von 3,8 bis 10,9 t_{atro}/h Hackerlastzeit (Abbildung 80).

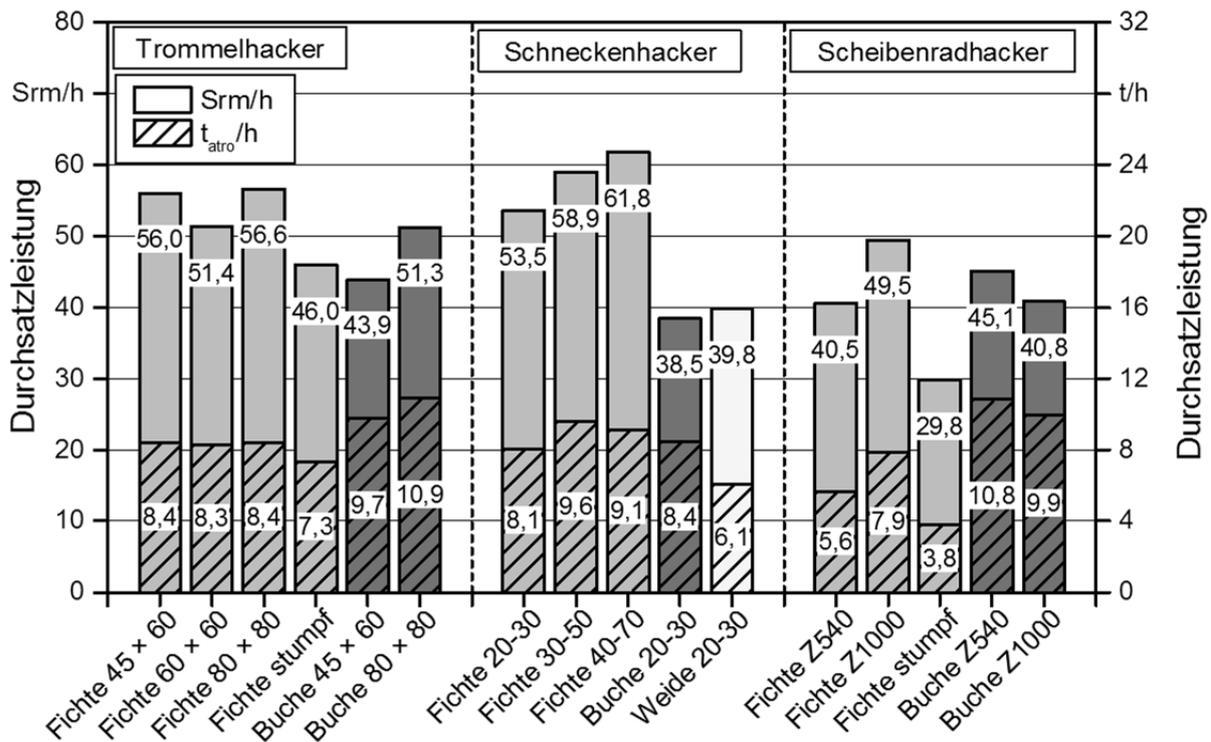


Abbildung 80: Durchsatzleistung (Hackerlastzeit) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern mittlerer Leistung

Die beobachteten Durchsatzleistungen der drei Hacker reihen sich somit gut in die Werte aus den Feldversuchen ein. Diese lagen bei den Hackern der Klasse 100 bis 199 kW bei 56,5 bis 76,6 Srm/h und 9,8 bis 11,1 t_{atro}/h (Abschnitt 4.3.5). Sie waren somit höher als bei den stationären Versuchen. Zugleich lagen die Antriebsleistungen der Hacker bei den Feldversuchen mit > 150 kW über den stationär verwendeten Maschinen (110–

139 kW), wodurch sich der Trend bestätigt, dass die Durchsatzleistung mit der Leistung der Maschine zunimmt (siehe Feldversuche).

Der Unterschied zwischen der gesamten Hackzeit und der Hackerlastzeit war für den Schneckenhacker am geringsten, da hier eine relativ konstante Beschickung von Hand möglich war. Für den Trommelhacker und den Scheibenradhacker kam es dagegen durch die semimanuelle Beschickung mithilfe des Gabelstaplers und des Frontladers zu regelmäßigen Unterbrechungen im Hackprozess. Aufgrund des Einflusses der Beschickung (manuell und semimanuell) auf die Hackerzeit und des damit verbundenen direkten Einflusses auf die Durchsatzleistung wird für die Vergleiche der Chargen die beschickungsunabhängige Hackerlastzeit anstelle der reinen Hackzeit (Lastlauf + Leerlauf) verwendet.

Analog zu den stationären Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker (Abschnitt 6.3.1) ergab sich über alle Versuche hinweg eine Abnahme der Durchsatzleistung (Srm/h), wenn bei gleicher Maschineneinstellung Buche anstelle von Fichte gehackt wurde (Abbildung 80). Das Hacken der wesentlich härteren Baumart erzeugt demnach auch bei den zapfwellenbetriebenen Hackern einen höheren Widerstand, weshalb der Hackprozess gebremst wurde und längere Zeiten für ein bestimmtes Schüttvolumen benötigt wurden. Auf die Masse bezogen (t_{atro}/h) war die Durchsatzleistung bei Buche dagegen durchweg erhöht (Abbildung 80). Somit bestätigt sich die Schlussfolgerung aus Abschnitt 6.3.2, dass die Herstellung eines bestimmten Schüttvolumens bei der harten Baumart zwar länger dauert, dies jedoch durch den höheren Energiegehalt der Brennstoffe kompensiert wird.

Die einmalige Verwendung von Restholz aus Weide (Schneckenhacker) führte zu deutlich geringeren Durchsatzleistungen als beim Hacken von Energierundholz (Abbildung 80). Bei der Beschickung mit Kronenmaterial und Ästen wird dem Hacker weniger Rohmaterial pro Zeiteinheit zugeführt [6][135][189]. Folglich dauert die Produktion von Hackschnitteln aus Waldrestholz länger als bei Energierundholz (vgl. Feldversuche, Abschnitt 4.3.5).

Trommelhacker: Die Verwendung unterschiedlicher Siebkörbe (Trommelhacker) führte im Fall der Fichte zu keiner Veränderung der Durchsatzleistung (Abbildung 80). Beim Hacken von Buche kam es dagegen bei der Verwendung des 45 × 60 mm großen Siebkorbs zu einer deutlichen Verringerung produzierten Schüttguts pro Zeit. Da dies sowohl für das Volumen als auch für die Masse an Schüttgut auftrat (Srm/h, t_{atro}/h), konnte der Effekt wie schon in Abschnitt 6.3.1 nicht ausschließlich auf eine stärkere Verdichtung des Materials aufgrund geringerer Partikelgröße zurückgeführt werden. Stattdessen muss der engere Siebkorb bei der harten Baumart insgesamt zu einem zusätzlichen Widerstand beim Hacken geführt haben [148]. Ähnlich dem elektrischen Trommelhacker besitzt auch der zapfwellenbetriebene Trommelhacker einen Überlastungsschutz, der beim Abbremsen der Hackertrommel den Einzug anhält. Dieser Effekt wurde beim Hacken von Buche mit dem feinen Siebkorb gelegentlich beobachtet. Durch die kurzen Unterbrechungen kam es zu Verzögerungen und damit zu einer zusätzlichen Verringerung der Durchsatzleistung.

Die Verwendung stumpfer Messer (Trommelhacker) verschlechterte die Durchsatzleistung [74][189]. Dabei kam es selbst beim Hacken der weicheren Baumart (Fichte) zu so hohen Belastungen des Hackrotors, dass die Einzugswalzen regelmäßig gestoppt wurden. Die Durchsatzleistung war dementsprechend deutlich geringer als bei der Verwendung scharfer Messer. Dies bestätigt die Erkenntnisse aus den Feldversuchen und den stationären Versuchen mit dem elektrischen Hacker, dass Hacken mit stumpfen Messern zu deutlich höhere Belastungen für die Maschine und somit zu einer Reduktion der Produktivität führt. Die Verwendung stumpfer Messer ist demnach für eine rationelle Produktion dringend zu vermeiden (siehe auch Unterkapitel 5.6 „Hackschnitzelqualität (physikalisch“).

Schneckenhacker: Eine Vergrößerung der Schnittweite (Schneckenhacker) führte zu einer Zunahme in der volumenbezogenen Durchsatzleistung (S_{rm}/h), jedoch nicht zu einer Veränderung der produzierten Masse (t_{atro}/h , Abbildung 80). Die Partikelgrößenverteilungen der drei Hackschnitzelchargen, die mit unterschiedlichen Hackerschnecken produziert wurden, unterschieden sich erheblich voneinander, wobei die Schnecken mit großen Schnittweiten durchweg sehr grobe Partikel produzierten (Abschnitt 5.5.2.3). Obwohl eine lockerere Schüttung über die Schüttdichte der drei Proben nicht nachgewiesen werden konnte (Abschnitt 5.5.2.2), kann es durch die gröbere Partikelform zu einer deutlich lockereren Partikeldichte und somit zu einem höheren Schüttvolumen im Container kommen (Ö-Norm M7132 [158]). Folglich erhöht sich die volumenbezogene, nicht jedoch die auf Masse bezogene Durchsatzrate.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Hackern erfolgt beim Schneckenhacker die Zufuhr automatisch über das Schneidaggregat. Eine Untersuchung mit einer stumpfen Hackerschnecke ist demnach nicht sinnvoll, da mit dieser kein Holz zugeführt werden kann. Die Verwendung scharfer Schneidwerkzeuge ist für den Schneckenhacker ausschlaggebend. Das Nachschleifen der konisch geformten Messerschneide erfolgt dabei ähnlich simpel wie bei den anderen beiden Hackern direkt im Feld, wobei eine Führungsschiene am Hacker die optimale Ausrichtung der Schleifmaschine gewährleistet.

Scheibenradhacker: Die Durchsatzleistung des Scheibenradhackers war etwas geringer als bei den anderen beiden Maschinen (Abbildung 80). Eine Erhöhung der Zapfwellendrehzahl von 540 auf 1.000 U/min führte dabei zu einer Erhöhung der Durchsatzleistung bei Fichte, jedoch zu einer Verringerung bei Buche. Bei dem verwendeten Hacker erhöht sich die Einzugsgeschwindigkeit automatisch mit der Zapfwellendrehzahl. Der höhere Durchsatz bei Fichte war demnach durch die größere Menge gleichzeitig zugeführten Holzes zu erklären. Beim Hacken der wesentlich härteren Buche kam es dagegen zu erhöhten Belastungen der Maschine. Bei starkem Abbremsen des Schneidaggregats stoppt die „No-Stress“-Vorrichtung des Hackers automatisch den Einzug für kurze Zeit. Diese kurzen Unterbrechungen kamen dabei so regelmäßig vor, dass die zum Hacken benötigte Zeit insgesamt höher lag als bei 540 U/min, wodurch sich die Durchsatzleistung verringerte.

Ähnlich wie beim Trommelhacker verringerte die Verwendung stumpfer Messer die Durchsatzleistung des Scheibenradhackers (Abbildung 80). Dabei kam es trotz Verwen-

dung der weicheren Baumart (Fichte) zu starken Belastungen der Maschinen und somit regelmäßig zu kurzen Unterbrechungen („No-Stress“). Der negative Effekt stumpfer Messer war für den Scheibenradhacker deutlich ausgeprägter als für den Trommelhacker, da der Stumpfheitsgrad durch die Abtrennung der Messerschneide sehr extrem war. Beim Trommelhacker wurden die Messer dagegen durch den Gebrauch stumpf gemacht. Hierbei kann die Durchsatzleistung um 0,15 % pro t_{atro} produzierten Schüttguts abnehmen [23]. Idealerweise sollten die Messer laut der genannten Studie nach der Produktion von 100 t_{atro} neu geschliffen werden. Der Stumpfheitsgrad bei den hier dargestellten Ergebnissen ist in der Praxis nicht zu erwarten. Vielmehr zeigt er die maximale Veränderung der Durchsatzleistung, wenn das Nachschleifen der Messer nicht berücksichtigt wird.

6.4.2 Energiebedarf

Der auf Dieselverbrauch umgerechnete Kraftstoffbedarf des rapsölbetriebenen Schleppers war abhängig von dem verwendeten Hacker, der Maschineneinstellung und dem gehackten Rohmaterial. Die Verbrauchswerte lagen dabei zwischen 11,9 und 26,3 l/h (Abbildung 81). Den geringsten Verbrauch zeigte der Scheibenradhacker.

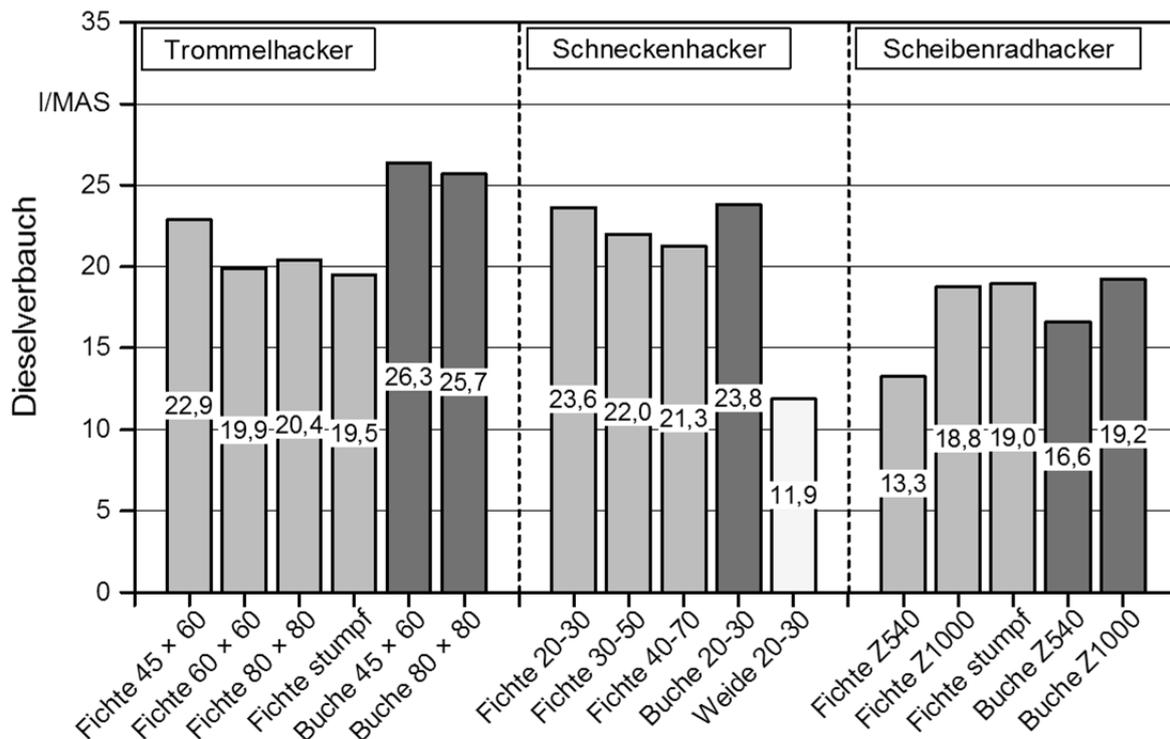


Abbildung 81: Dieselverbrauch pro Zeit bei den stationären Versuchen mit Hackern mittlerer Leistung

Der Durchschnittsverbrauch der stationären Versuche war geringer als bei den Feldversuchen (32,8–39,8 l/h in der Klasse 100–200 kW, siehe Abschnitt 4.3.5). Dabei lagen die

Maschinen der Feldversuche > 150 kW und hatten somit höhere maximale Leistungsaufnahmen als die stationär untersuchten Hacker. Bei den Versuchen im Wald wurde zudem die Beschickung per Kran vorgenommen, der ebenfalls über den jeweiligen Schlepper angetrieben wurde. Weiterhin kam bei den stationären Versuchen ein werksneuer Schlepper zum Einsatz. Der geringere Kraftstoffverbrauch der stationären Versuche im Vergleich zu den Feldversuchen ist demnach zu erwarten gewesen.

Der Durchschnittsverbrauch (l/h) war beim Hacken von Buchenholz erhöht (Abbildung 81). Daneben führten eine enge Siebkorbweite (Trommelhacker), eine geringe Schnittweite der Schnecke (Schneckenhacker), eine hohe Zapfwellendrehzahl und die Verwendung stumpfer Messer (nur Scheibenradhacker) zu deutlich höheren Durchschnittswerten (Abbildung 81). In allen Fällen deutet der höhere Durchschnittsverbrauch auf eine höhere Auslastung des Schleppermotors und damit auf einen höheren Widerstand beim Hacken hin [23][149]. Das Hacken von Weide (Restholz) führte dagegen zu geringeren Belastungen des Schneidaggregats. Dabei lag der Verbrauch beim Hacken feiner Äste häufig nahe dem Bedarf des Schleppers bei Hackerleerlauf.

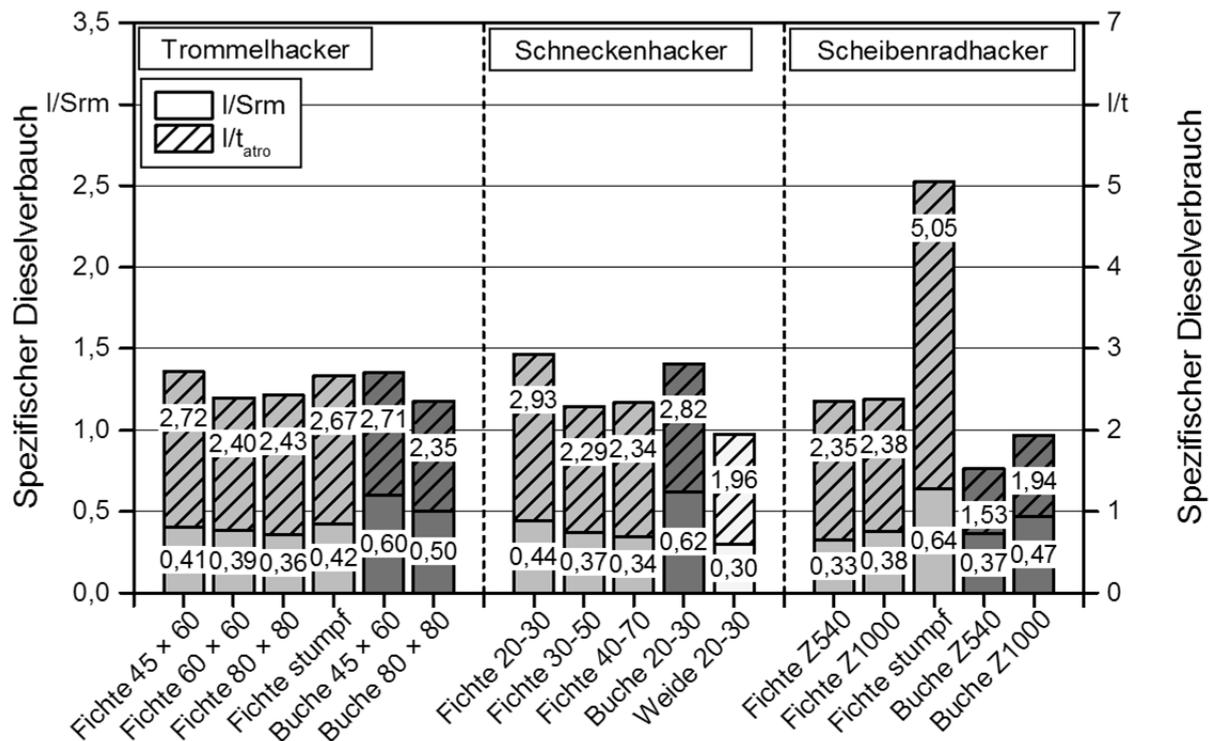


Abbildung 82: Spezifischer Dieserverbrauch pro Schüttraummeter (ungefüllte Balken) und Trockenmasse (gefüllte Balken) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern

Der spezifische Kraftstoffverbrauch (I/S_{rm} , I/t_{atro}) zeigte nur geringe Unterschiede zwischen den Chargen (Abbildung 82). Außer bei den Varianten mit stumpfen Messern lag der spezifische Verbrauch im Bereich von 0,3 und 0,6 I/S_{rm} bzw. zwischen 1,53 und

2,93 l/t_{atro}. Der spezifische Verbrauch war dabei für den Scheibenradhacker geringer als für den Trommel- und den Schneckenhacker (Vergleich der Standardeinstellungen „45 × 60 mm“, „20–30“ und „Z540“, siehe Abbildung 82). Dies lag an seinem insgesamt niedrigeren Durchschnittsverbrauch (l/h, siehe Abbildung 81). Hierdurch lies sich auch die niedrigere Durchsatzrate des Scheibenradhackers kompensieren (Abbildung 80). Somit ist beim Scheibenradhacker der Kraftstoffbedarf trotz längerer Produktionszeiten als geringer zu bewerten.

Bezogen auf das Volumen hatte die Baumart einen direkten Einfluss auf den spezifischen Verbrauch (l/Srm). Dieser war beim Hacken von Buche im Vergleich zu Fichte erhöht (Abbildung 82). Die wesentlich geringere Durchsatzleistung beim Hacken der härteren Baumart (Srm/h, Abbildung 80) verstärkte dabei den Effekt des sowieso schon höheren Durchschnittsverbrauch (l/h, Abbildung 81). Auf die Masse des Brennstoffs bezogen kompensiert die höhere Durchsatzleistung beim Hacken von Buche (t_{atro}/h) den höheren Verbrauch, weshalb der Kraftstoffbedarf pro t_{atro} von der Baumart größtenteils unabhängig ist (l/t_{atro}, Abbildung 82).

Trommelhacker: Beim Trommelhacker führte die Verwendung gröberer Siebkörbe zu einer Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (l/Srm, l/t_{atro}). Dies lies sich auf den geringeren Durchschnittsverbrauch (l/h) zurückführen, wohingegen die Durchsatzleistung, d. h. die Dauer des Hackprozesses, diesen Effekt nicht erklären konnte. Umgekehrt konnte die beobachtete Erhöhung des spezifischen Verbrauchs bei der Verwendung stumpfer Messer nur durch eine geringere Durchsatzrate, nicht jedoch durch einen geringeren Durchschnittsverbrauch erklärt werden (Abbildung 80, Abbildung 81 und Abbildung 82). In beiden Fällen (stumpfe Messer, feiner Siebkorb) führt die Prozesseinstellung zu höheren Verbräuchen (l/Srm, l/t_{atro}) [74][148][149][189]. Die Verwendung eines feinen Siebkorbs ist dabei ggf. über die erhöhte Hackschnitzelqualität zu rechtfertigen (Verringerung der durchschnittlichen Partikelgröße, vgl. Abschnitt 5.5.1.3), die Verwendung stumpfer Messer ist dagegen zwingend zu vermeiden.

Schneckenhacker: Die Verwendung der gröberen Hackerschnecken (Schneckenhacker) führte zu einer deutlichen Verringerung des spezifischen Verbrauchs (l/Srm, l/t_{atro}, siehe Abbildung 82). Durch die geringere Anzahl an Schnitten pro Meter eingezo-genen Holzes war die Belastung des Schneidaggregats geringer und der Durchschnittsverbrauch reduziert (l/h, siehe Abbildung 81). Die gleichzeitig beobachtete höhere Durchsatzrate (Srm/h) verstärkt diesen Effekt, wenn der spezifische Verbrauch auf das Volumen bezogen wird (l/Srm). Die Wahl der Hackerschnecke hängt jedoch vornehmlich von der gewünschten Hackschnitzelqualität ab.

Scheibenradhacker: Die erhöhte Zapfwellendrehzahl führte beim Scheibenradhacker im Fall der Fichte zu keiner Erhöhung des spezifischen Verbrauchs. Hierbei wurde der höhere Durchschnittsverbrauch (l/h, Abbildung 81) durch die höhere Durchsatzleistung (Abbildung 80) kompensiert. Im Fall der Buche führte die höhere Drehzahl dagegen zu höheren spezifischen Verbräuchen, da zwar der Durchschnittsverbrauch erhöht, die Durchsatzleistung aber verringert war (Abbildung 80, Abbildung 81). Für weiche Baumart-

ten ist somit eine hohe Zapfwellendrehzahl zu empfehlen, für harte Baumarten eine niedrigere.

Analog zu den bisher gezeigten Ergebnissen hat vor allem für den Scheibenradhacker die Verwendung stumpfer Messer zu einer extremen Erhöhung des spezifischen Kraftstoffbedarfs geführt (Abbildung 82). Somit wird die schlechtere Hackschnitzelqualität (Unterkapitel 5.6) mit einem höheren Verbrauch bezahlt.

Der Energiebedarf bei der Produktion mit den zapfwellenbetriebenen Hackern entspricht zwischen 0,30 und 0,56 % der im Holz gespeicherten Energie (siehe Abbildung 83). Selbst bei der extremen Variante mit stumpfen Messern beim Scheibenradhacker war der Energiebedarf < 1 % und stellt nur einen Bruchteil der Energie des produzierten Brennstoffs dar. Die Ergebnisse sind damit analog zu den Ergebnissen mit dem elektrischen Trommelhacker und den Feldversuchen. Der Prozessschritt „Hacken“ ist demnach als äußerst energieeffizient zu bewerten.

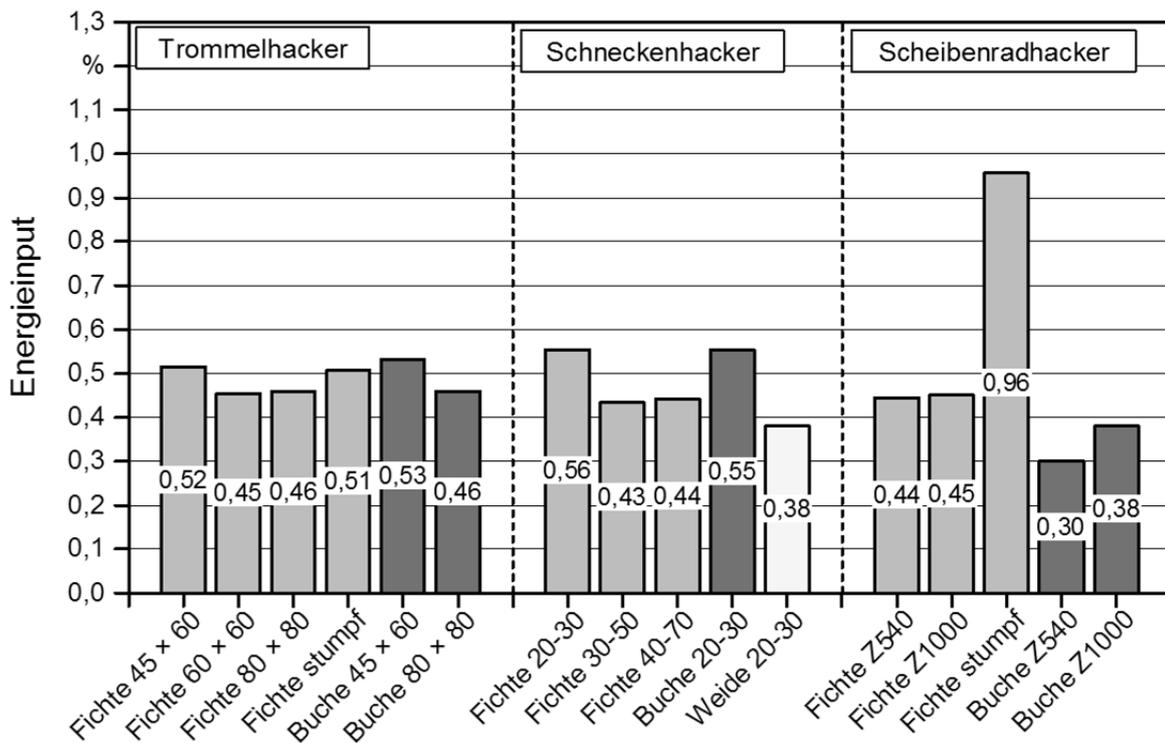


Abbildung 83: Energieinput (in % der Energie im Holz) bei den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse (stationäre und Feld)

6.5.1 Einfluss auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf

Im Folgenden werden die Ergebnisse der stationären Versuche (Kapitel 6) und die Ergebnisse der Feldversuche (Abschnitt 4.3.5) zum Durchsatz und zum Energie- bzw. Kraftstoffbedarf der Maschinen zusammengefasst (Abbildung 84).

Variante	Durchsatzleistung		Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch		
	Srm/h	t/h	l oder kWh/h	l oder kWh/Srm	l oder kWh/t
Härtere Holzart	→ ↓	→ ↑	→ ↑	→ ↑	→ ↓
Energierundholz statt Waldrestholz ¹	→ ↑	→ ↑	↓ ↑	→ ↑	→ ↓
Höhere Leistungsaufnahme (kW) ¹	↑	↑	↑	↓ ↑	↓ ↑
Stumpfe Messer	→ ↓	→ ↓	→ ↑	↑	↑
Schmaler Lochdurchmesser (Sieb)	→ ↓	→ ↓	→ ↑	↑	↑
Engere Schnittweite (Hackerschnecke) ²	↑	→	→ ↑	→ ↑	→ ↑
Zapfwellendrehzahl ²	↓ ↑	↓ ↑	↑	↓ ↑	↓ ↑
Einzugswalzen-geschwindigkeit ²	↓ ↑	↓ ↑	→	↓ ↑	↓ ↑
Überlastung der Maschine („No-Stress“)	↓	↓	→ ↑	↑	↑

Abbildung 84: Zusammenfassung der beobachteten Einflüsse auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf bei den Feldversuchen und den stationären Versuchen am TFZ (1 = nur Feldversuche, 2 = nur stationäre Versuche, Pfeil nach oben = höhere Werte, Pfeil nach unten = Abnahme der Werte, Pfeil nach rechts = kein Effekt, mehrere Pfeile = verschiedene Beobachtungen)

Die Durchsatzleistung und der Kraftstoffbedarf waren demnach von der Baumart, dem Sortiment, der Maschinenleistung und der Maschineneinstellungen abhängig. Dabei

konnten die Tendenzen, die bei den Feldversuchen beobachtet worden waren, in den stationären Versuchen reproduziert werden.

Baumart: Die Baumart hatte sowohl in den Feldversuchen, vor allem aber bei den stationären Versuchen einen Einfluss auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf. Dabei sank die auf das Volumen bezogene Durchsatzrate (S_{rm}/h), wenn Baumarten mit sehr hoher Rohdichte gehackt wurden (Buche, Eiche, Robinie) im Vergleich zu Nadelholz und weichen Laubbäumen (Pappel). Analog stieg der spezifische Energiebedarf (l/S_{rm}). Auf die Masse bezogen (t_{atro}/h , l/t_{atro}) wird dieser Effekt durch die höhere Rohdichte der Arten ausgeglichen bzw. stellenweise sogar umgedreht. Folglich muss beim Hacken harter Baumarten mit längeren Produktionszeiten gerechnet werden, die produzierte Brennstoffmasse bleibt gleich.

Sortiment: Energierundholz hat sich als ideal für eine energieeffiziente Produktion von Hackschnitzeln erwiesen (Feldversuche). Obwohl der Durchschnittsverbrauch beim Hacken von Energierundholz im Vergleich zu Waldrestholz erhöht sein kann (z. B. für hartes Laubholz bei den Feldversuchen), ist der spezifische Verbrauch pro Volumen oder Masse produzierter Hackschnitzel aufgrund der wesentlich höheren Durchsatzraten geringer. Somit ist beim Hacken von Energierundholz neben einer Steigerung der Hackschnitzelqualität (siehe Abschnitt 5.6) eine ressourcenschonendere Produktion möglich.

Maschinenleistung: Durchsatzleistung und Kraftstoffverbrauch waren bei den Feldversuchen maßgeblich von der Leistung der Trägermaschine abhängig. Dabei stiegen sowohl Durchsatz als auch Verbrauch mit der Leistung. Hierbei waren die Hacker der Klasse 200–400 kW am energieeffizientesten, da Hacker < 200 kW deutlich geringere Durchsatzleistungen hatten, Hacker > 400 kW dagegen ihren Verbräuchen entsprechend nicht sinnvoll ausgelastet werden konnten. Die stationären Versuche reihen sich in diese Abstufung ein.

Messerschärfe: Die Verwendung stumpfer Messer führte über alle Versuche hinweg zu deutlichen Verschlechterungen der Durchsatzleistung und des Kraftstoffverbrauchs. Dies sollte für eine ressourcenschonende Hackschnitzelproduktion dringend vermieden werden.

Siebkorb: Engere Siebkörbe führten zu einem stärkeren Widerstand beim Hacken, Folglich sinkt die Durchsatzleistung und steigt der Verbrauch. Im Gegensatz zur Messerschärfe steht bei der Verwendung enger Siebkörbe jedoch die Hackschnitzelqualität im Vordergrund (Partikelgröße), weshalb die Verwendung von Sieben mit geringem Lochdurchmesser gerechtfertigt sein kann.

Schnittwerte der Hackerschnecke: Eine weite Schnittweite der Hackerschnecke erhöhte die auf das Volumen bezogene Durchsatzrate und verringerte den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch. Die Wahl der Schnecke hängt jedoch vornehmlich von der gewünschten Hackschnitzelqualität ab. Für Heizwerke, bei denen eine kleine Partikelgröße irrelevant ist, bietet sich demnach die Verwendung einer Schnecke mit hoher Schnittweite an.

Zapfwellendrehzahl: Eine Erhöhung der Zapfwellendrehzahl kann die Durchsatzleistung verändern, wenn durch diese die Drehzahl des Hackaggregats direkt beeinflusst wird. Höhere Zapfwellendrehzahlen bedeuten jedoch auch immer einen höheren Durchschnittsverbrauch. Beim Hacken weicher Baumarten (z. B. Fichte) zeigte sich in den stationären Versuchen ein positiver Effekt auf den spezifischen Verbrauch aufgrund der erhöhten Durchsatzleistung. Bei der wesentlich härteren Buche kam es dagegen bei hohen Drehzahlen häufig zu starken Belastungen der Maschine.

Einzugswalzengeschwindigkeit: Eine hohe Einzugswalzengeschwindigkeit erhöhte bei weichen Hölzern die Durchsatzrate, da mehr Holz pro Zeit zugeführt wird. Bei sehr hohen Rohdichten (z. B. Buche) oder zu hohen Mengen gleichzeitig zugeführten Holzes kann es jedoch zu Belastungen der Maschine kommen. Als Folge sinkt die Durchsatzrate und der Verbrauch wird erhöht.

Überlastung der Maschine: Die meisten Hacker besitzen eine Überlastungsschutz („No-Stress“), der bei sehr hoher Belastung des Schneidaggregats den Einzug stoppt. Hierdurch kann sich die Durchsatzleistung maßgeblich verschlechtern. Da das Schneidaggregat dabei in der Regel weiterläuft, zeigen die Maschinen in diesen Pausen weiterhin hohe Verbräuche. Folglich verschlechtert sich der spezifische Verbrauch bei Überlastung maßgeblich. Überlastungen treten auf, wenn mit stumpfen Messern gehackt wird oder zu große Mengen an Holz mit zu hohen Rohdichten zugeführt werden. Dieser Effekt hat sich bei den stationären Versuchen durch sehr trockenes Holz erhöht. Insgesamt sind jegliche Überlastungen der Maschinen für eine energieeffiziente Hackschnitzelproduktion zu vermeiden.

6.5.2 Empfehlungen für die Praxis

Aus den Ergebnissen der Feldversuche und der stationären Versuche lassen sich Empfehlungen für einen ressourcenschonenden Umgang bei der Produktion von Hackschnitzeln ableiten:

Maximale Auslastung der Maschine, aber Überlastung vermeiden

Der Hacker sollte seiner Leistung entsprechend sinnvoll ausgelastet werden. Leistungsstarke Maschinen müssen ihren Verbrauch durch eine hohe Durchsatzrate kompensieren können. Hierzu können die Größe und der Aufbau des Polters maßgeblich beitragen, z. B. durch die Ausrichtung der Kronenfüße beim Waldrestholz. Unnötige Kranarbeit, die bei schlecht sortierten Poltern nötig wird, verschlechtert die Effizienz der Maschinen. Auch das Hacken von Energierundholz kann zu einer hohen Auslastung und hohen Durchsatzrate der Maschinen führen.

Die Überlastung der Maschine ist dagegen bei der Produktion dringend zu vermeiden. Überlastungen entstehen regelmäßig, wenn z. B. mit stumpfen Messern gehackt wird. Auch können hohe Belastungen durch zu enge Siebkörbe/Schnittweiten entstehen. Hierbei gilt, ähnlich den Empfehlungen bei der Brennstoffqualität, die Prozesseinstellungen

am gewünschten Endprodukt auszurichten. Weiterhin wird die Auslastung der Maschine direkt durch den Maschinenführer beeinflusst. Durch zu hohe oder zu geringe Mengen gleichzeitig zugeführten Holzes kommt es zu starker Unter- oder Überlastung des Schneidaggregats. Ein hoher Erfahrungsgrad des Bedieners ist somit wünschenswert.

Beurteilung des Hackholzes

Die Härte der Baumarten hat maßgeblichen Einfluss auf den Hackprozess. Hölzer mit hohen Rohdichten führen dabei schneller zu Überlastungen der Maschinen, wenn die Einzugsgeschwindigkeit oder die Zapfwellendrehzahl zu hoch eingestellt sind. Die optimale Maschineneinstellung unterscheidet sich demnach zwischen den Sortimenten. Generell ist auch hier vornehmlich eine hohe Maschinenauslastung wünschenswert und Überlastung zu vermeiden, weshalb erneut ein hoher Erfahrungsgrad des Maschinenführers von Vorteil ist.

Wartung der Messer

Besonders die Schärfe der Hackmesser hat sich als maßgeblich für den Durchsatz und den Verbrauch herausgestellt. Die Verwendung stumpfer Messer sollte demnach zwingend vermieden werden. Hierdurch erhöht sich auch die Brennstoffqualität. Trotzdem wurde in 40 % der Fälle bei den Feldversuchen mit stumpfen Messern gehackt. Auch kann schon bei der Anlage der Hackholzpolter die potenzielle Abnutzung der Messer verringert werden, wenn hierbei z. B. der Eintrag von Mineralboden vermieden wird.

Erfahrung der Maschinenführer

Schlussendlich ist der Erfahrungsgrad der Maschinenführer für eine hohe und ressourcenschonende Produktivität ausschlaggebend – sowohl beim Hacken als auch beim Aufbau der Hackholzpolter. Dabei kann die Schulung der Mitarbeiter, vor allem aber der Erfahrungsaustausch zwischen den einzelnen Partnern innerhalb der Prozesskette „Waldhackschnitzel“ die Effizienz maßgeblich steigern.

7 Belüftungswiderstand bei der technischen Hackguttrocknung

DANIEL KUPTZ, PETER TUROWSKI & HANS HARTMANN

Für die Auslegung des Trockners bei der technischen Hackguttrocknung ist der spezifische Luftwiderstand (ΔP in Pa/m), der sich als Gegendruck bei der Belüftung aufbaut, eine wesentliche Kenngröße. Da für die Trocknung von Waldhackschnitzeln jedoch kaum Informationen vorliegen, wird die Leistung der Gebläse in der Praxis häufig überdimensioniert. Die damit verbundenen hohen Stromkosten stellen eine weitere Optimierungsreserve für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln dar.

Der spezifische Luftwiderstand hängt vornehmlich von der Art des Schüttguts ab. Er soll für unterschiedliche Brennstoffqualitäten anhand physikalischer Eigenschaften (Partikelgrößenverteilung, Partikelform, Schüttdichte etc.) abgeleitet werden. Hierzu werden dieselben Proben verwendet, die in den Kapiteln 5 bis 6 zur Untersuchung der Hackschnitzelqualität und des spezifischen Energiebedarfs Anwendung fanden ($n = 95$).

7.1 Stand des Wissens

Die Trocknung von Holzhackschnitzeln findet in der Praxis zunehmend Anwendung. Trockene Hackschnitzel mit einem Wassergehalt $< 20\%$ haben eine Reihe technischer Vorteile. So ist die Wärmeausbeute bei der Verbrennung trockener Biomasse höher als bei frischer Biomasse, da weniger Energie bei der Bildung von Wasserdampf verloren geht [89]. Trockene Hackschnitzel sind lagerfähiger als frische Hackschnitzel, da unterhalb eines Wassergehalts von 20% das Wachstum holzzerstörender Pilze stark eingeschränkt ist [92][161]. Beim Transport trockener Hackschnitzel ist der Kraftstoffverbrauch reduziert, da deutlich weniger Masse pro Charge transportiert werden muss. Ausschlaggebend für viele Produzenten ist jedoch, dass trockene Hackschnitzel einen deutlich höheren Marktpreis erzielen [33].

7.1.1 Trocknungsarten

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, frische Holzhackschnitzel zu trocknen. Hierbei unterscheidet man in natürliche Trocknungsarten, bei denen die Hackschnitzel in einem Haufwerk über den Lagerzeitraum ohne Fremdeinwirkung von selbst trocknen, und in technische Trocknungsarten, bei denen z. B. über den Einsatz von Gebläsen zusätzliche Trocknungsleistung erbracht wird.

7.1.1.1 Natürliche Trocknung

Die natürliche Trocknung von Holz für die Hackschnitzelproduktion erfolgt im ungehackten oder im gehackten Zustand. Im Privatwald, aber auch im europäischen Ausland ist es üblich, im Winter eingeschlagenes Holz in ungehackter Form über einen Sommer im Freien zu lagern. Zur kommenden Heizperiode wird das vorgetrocknete Holz gehackt.

Die aus vorgetrocknetem Holz produzierten Hackschnitzel können schon nach einem Sommer Wassergehalte < 35 Ma-% aufweisen (vgl. Kapitel 5). Die Trocknung von Holz im ungehackten Zustand kann jedoch aus Waldschutzgründen kritisch sein, z. B. wenn trockenes Fichtenholz Brutmöglichkeiten für den Borkenkäfer bietet oder Wildtiere, die im Holzpolter Schutz suchen, durch das Hacken gefährdet werden.

Die natürliche Trocknung in gehackter Form findet am liegenden Haufwerk statt. Durch Erwärmung der Hackschnitzel, z. B. durch Sonneneinstrahlung, vor allem aber durch die Wärme, die bei der Respiration holzersetzer Pilze und Bakterien entsteht, erhöht sich die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft im Haufen. Die trockene Luft entzieht dem Holz Wasser. Durch ihre geringere Dichte erfährt die warme Luft einen Auftrieb und es kommt zu Luftbewegungen im Schüttgut. Der natürliche Trocknungsprozess läuft sehr langsam ab, wobei langfristig Wassergehalte von 15 Ma-% erreicht werden können. Die natürliche Trocknung erscheint daher kostengünstig, da außer für den Transport keine zusätzliche Energie dem Prozess zugeführt werden muss. Sie bringt jedoch eine Reihe von Nachteilen mit sich. So kommt es im gehackten Zustand durch holzzerstörende Pilze zu hohen Trockenmasseverlusten von > 20 Ma-% pro Jahr Lagerdauer [92][161]. Die damit verbundene Sporenbildung kann zu gesundheitlichen Risiken führen. Die Erwärmung im Polter kann zudem so stark sein, dass es zur Selbstentzündung der Hackschnitzel kommt [32].

7.1.1.2 Technische Trocknung

Deutlich schneller als die natürlichen Trocknungsverfahren und mit sehr geringen Trockenmasseverlusten erfolgt die technische Trocknung, bei der unter Aufwendung von Energie kalte oder warme Luft durch das Schüttgut geleitet wird. Die technische Trocknung von Hackschnitzeln nimmt bundesweit in ihrer Bedeutung zu, da an vielen Biogasanlagen/BHKW kostengünstig Wärme zur Verfügung steht. Die Nutzung dieser Abwärme für die Trocknung von Biomasse wird durch die Novellierung des EEG 2012 stark ausgebaut, da neue Biogasanlagen und BHKWs für eine staatliche Förderung mindestens 60 % ihrer Abwärme in einer Kraft-Wärme-Kopplung nutzen müssen. Außerhalb der Wintermonate ist die Abnahme der Wärme gering, weshalb die Biomassetrocknung eine interessante Alternative für die Sommermonate darstellt.

Die technische Trocknung von Biomasse, ob mit oder ohne Nutzung von Abwärme, erfolgt durch die mechanische Belüftung des Schüttguts. Dies geschieht sowohl am liegenden Haufwerk, z. B. in Lagerräumen oder in speziell angefertigten Trocknungscontainern, aber auch bei bewegten Schüttgütern, z. B. mittels Trommel- oder Bandtrockner [98]. In jedem Fall wird trockene Luft durch die Schüttgüter geleitet. Häufig werden hierzu landwirtschaftliche Belüftungsgebläse für Getreide (ca. 1,1 bis 11 kW), bei großen Trocknungsräumen aber auch Industriegebläse von deutlich mehr als 20 kW verwendet. Der ideale Luftdurchsatz bei der Belüftung liegender Schüttungen liegt zwischen 180 und 540 m³/h je m² Grundfläche (0,05 bis 0,15 m/s). Bei sehr hohen Luftgeschwindigkeiten ab 0,5 m/s kann es zum Austrag feiner Partikel kommen [90].

Um möglichst effizient und energiesparend zu trocknen, ist die optimale Auslegung des Gebläses entscheidend. Hierfür ist neben dem gewünschten Volumenstrom der Belüftungswiderstand, den das Gebläse überwinden muss, von großer Bedeutung.

7.1.2 Belüftungswiderstand bei der technischen Hackgutrocknung

Der Belüftungswiderstand bei der technischen Hackgutrocknung hängt von der Schüttgutart, der Höhe der Schüttung und der Luftgeschwindigkeit ab, mit der das Schüttgut belüftet werden soll [5][75][90]. Der spezifische Belüftungswiderstand (ΔP in Pa/m) nimmt dabei exponentiell mit der Luftgeschwindigkeit (V in m/s) zu (Abbildung 85).

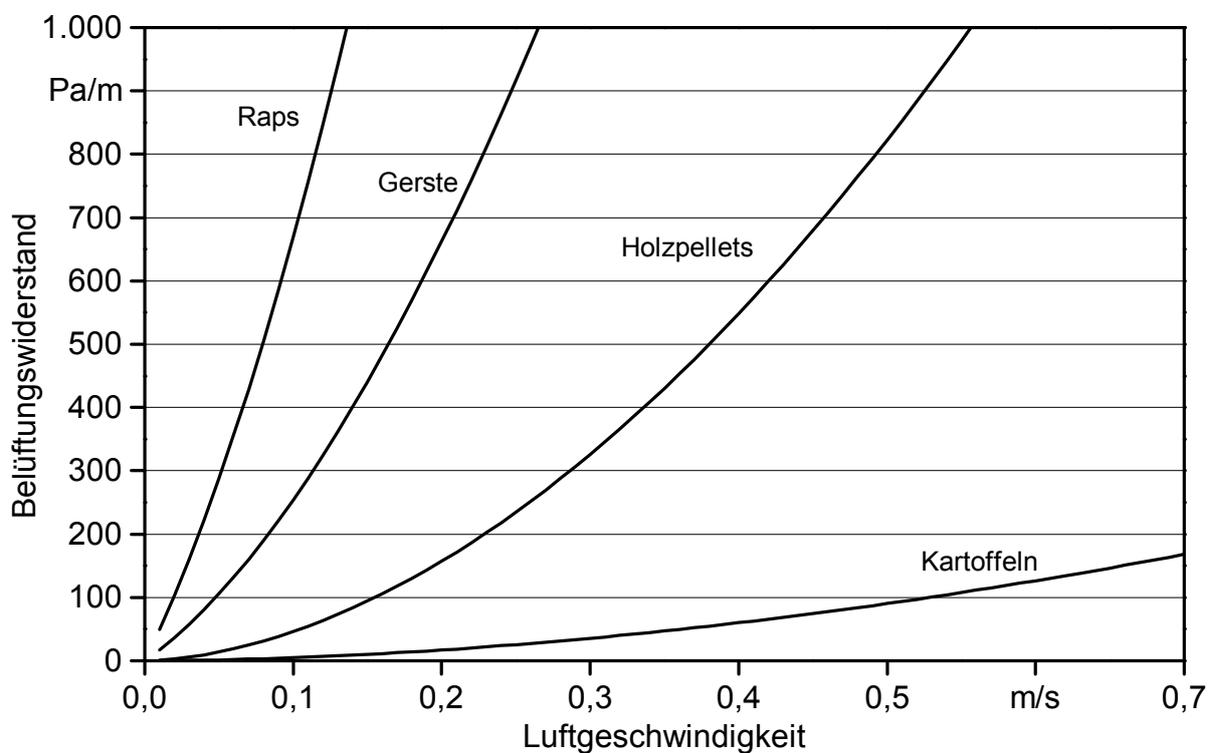


Abbildung 85: Beispiele für den spezifischen Belüftungswiderstand aus der Literatur [5][205]

Der spezifische Belüftungswiderstand lässt sich mithilfe einfacher mathematischer Formeln beschreiben. Als „klassische“ Modelle werden die Funktionen nach RAMSIN [166] (Formel 8-1) bzw. SHEDD [181] (Formel 8-2) verwendet. Daneben finden das Modell von HUKILL & IVES [105] (Formel 8-3) und das Modell von ERGUN [71] (Formel 8-4) regelmäßig Anwendung in der Praxis [5].

$$\Delta P = a_1 * V^{b_1} \quad \text{Modell nach RAMSIN [166]} \quad \text{Formel [8-1]}$$

$$V = a_2 * \Delta P^{b_2} \quad \text{Modell nach SHEDD [181]} \quad \text{Formel [8-2]}$$

$$\Delta P = \frac{a_3 V^2}{\ln(1+b_3 V)} \quad \text{Modell nach HUKILL \& IVES [105]} \quad \text{Formel [8-3]}$$

$$\Delta P = a_4 V + b_4 V^2 \quad \text{Modell nach ERGUN [71]} \quad \text{Formel [8-4]}$$

Bei allen vier Formeln beschreibt V die Luftgeschwindigkeit durch die Schüttung in m/s und ΔP die auf eine feste Schüttguthöhe bezogene Druckdifferenz in Pa/m. Die Parameter a_1 – a_4 und b_1 – b_4 stellen materialspezifische Parameter dar, die direkt von der Schüttgutart abhängen. Sind a und b im jeweiligen Modell für eine Schüttgutart bekannt, lässt sich der zu erwartende Belüftungswiderstand für jede Luftgeschwindigkeiten berechnen. Die Parameter a und b sind zwischen den Modellen nicht austauschbar. In neueren Publikationen werden daher häufig alle 4 Modellparameter a und b für eine Schüttgutart angegeben [205].

7.1.3 Wahl des Gebläses für die technische Hackguttrocknung

Ist der Belüftungswiderstand bekannt, lässt sich die minimal benötigte Gebläseleistung (L in kW) aus der Fläche des Lagerraums (A in m^2), der Luftgeschwindigkeit durch die Schüttung (V in $\text{m}^3/\text{h m}^2$ bzw. m/h), dem Belüftungswiderstand der gesamten Schütthöhe (P in Pa) sowie den Wirkungsgraden des Gebläses (η_G in %) und des Gebläsemotors (η_M in %) berechnen:

$$L \text{ (in kW)} = \frac{V * A * P}{\eta_M * \eta_G * 3,6 * 10^6} \quad [90] \quad \text{Formel [8-5]}$$

Durchschnittliche Wirkungsgrade für die Kraftübertragung von Gebläsen (η_G) sind $> 95\%$ und für den Gebläsemotor ab 10 kW Leistung (η_M) $> 88\%$. In der Praxis wird bei der Berechnung der Gebläseleistung häufig ein 20%iger Sicherheitszuschlag auf den absoluten Belüftungswiderstand P gegeben [90]. Als optimaler Luftdurchsatz wird für Hackgut von 180 bis 540 $\text{m}^3/\text{h je m}^2$ Lagerraumfläche bzw. von 0,05 bis 0,15 m/s im freien Lagerraum ausgegangen [90]. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen Nieder-, Mittel und Hochdruckgebläse dient Formel 8-5 jedoch nur einer ersten Abschätzung des kW-Bereichs, wohingegen die tatsächliche Gebläsewahl sich primär am benötigten Volumenstrom und dem erwarteten Gegendruck orientieren sollte.

7.2 Material und Methoden

Für die Messungen des spezifischen Belüftungswiderstands wurde ein Strömungskanal gebaut, in dem der statische Druck in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und der Schüttguthöhe gemessen werden kann. In umfangreichen Vorversuchen wurde die Methodik getestet und optimiert. Der Belüftungswiderstand wurde anschließend für jede Schüttgutprobe aus den Feldversuchen sowie für jede Probe aus den stationären Hackversuchen mit dem elektrischen Trommelhacker experimentell bestimmt ($n = 95$). Aus den Daten wurden Modelle zur Abschätzung des spezifischen Belüftungswiderstands von Hackschnitzeln entwickelt, mithilfe derer ΔP anhand einfach messbarer physikalischer Brennstoffeigenschaften (z. B. der Schüttdichte) berechnet werden kann.

7.2.1 Versuchsaufbau

Die Messungen erfolgten in einem selbst konstruierten Strömungskanal. Der eigentliche Kanal besteht aus einem 2 m langen Metallzylinder ($\varnothing_{\text{innen}} = 500 \text{ mm}$), der mit einem maximalen Schüttgutvolumen von $0,4 \text{ m}^3$ gefüllt werden kann. Ein unterseitig angebrachter, kippbarer Metallrost hält dabei die Hackschnitzel im Zylinder fest (Abbildung 86). Die Befüllung und Entleerung des Metallzylinders erfolgt unter Zuhilfenahme eines Lastenkrans. Zur Befüllung wird ein Big Bag mit einer Hackschnitzelprobe von $0,4 \text{ m}^3$ über den senkrechtstehenden Metallzylinder gehoben und über eine Öffnung an der Unterseite entleert. Zum Entleeren wird der Zylinder wiederum mithilfe des Lastenkrans über einen leeren Big Bag platziert und der Kipprost geöffnet.

Für die Messung wird der mit Schüttgut gefüllte Metallzylinder senkrecht auf eine dazugehörige Untereinheit gestellt (Abbildung 86, Abbildung 87). Diese besteht aus einer Holzkiste mit den Außenmaßen $1000 \times 1500 \times 500 \text{ mm}$. Die Wanddicke beträgt 20 mm . Sämtliche Fugen der Kiste wurden luftdicht abgeschlossen. Der Zylinder kann mithilfe des Lastenkrans passgenau auf eine Öffnung in der Kistenoberseite gestellt und mittels einer $800 \times 800 \text{ mm}$ Rahmenkonstruktion luftdicht abgeschlossen werden.

Die Trocknungsluft wird mithilfe eines Gebläses (TLR, Himel Maschinen GmbH & Co. KG, Melchingen) über einen Schlauch zunächst in eine Holzkiste und dann über die Öffnung in der Kistenoberseite durch den mit Schüttgut gefüllten Zylinder geleitet (Abbildung 86). Ein Turbinenradgaszähler (TERZ 94, RMG Messtechnik GmbH, Ebersberg) wurde zwischen Gebläse und Holzkiste geschaltet. Die mittlere Luftgeschwindigkeit (V in m/s^2) im Zylinder berechnet sich über den Quotienten des gemessenen Volumenstroms (in m^3/s^1) und der Zylinderquerschnittsfläche (in m^2).

Im Strömungskanal wird bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten der statische Druck gemessen. Hierzu wird ein Metallröhrchen über eine von insgesamt sechs Öffnungen ($\varnothing = 5 \text{ mm}$, Abstand = 25 cm) in den mit Schüttgut gefüllten Strömungskanal eingeführt. Gemessen wird immer in der Mitte des Zylinders, um mögliche Randeffekte zu minimieren. Das Röhrchen ist über einen PVC-Schlauch mit einem von drei Manometern verbunden ($0\text{--}100$, $0\text{--}500$ und $0\text{--}2500 \text{ Pa}$, Differenzdruckumformer P26, Halstrup-Walcher GmbH, Kirchzarten).

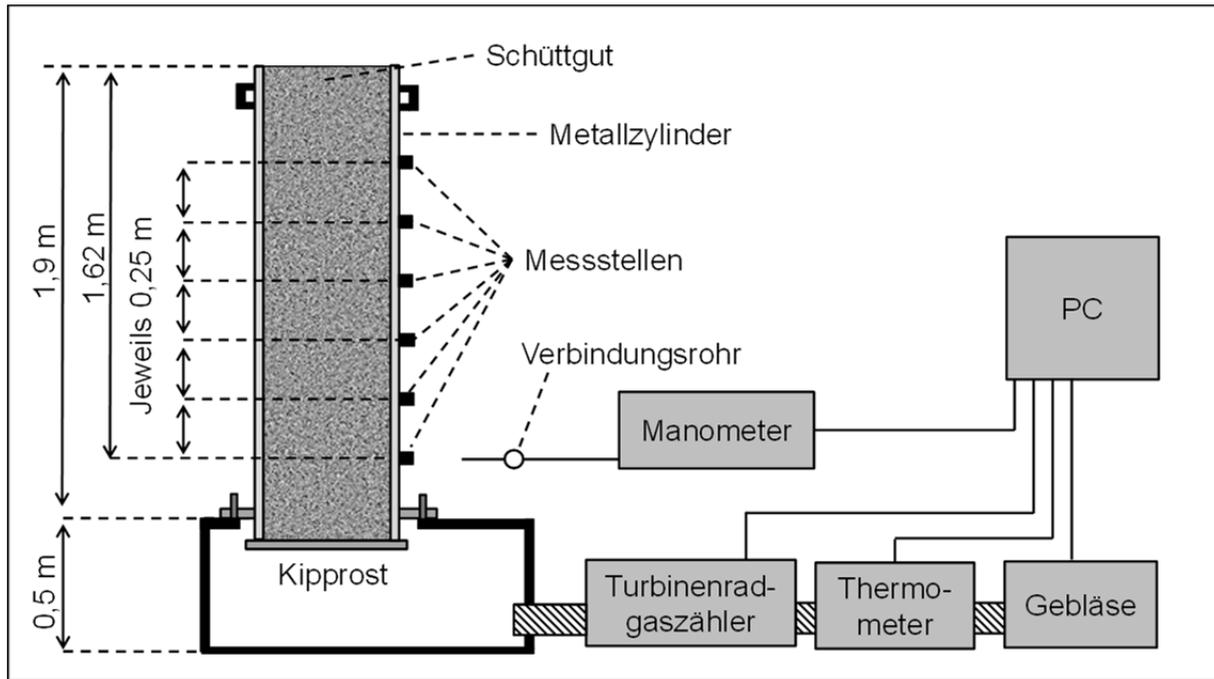


Abbildung 86: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung des Belüftungswiderstands von Schüttgütern

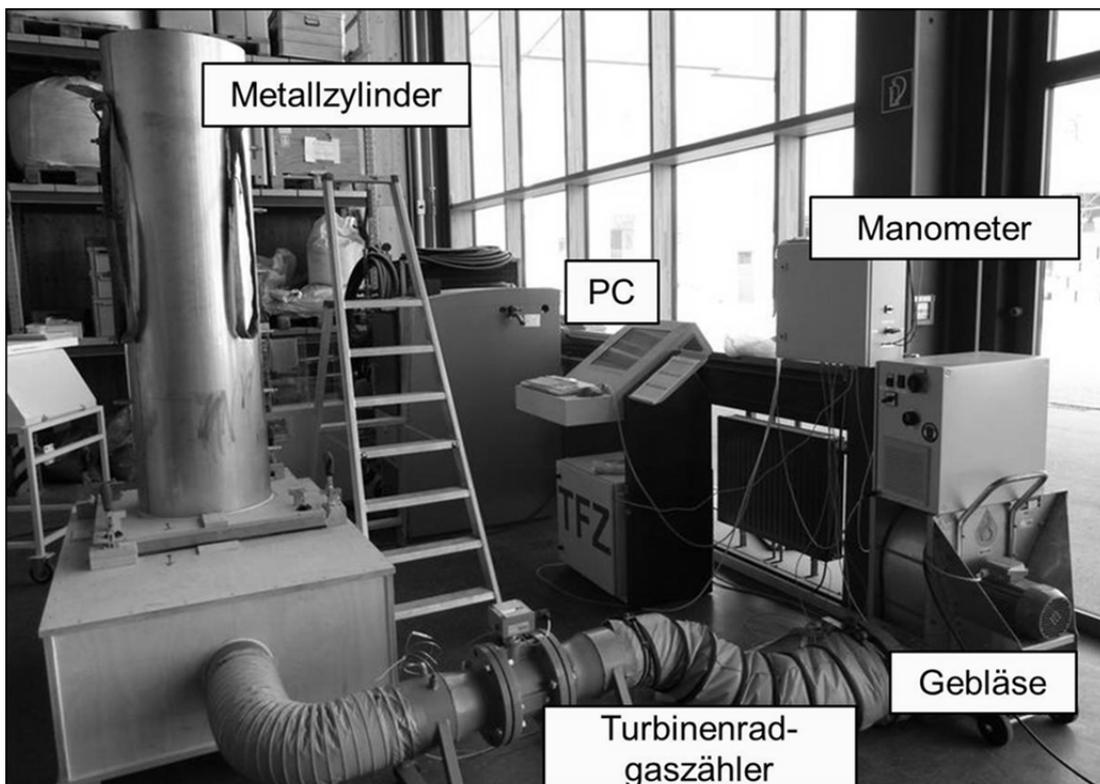


Abbildung 87: Versuchsaufbau zur Messung des Belüftungswiderstands von Schüttgütern im Technikum des TFZ

Der statische Druck, der sich bei der Belüftung einstellt, kann so auf insgesamt sechs verschiedenen Höhen gemessen werden. Messöffnungen, die aktuell nicht verwendet werden, können mittels Rohrverschraubungen (Swagelok Company, München, Deutschland) verschlossen werden. Die Manometer, der Turbinenradgaszähler und das Gebläse sind an einen PC angeschlossen. Über LabView 2010 kann das Gebläse stufenlos vom Leerlauf (0 %) bis 100 % Leistung eingestellt werden. Die Messwerte der Manometer und des Turbinenradgaszählers werden dabei direkt am PC abgelesen. Zusätzlich wurde ein Thermometer zwischen Gebläse und Turbinenradgaszähler geschaltet um die Temperatur der Trocknungsluft zu bestimmen.

Alle Versuche wurden an vorgetrockneten Hackschnitzeln mit einem einheitlichen Wassergehalt von 15 Ma-% durchgeführt. In zahlreichen Vorversuchen wurde geklärt, inwieweit der Belüftungswiderstand vom Wassergehalt der Hackschnitzel abhängig ist und ob der Belüftungswiderstand tatsächlich linear mit der Schüttguthöhe zunimmt (Anhang 9.5).

7.2.2 Berechnung des Belüftungswiderstands

Der spezifische Belüftungswiderstand wurde für jedes Schüttgut aus der linearen Steigung des statischen Drucks (in Pa) über die Schüttguthöhe (in m) berechnet (Abbildung 88).

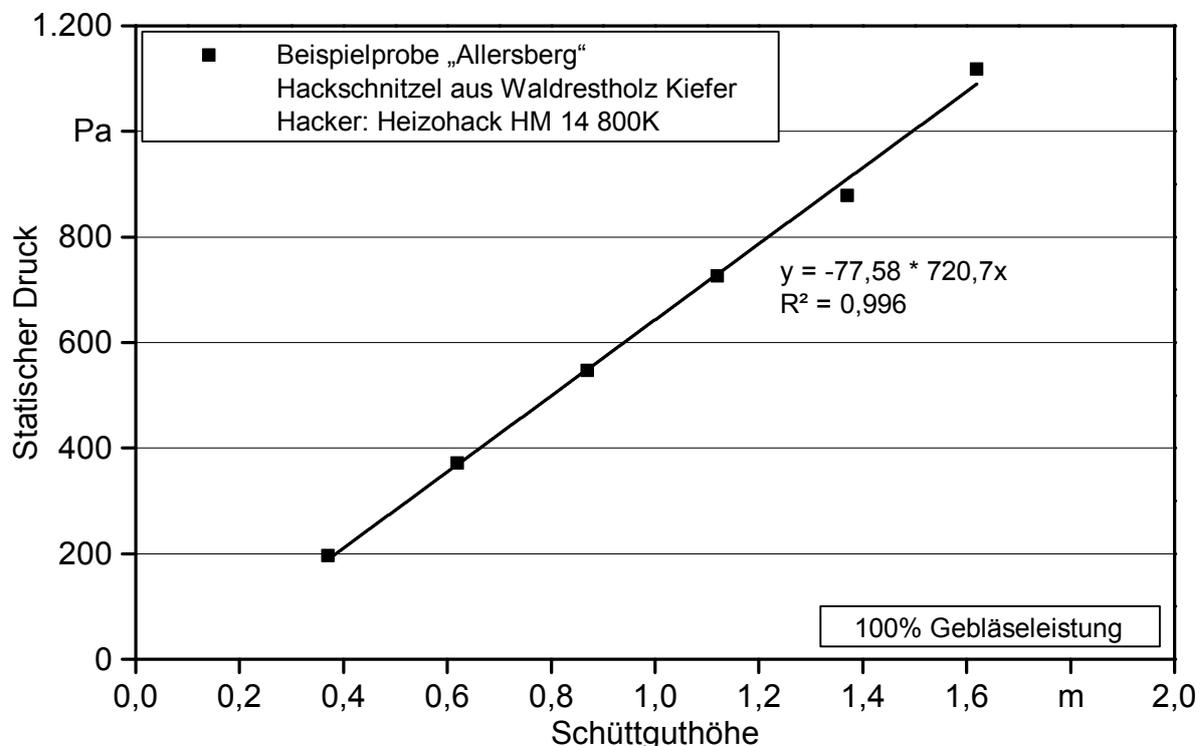


Abbildung 88: Beispiel für die lineare Zunahme des statischen Drucks mit der Schüttguthöhe bei einer festen Luftgeschwindigkeit

Gemessen wurde bei elf verschiedenen Gebläseleistungen (Leerlauf bis 100 % Leistung in 10-%-Schritten). Die obersten zwei Messstellen wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da es hierbei zu Abweichungen des linearen Zusammenhanges kommen kann. Die Berechnung erfolgte separat für jede verwendete Gebläseeinstellung. Um die Genauigkeit des Gesamtergebnisses zu erhöhen, wurden für jedes Schüttgut mindestens zwei komplette Messreihen aufgenommen ($n = 2$), bei Abweichungen der Kurven voneinander wurde eine dritte Messung durchgeführt ($n = 3$).

Aus den Datensätzen wurden für jedes Schüttgut mittels der Formeln nach RAMSIN [166] (8-1), HUKILL & IVES [105] (8-3) und ERGUN [71] (8-4) die modellspezifischen Materialparameter a und b berechnet. Die Formel nach SHEDD [181] (8-2) wurde nicht weiter verwendet, da sie die Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Belüftungswiderstand setzt und damit für die direkte Abschätzung des Belüftungswiderstands uninteressant ist. In einer Gesamtbewertung der Schätzergebnisse werden die Formeln 8-1, 8-3 und 8-4 hinsichtlich ihrer Genauigkeit evaluiert.

7.2.3 Modellierung des Belüftungswiderstands

Üblicherweise werden die berechneten Parameter a und b zur Beschreibung des Belüftungswiderstands einer Schüttgutart direkt angegeben [5]. In der hier präsentierten Studie wurden insgesamt 95 zum Teil sehr unterschiedliche Hackschnitzelproben analysiert (Kapitel 5). Anstelle von 95 Einzelmessungen werden daher aus den experimentellen Daten Modelle entwickelt, mithilfe derer die Parameter a und b anhand einfacher messbarer physikalischer Brennstoffeigenschaften (z. B. Schüttdichte, Partikelgrößenverteilung etc.) direkt abgeschätzt werden können.

Multiple lineare Regressionsanalysen wurden verwendet, um die Parameter a und b der Formeln nach RAMSIN [166] (Formel 8-1) und nach ERGUN [71] (Formel 8-4) zu modellieren. Im zweiten Schritt wurden allgemeine Belüftungswiderstandsmodelle entwickelt, wobei ein Modell aus jeweils zwei multiplen linearen Regressionsanalysen besteht, eine für Parameter a und eine für Parameter b . Als Modellvariablen wurden physikalische Brennstoffparameter gewählt. Dabei wurden ein „wissenschaftliches“ und ein „vereinfachtes“ Modell entwickelt (Tabelle 74). Alle Parameter gingen als Einzelwerte (X), als quadrierte Werte (X^2) und als Kreuzprodukt ($X \times Y$) in die Berechnung ein. Grob zusammengefasst nutzt das „wissenschaftliche Modell“ die Schüttdichte und die Parameter des Bildanalyseverfahrens (Abschnitt 5.2.4.7), d. h., es beinhaltet sowohl die Partikelgrößenverteilung als auch die Partikelform, wohingegen das „vereinfachte Modell“ auf eine gute Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis abzielt und lediglich die Schüttdichte, den Stauchfaktor und zwei Siebfraktionen ($< 3,15$ mm und > 16 mm) verwendet (Tabelle 74).

Zusätzlich wurden für die Berechnung eines „wissenschaftlichen“ und eines „vereinfachten“ Modells jeweils zwei Datensätze verwendet. Datensatz 1 umfasst dabei alle gemessenen Hackschnitzelproben („Hackschnitzel-Modell“), wohingegen Datensatz 2 gezielt nur Daten von Hackschnitzeln aus Nadelholz („Nadelholz-Hackschnitzel-Modell“) ver-

wendet, da die technische Trocknung von Hackschnitzeln in kalten Regionen mit hohem Nadelholzanteil als besonders praxisrelevant angesehen wurde.

Tabelle 74: Physikalische Brennstoffparameter für die Berechnung der Parameter a und b mittels multipler linearer Regressionsanalyse (Abschnitt 5.2.4)

Parameter	Abkürzung	Modelltyp
Schüttdichte	BD_{15}	beide
Median der Partikelgrößenverteilung	<i>Median</i>	wissenschaftlich
25-%-Quartil der Partikelgrößenverteilung	Q_{25}	wissenschaftlich
75-%-Quartil der Partikelgrößenverteilung	Q_{75}	wissenschaftlich
Maximale Länge	<i>MaxL</i>	wissenschaftlich
Minimaler Feret-Durchmesser	<i>MinFer</i>	wissenschaftlich
Kornformfaktor	<i>KFF</i>	wissenschaftlich
Länge-zu-Breite-Verhältnis	<i>LzuB</i>	wissenschaftlich
Stauchfaktor	<i>SF</i>	vereinfacht
Siebfraktion < 3,15 mm	$F_{<3}$	vereinfacht
Siebfraktion > 16 mm	$F_{>16}$	vereinfacht

Folglich wurden insgesamt acht Modelle entwickelt (2 Formeln × 2 Modelltypen × 2 Datengrundlagen). Jedes Modell besteht dabei aus den Ergebnissen zweier multipler linearer Regressionsanalysen – eine für Parameter a, eine für Parameter b.

Im abschließenden dritten Schritt der Modellierung wurde der direkte Einfluss der jeweiligen physikalischen Brennstoffeigenschaften auf den spezifischen Belüftungswiderstand untersucht. Hierzu wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Bei einer Sensitivitätsanalyse werden die Mittelwerte aller verwendeten Modellparameter (Tabelle 74) in das jeweilige Modell eingesetzt, um so einen mittleren Belüftungswiderstand ΔP zu berechnen. Im nächsten Schritt wird jeder einzelne Modellparameter individuell um 50 bis 150 % seines Mittelwerts variiert, wobei alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Die sich hieraus ergebende Änderung in ΔP wird grafisch aufgetragen und interpretiert.

7.3 Ergebnisse und Diskussion der Belüftungswiderstandsmessungen

7.3.1 Spezifischer Belüftungswiderstand

Der spezifische Belüftungswiderstand aller gesammelten Hackschnitzelproben war höchst variabel. Insgesamt erstreckte sich ΔP für die Feldversuchsproben von 10,8 bis 100,2 Pa/m (bei 0,1 m/s) bzw. von 213 bis 1220 Pa/m (bei 0,5 m/s, siehe Abbildung 89). Die untersuchten Proben umfassten dabei physikalisch sehr unterschiedliche Brennstoffqualitäten (Kapitel 5). Minimale Werte für ΔP wurden für Hackschnitzel aus KUP-Weide, maximale Werte für feine Hackschnitzel aus Fichte, die im Privatwald mit einem 30 × 30 mm großen Siebkorb produziert wurden, gemessen.

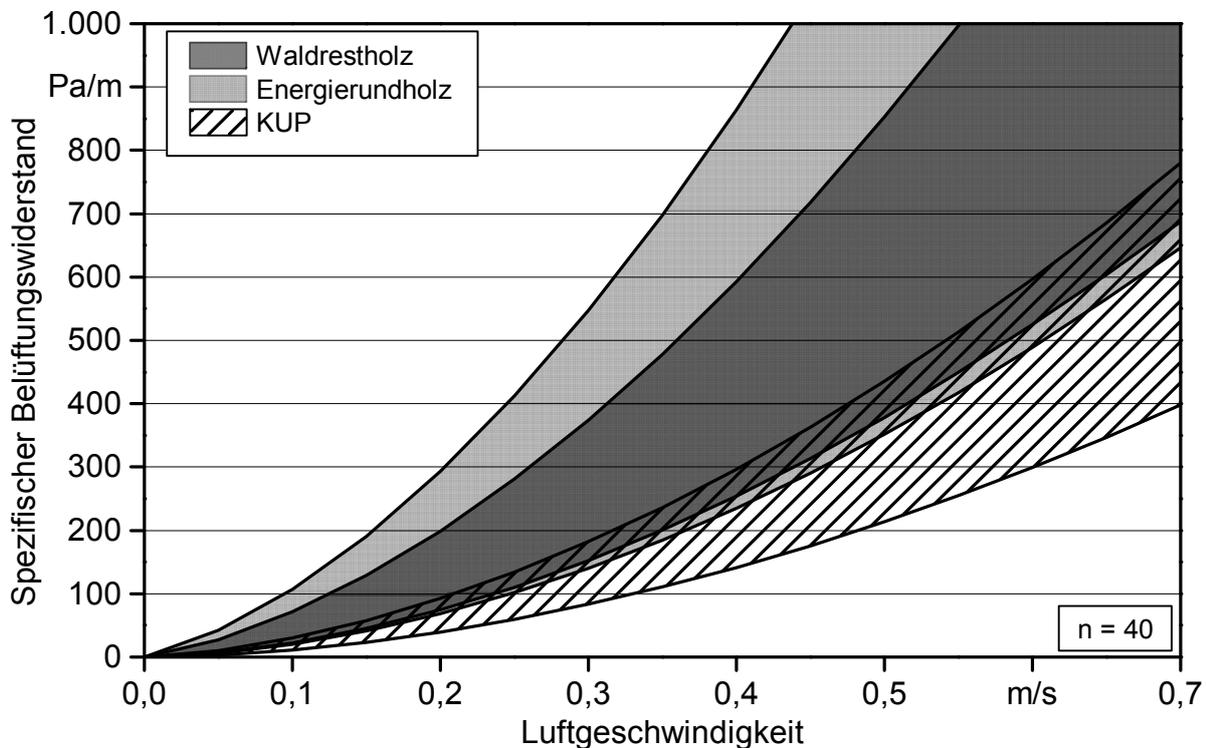


Abbildung 89: Belüftungswiderstand von Hackschnitzeln aus den Feldversuchen

Tabelle 75: Wertebereich des Belüftungswiderstands von Hackschnitzeln aus den Feldversuchen (Belüftungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s)

Rohmaterial	Belüftungswiderstand (in Pa/m)
Energierundholz	19,1–100,2
Waldrestholz	21,1–64,8
KUP-Material	10,7–27,5

Insgesamt war die Varianz von ΔP für Hackschnitzel aus Energierundholz am größten, gefolgt von Hackschnitzeln aus Waldrestholz und aus Kurzumtriebsplantagen (Tabelle 75). Der durchschnittliche Belüftungswiderstand von Proben aus KUP war dabei deutlich geringer als der von Waldhackschnitzeln (Tabelle 75). Selbst Energierundholz-Hackschnitzel aus derselben Baumart zeigten höhere Belüftungswiderstände als KUP-Hackschnitzel (z. B. Pappel-Energierundholz: 31,3–50,5 Pa/m bei 0,1 m/s).

Auch innerhalb desselben Rohmaterials war ΔP höchst variabel (z. B. für Fichte aus Energierundholz: 24 bis 106 Pa/m bei 0,1 m/s). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Belüftungswiderstand stark vom Herstellungsprozess abhängt. Eine sinnvolle Eingruppierung der Waldhackschnitzel hinsichtlich der verwendeten Maschineneinstellungen führte jedoch bei den Feldversuchsproben aufgrund der sehr hohen Variabilität innerhalb der beobachteten Prozessketten zu keinem sinnvollen Ergebnis.

Im Gegensatz zu den Feldversuchen konnten bei den stationären Hackversuchen mit dem elektrischen Trommelhacker am TFZ gezielt einzelne Prozessparameter verändert werden. Aus den Ergebnissen der stationären Versuche wird der Einfluss der einzelnen Maschineneinstellungen deutlich (Abbildung 90).

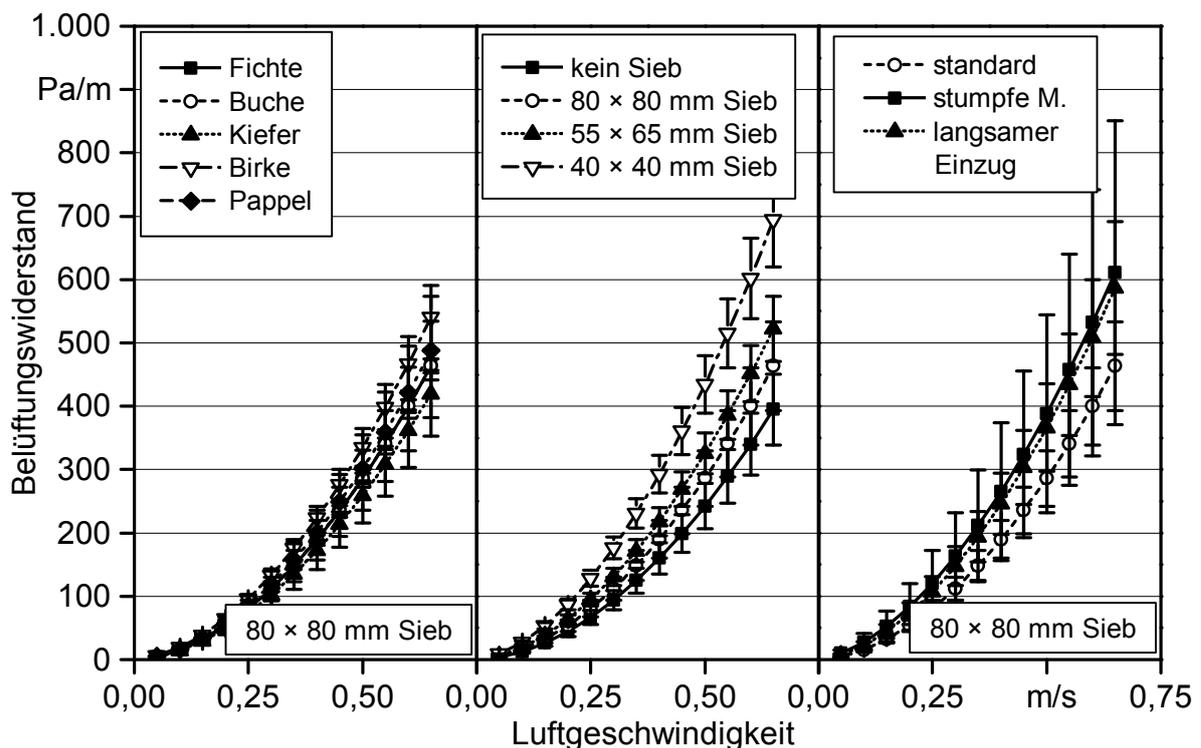


Abbildung 90: Einfluss der Baumart und des Herstellungsprozesses auf den Belüftungswiderstand der Hackschnitzel (elektrischer Trommelhacker)

Bei der Verwendung von Siebkörben mit kleinen Lochgrößen, von stumpfen Messern oder von einer langsamen Einzugswalzengeschwindigkeit zeigte sich eine deutliche Zunahme von ΔP . Zugleich nahm die Streuung der Werte bei der Verwendung stumpfer

den berechneten optimalen kW-Bereich (Formel 8-5) leicht anhand der Gebläse-Kennlinie, d. h. anhand der grafischen Darstellung von Volumenstrom und Maximaldruck, abschätzen. Die zusätzlichen Investitionskosten für den Kauf eines neuen Gebläses lassen sich durch die Einsparungen im Energieverbrauch schnell amortisieren (Tabelle 76).

Tabelle 76: Berechnungsbeispiel für die Auslegung eines Gebläses für die technische Trocknung von Hackschnitzeln bei unterschiedlichen Lagerraumgrößen und einer Belüftungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s nach Formel 8-5. A = Lagerraumfläche (in m²), h = Schüttguthöhe (in m), V_{abs} = absoluter Luftdurchsatz (in m³/h), P = absoluter Belüftungswiderstand (in Pa, inklusive 20%iger Sicherheitszuschlag), L = geschätzte Gebläseleistung (in kW nach Formel 8-5), E = Energieverbrauch (in kWh) bei jährlich 5.000 Betriebsstunden

	A	h	V _{abs}	P	L	E
tatsächlicher Druck	50	1	18 000	46	0,28	1383
(gemessen)	100	2	36 000	92	1,11	5530
Druck überschätzt	50	1	18 000	72	0,43	2163
(Abbildung 91)	100	2	36 000	145	1,73	8650
Druck unterschätzt	50	1	18 000	24	0,14	714
(Abbildung 91)	100	2	36 000	48	0,57	2854

7.3.2 Modellierung des Belüftungswiderstands

Aufgrund der hohen Variabilität innerhalb der einzelnen Hackschnitzelarten werden im folgenden Modelle entwickelt, mithilfe derer sich der Belüftungswiderstand bei der technischen Hackgutttrocknung direkt aus einfach bestimmbaren physikalischen Brennstoffparametern abschätzen lässt. Hierzu werden zunächst die materialspezifischen Parameter a und b der einzelnen Schüttgüter berechnet (Formel 8-1 bis 8-4). Mittels multipler linearer Regressionsanalyse werden allgemeine Formeln für a und b auf Basis ausgewählter physikalischer Brennstoffparameter entwickelt. Sensitivitätsanalysen erlauben dabei eine Bewertung des individuellen Einflusses der Modellparameter auf ΔP .

7.3.2.1 Ermittlung der materialspezifischen Parameter a und b

Die experimentellen Daten für ΔP wurden für jede Schüttgutprobe mittels der Formeln nach RAMSIN [166], HUKILL & IVES [105] und ERGUN [71] als Funktion der Luftgeschwindigkeit V gefittet (Abschnitt 7.2.2). Alle drei verwendeten Formeln beschreiben dabei den Belüftungswiderstand des jeweiligen Schüttguts mit sehr hoher Genauigkeit. Die Parameter a und b der Formeln nehmen sehr unterschiedliche Wertebereiche an und sind untereinander nicht direkt vergleichbar (Tabelle 77). Die Bestimmtheitsmaße der einzelnen Regressionen waren in allen Fällen > 0,998. Die prozentuale Abweichung eines

nach Formel berechneten Werts zum tatsächlichen Messwert war durchweg $< 0,3\%$ (Abbildung 92).

Tabelle 77: Wertebereich der Parameter a und b nach den Formeln von RAMSIN, HUKILL & IVES und ERGUN für die analysierten Hackschnitzel

Formel	Parameter a	Parameter b
RAMSIN [166] Formel [8-1]	683–3580	1,55–1,93
HUKILL & IVES [105] Formel [8-3]	3657–12 158	19–15648
ERGUN [71] Formel [8-4]	35–764	603–3460

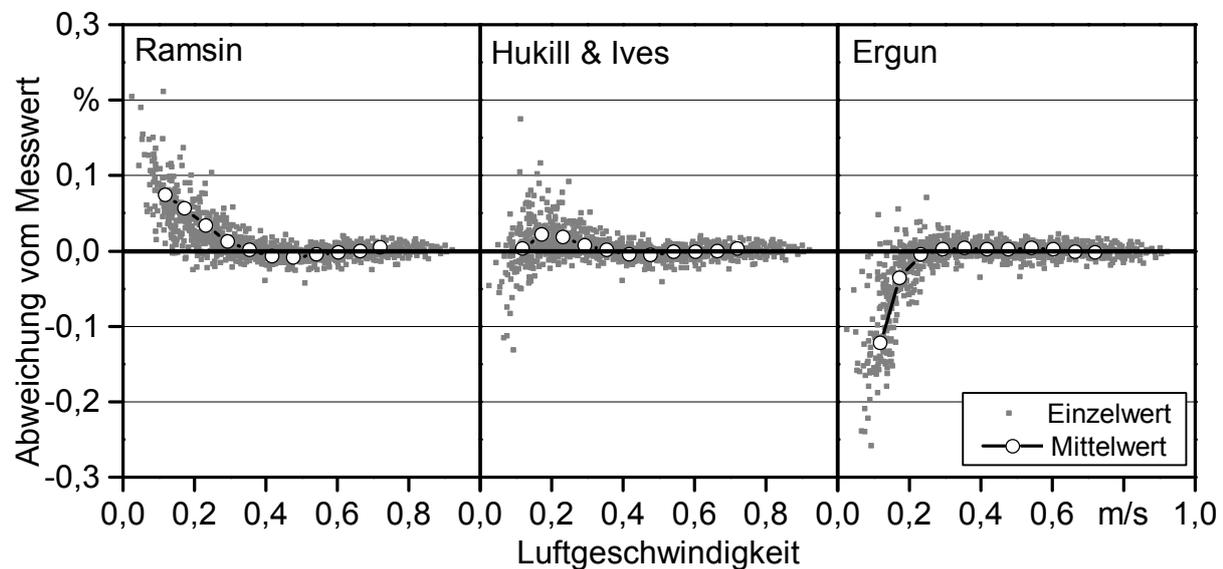


Abbildung 92: Prozentuale Abweichung der berechneten Werte vom tatsächlichen Wert für den Belüftungswiderstand nach den Modellen von RAMSIN [166], HUKILL & IVES [105] und ERGUN [71]

Der Belüftungswiderstand ΔP ließ sich für die einzelnen Schüttgüter mit der Formel nach HUKILL & IVES [105] am genauesten beschreiben, wohingegen die Formel nach RAMSIN [166] in niedrigen Luftgeschwindigkeitsbereich den Belüftungswiderstand tendenziell über- und die Formel nach ERGUN [71] diesen unterschätzte (Abbildung 92). Die Unterschiede in der Genauigkeit der drei Gleichungen waren jedoch minimal ($< 0,3\%$), weshalb alle drei Formeln als geeignet für die mathematische Darstellung des spezifischen Belüftungswiderstands von Hackschnitzeln bewertet wurden.

7.3.2.2 Modellentwicklung mittels multipler linearer Regressionsanalyse

Für die Erstellung der Belüftungswiderstandsmodelle wurde die Formel nach ERGUN [71] gewählt. Die Abschätzung der Parameter a und b mittels multipler linearer Regressions-

analyse führte im Fall der Formel nach HUKILL & IVES [105] zu keinem präzisen Ergebnis (Tabelle 78) Die Formel nach RAMSIN [166] erbrachte vergleichbare Ergebnisse wie die Formel nach ERGUN [71], führt aber, da sie den Belüftungswiderstand tendenziell überschätzt, zusammen mit dem in der Praxis üblichen 20%igen Sicherheitszuschlag zu einer doppelten Überschätzung von ΔP (Abbildung 92).

Tabelle 78: Bestimmtheitsmaße für die Parameter a und b der Modelle nach RAMSIN (a_1 und b_1), HUKILL & IVES (a_3 und b_3) und ERGUN (a_4 und b_4), berechnet mittels multipler linearer Regressionsanalyse

Modell	Datensatz	a_1	b_1	a_3	b_3	a_4	b_4
wissenschaftlich	alle Proben	0,837	0,842	0,549	0,383	0,867	0,831
	Nadelholz	0,894	0,918	0,581	0,276	0,912	0,895
vereinfacht	alle Proben	0,775	0,750	0,256	0,127	0,765	0,683
	Nadelholz	0,775	0,841	0,520	0,130	0,847	0,765

Wissenschaftliche Modelle

Die „wissenschaftlichen“ Belüftungswiderstandsmodelle zielen auf eine detaillierte Analyse des Einflusses physikalischer Brennstoffeigenschaften auf ΔP ab. Sie nutzen daher Modellparameter für die Schüttdichte, für die Partikelgrößenverteilung und für die Partikelform (Tabelle 74). Mithilfe des wissenschaftliche Modellansatzes lassen sich die berechneten Parameter a und b der Formel (8-4) nach ERGUN [71] mit sehr hoher Genauigkeit abschätzen ($R^2 > 0,831$, Tabelle 78). Das „Nadelholz-Hackschnitzel“-Modell war dabei präziser als das allgemeine „Hackschnitzel“-Modell. Einzelne Parameter (75%-Quartil, maximale Partikellänge) konnten ohne Genauigkeitsverlust aus den Modellen entfernt werden. Somit verblieben sechs Brennstoffparameter für die Modellberechnung: die Schüttdichte (BD_{15}), das 25%-Quartil (Q_{25}), der Median der Partikelgrößenverteilung (*Median*), der Kornformfaktor (*KFF*), das Länge-zu-Breite-Verhältnis (*LzuB*) und der minimale Feret-Durchmesser (*MinFer*).

Hackschnitzel-Modell

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

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

$$\times (\text{Median} \times KFF) - 15,3 \times (\text{Median} \times LzuB) - 5,78 \times (\text{Median} \times \text{MinFer})$$

Nadelholz-Hackschnitzel-Modell

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_a = & - 68,89 - 38,2 \times Q_{25} + 156,8 \times LzuB + 32,8 \times \text{MinFer} - 0,01 \times BD_{15}^2 \\ & - 229,9 \times KFF^2 + 4,22 \times LzuB^2 + 4,92 \times (BD_{15} \times KFF) - 0,58 \times (BD_{15} \times \\ & LzuB) + 11,9 \times (Q_{25} \times KFF) - 8,76 \times (LzuB \times \text{MinFer}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_b = & 2991 - 289,9 \times Q_{25} - 3916,7 \times KFF + 1378,9 \times LzuB + 297 \times \text{MinFer} \\ & + 1,30 \times (BD_{15} \times Q_{25}) + 11,5 \times (BD_{15} \times KFF) - 3,59 \times (BD_{15} \times LzuB) \\ & - 2,07 \times (BD_{15} \times \text{MinFer}) + 143,7 \times (KFF \times \text{MinFer}) - 50,9 \times (LzuB \times \\ & \text{MinFer}) \end{aligned}$$

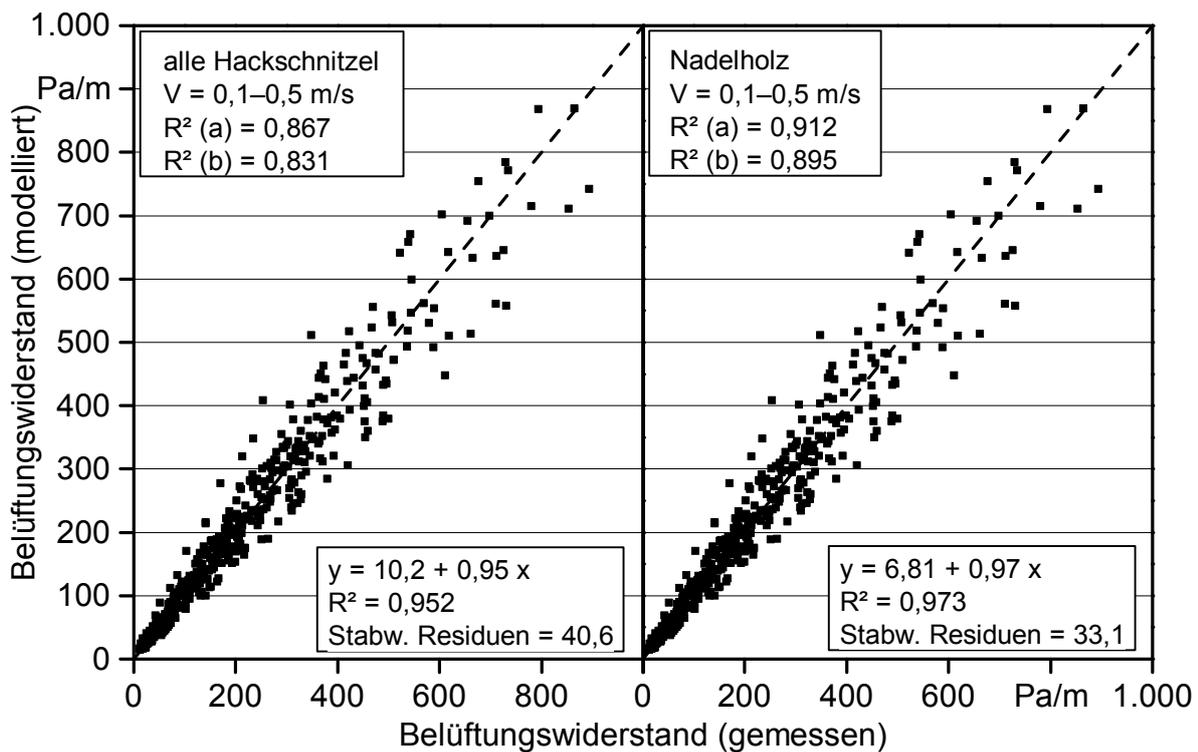


Abbildung 93: Vergleich des modellierten und des gemessenen Belüftungswiderstands für das wissenschaftliche Hackschnitzel- und Nadelholz-Hackschnitzel-Modell

Die Güte der entwickelten Modelle wurde mittels linearer Regressionen zwischen gemessenen und modellierten Werten für ΔP bis zu einer Luftgeschwindigkeit von 0,5 m/s bestimmt (Abbildung 93). Luftgeschwindigkeiten $> 0,5$ m/s können zur Emission feiner Partikel führen und sind daher für die Belüftung von Hackschnitzeln nicht praxisrelevant.

Beide wissenschaftlichen Modelle gaben ΔP mit hoher Genauigkeit wieder (Abbildung 93). Wie zu erwarten zeigte dabei das Modell für Nadelholz-Hackschnitzel eine geringere Abweichung zwischen modellierten und gemessenen Werten. Für praxisrelevante Belüftungsgeschwindigkeiten von 0,1 m/s war die Standardabweichung der Residuen $\pm 6,7$ Pa/m (Hackschnitzel-Modell) bzw. $\pm 5,5$ Pa/m (Nadelholz-Hackschnitzel-Modell).

Sensitivitätsanalysen wurden für die entwickelten Modelle durchgeführt (Abbildung 94 und Abbildung 95). Beide wissenschaftlichen Modelle erlaubten dabei einen reproduzierbaren, detaillierten Einblick in Einflüsse ausgewählter physikalischer Brennstoffparameter auf ΔP :

Der Belüftungswiderstand stieg mit zunehmender Schüttdichte (BD_{15}), hohen Kornformfaktoren (KFF) und hohen Medianwerten ($Median$), fiel jedoch mit zunehmenden Werten für das 25-%-Quartil (Q_{25}), dem minimalen Feret-Durchmesser ($MinFer$) und dem Längen-zu-Breiten-Verhältnis ($LzuB$, siehe Abbildung 94 und Abbildung 95).

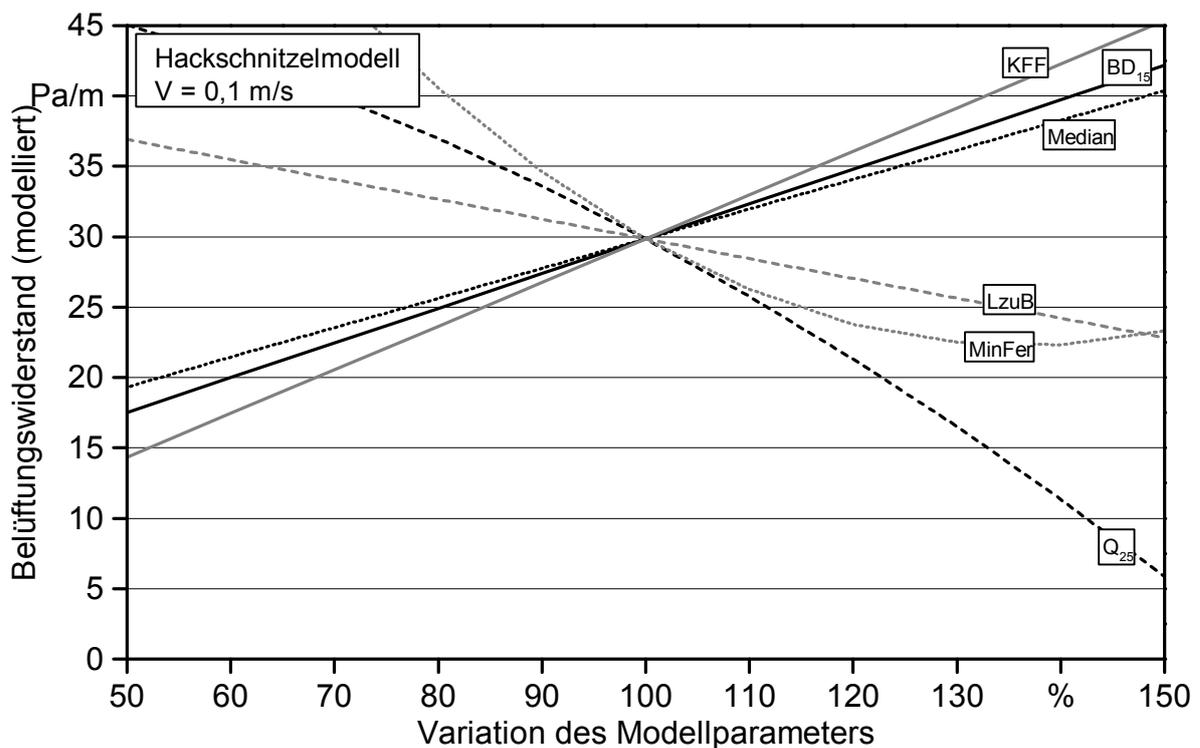


Abbildung 94: Sensitivitätsanalyse des wissenschaftlichen Hackschnitzel-Modells

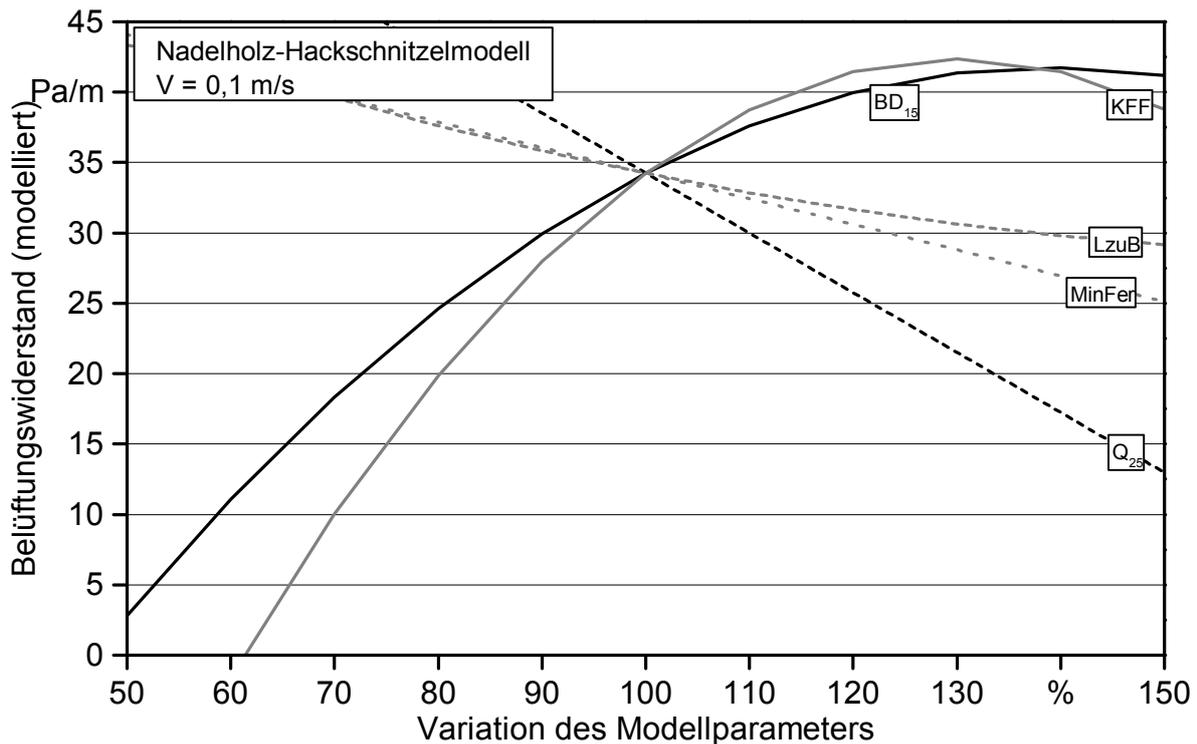


Abbildung 95: Sensitivitätsanalyse des wissenschaftlichen Nadelholz-Hackschnitzel-Modells

Ein hoher Kornformfaktor repräsentiert eine hohe Abweichung der Partikelform von einem perfekt runden Körper (Abschnitt 5.2.4.7). Eine Zunahme des *KFF* bedeutet daher eine rauere Oberflächenstruktur, die zu einer Erhöhung der Luftturbulenzen innerhalb der Schüttung und damit zu einer zusätzliche Barriere für die Belüftungsluft führen kann. Ein hoher Wert für *Q₂₅* bedeutet eine geringe Menge feiner Partikel, wodurch die Luftzwischenräume weniger stark gefüllt sind. Folglich sinkt ΔP bei einem hohen *Q₂₅*. Auch hohe Werte für das Länge-zu-Breite-Verhältnis (*LzuB*) und große Partikeldurchmesser (*MinFer*) führen zu einer Vergrößerung der Luftporen im Haufwerk und damit zu einer Verminderung von ΔP .

Insgesamt hatten die Schüttdichte, der Kornformfaktor und das 25-%-Quartil den deutlichsten Einfluss auf den Belüftungswiderstand. Folglich ist ΔP minimal bei geringem Feinanteil, einer scharfkantigen Partikelform und einem geringen Eigengewicht der Brennstoffe.

Vereinfachtes Modell

Im Gegensatz zu den wissenschaftlichen Modellen zielen die vereinfachten Modelle auf eine gute Anwendbarkeit in der Praxis ab. Hackschnitzelproduzenten sollen mittels einfach messbarer Brennstoffparameter ΔP leicht abschätzen können. Hierfür wurden die Schüttdichte (*BD₁₅*), der Stauchfaktor (*SF*) und zwei Siebfraktionen ($< 3,15$ mm (*F_{<3}*) und > 16 mm (*F_{>16}*)) gewählt (Tabelle 78).

Hackschnitzel-Modell

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_a = & 112 + 4,19 \times BD_{15} - 29,4 \times SF - 9,5 \times F_{>16} - 0,01 \times BD_{15}^2 - 0,51 \times F_{<3}^2 \\ & + 0,03 \times F_{>16}^2 + 0,14 \times (BD_{15} \times F_{<3}) + 0,56 \times (SF \times F_{>16}) - 0,14 \times \\ & (F_{<3} \times F_{>16}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_b = & 3648 - 172 \times SF - 59,3 \times F_{>16} - 1,01 \times F_{<3}^2 + 0,22 \times F_{>16}^2 + 0,3 \times \\ & (BD_{15} \times F_{<3}) + 2,85 \times (SF \times F_{>16}) \end{aligned}$$

Nadelholz-Hackschnitzel-Modell

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_a = & 480 - 44,86 \times SF - 8,23 \times F_{>16} + 0,0025 \times BD_{15}^2 - 0,556 \times F_{<3}^2 \\ & + 0,170 \times (BD_{15} \times F_{<3}) + 0,835 \times (SF \times F_{>16}) - 0,248 \times (F_{<3} \times F_{>16}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ergun}_b = & 1755 - 22,2 \times F_{>16} + 0,095 \times BD_{15}^2 - 2,66 \times F_{<3}^2 - 2,136 \times (BD_{15} \times SF) \\ & - 0,15 \times (BD_{15} \times F_{>16}) + 11,5 \times (SF \times F_{<3}) + 4,78 \times (SF \times F_{>16}) \\ & - 0,847 \times (F_{<3} \times F_{>16}) \end{aligned}$$

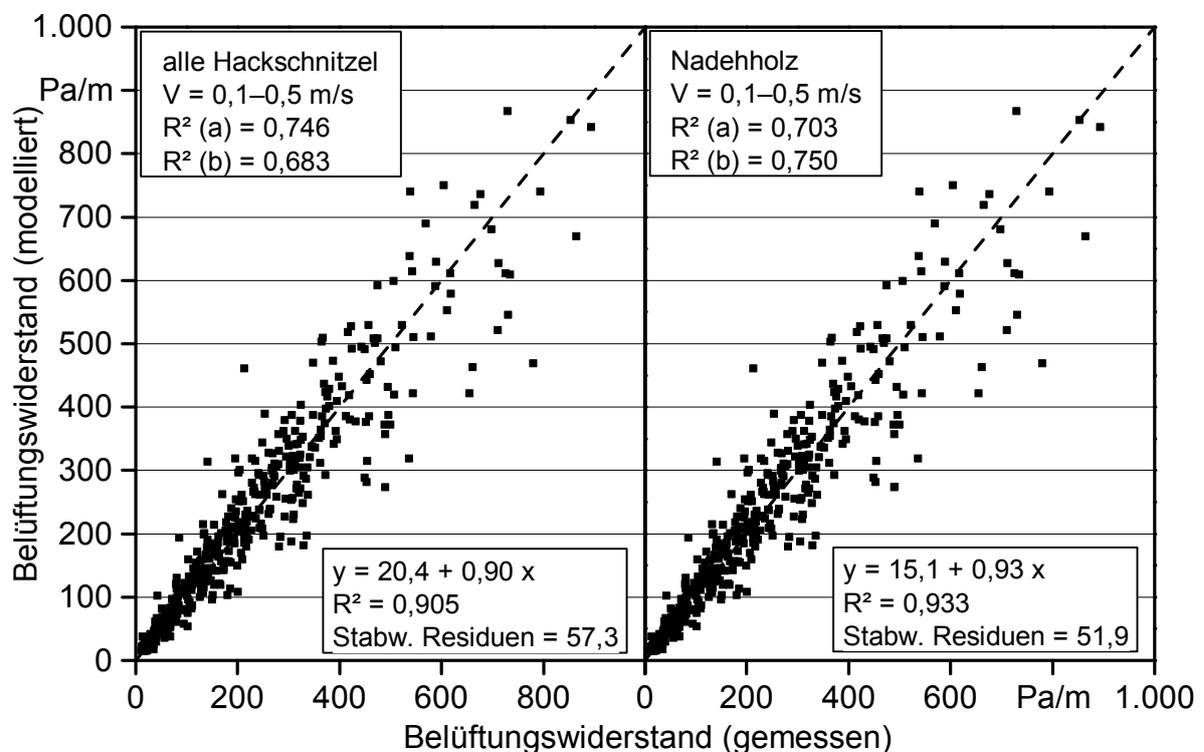


Abbildung 96: Vergleich des modellierten und des gemessenen Belüftungswiderstands für das vereinfachte Hackschnitzel- und Nadelholz-Hackschnitzel-Modell

Die vereinfachten Modelle hatten eine geringere Genauigkeit im Vergleich zu den wissenschaftliche Modellen (Abbildung 93, Abbildung 96).

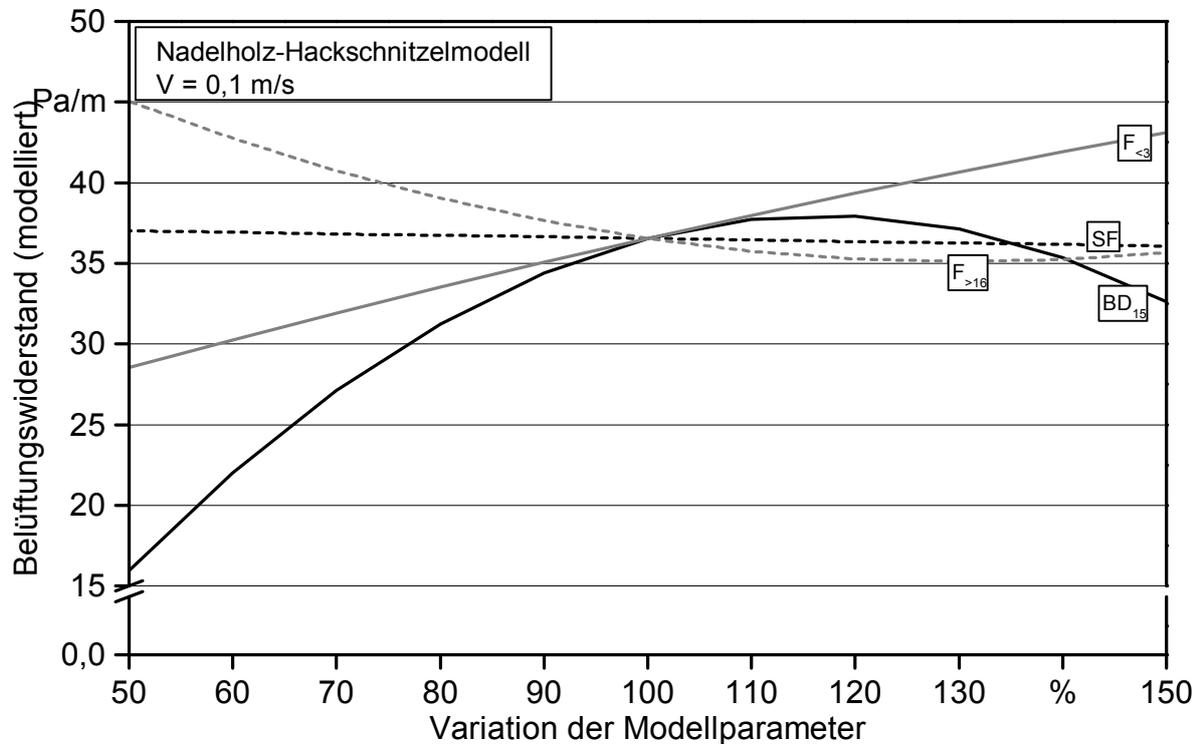


Abbildung 97: Sensitivitätsanalyse des vereinfachten Hackschnitzel-Modells

Wie schon bei den wissenschaftlichen Modellen konnte jedoch bei einer Beschränkung auf Hackschnitzelproben aus Nadelholz eine insgesamt höhere Genauigkeit erzielt werden. Die Standardabweichung der Residuen bei einer Belüftungsgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ war $\pm 9,2 \text{ Pa/m}$ (Hackschnitzel-Modell) bzw. $\pm 8,2 \text{ Pa/m}$ (Nadelholz-Hackschnitzel-Modell). Eine geringere Genauigkeit der vereinfachten Modelle im Vergleich zu den wissenschaftlichen Modellen wurde aufgrund der höheren Anwendbarkeit in der Praxis akzeptiert.

Die Sensitivitätsanalysen der vereinfachten Modelle bestätigen die Ergebnisse der wissenschaftlichen Modelle (Abbildung 97, Abbildung 98). Sowohl im vereinfachten Hackschnitzel- als auch im vereinfachten Nadelholz-Hackschnitzel-Modell führte eine Zunahme der Schüttdichte (BD_{15}) und der Siebfraktion $< 3,15 \text{ mm}$ ($F_{<3}$) zu steigenden Werten für ΔP . Höhere Werte für den Stauchfaktor (SF) und die Siebfraktion $> 16 \text{ mm}$ ($F_{>16}$) führten hingegen zu einer Abnahme von ΔP . Die Ergebnisse festigen die Hypothesen, dass eine Zunahme der Schüttdichte und feiner Partikelfractionen ($F_{<3}$) zu kleineren Luftzwischenräumen führt, wohingegen eine Zunahme von groben Partikeln ($F_{>16}$) eine Vergrößerung der Luftporen zur Folge hat.

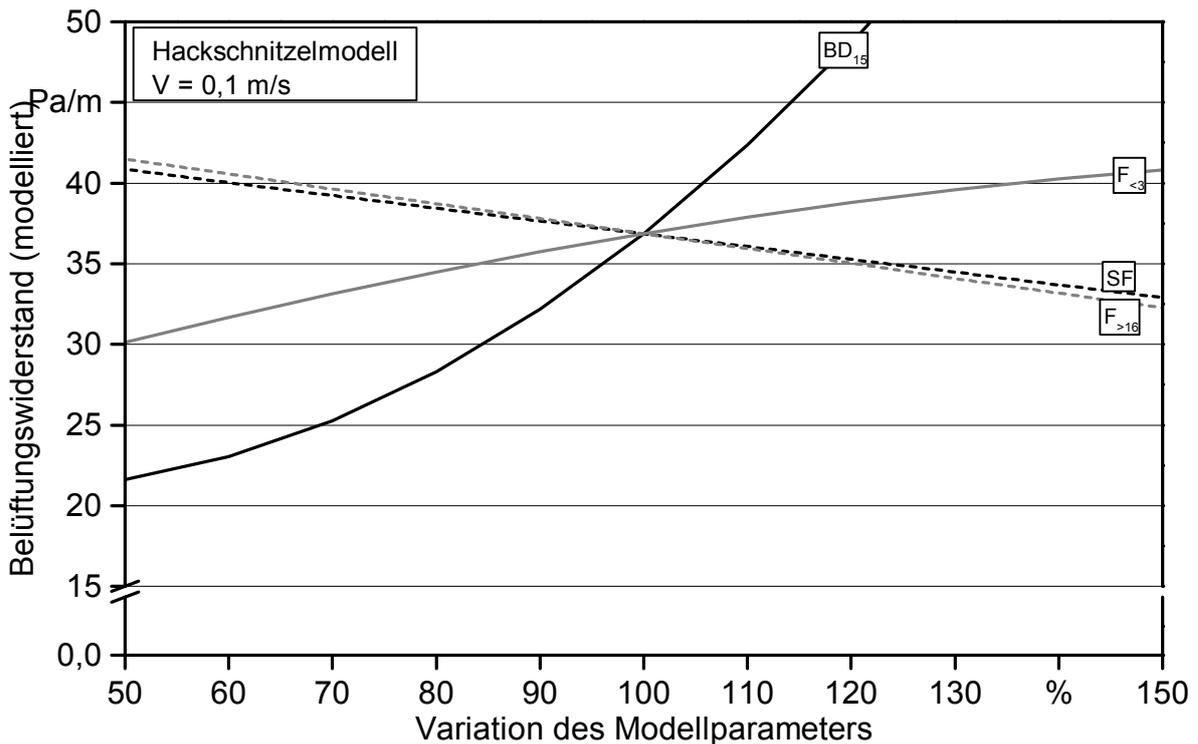


Abbildung 98: Sensitivitätsanalyse des vereinfachten Nadelholz-Hackschnitzel-Modells

7.4 Schlussfolgerung

Der Belüftungswiderstand bei der technischen Trocknung von Hackschnitzeln war höchst variabel und wurde sowohl durch das Rohmaterial, als auch durch die verwendeten Maschineneinstellungen beeinflusst. Alle aus den experimentellen Daten entwickelten Modelle deuten auf eine starke Abhängigkeit zwischen dem Belüftungswiderstand ΔP und Anzahl, Größe und Ausformung der Luftzwischenräume in der Schüttung hin. Große freie Luftporen erleichtern den Luftdurchtritt durch das Hackschnitzellager, wohingegen feine Poren mit großer Oberflächenrauigkeit den Luftstrom behindern. Die Luftporen waren dabei direkt von einer Vielzahl physikalischer Brennstoffeigenschaften abhängig.

Der hohe Einfluss des Kornformfaktors verdeutlichte, dass scharfkantige Hackschnitzel sich energieeffizienter belüften lassen als gerissene, raue Partikel. Ein hoher Anteil an Feinmaterial kann zudem zur Verstopfung von Lufträumen in der Schüttung und somit zu hohen Belüftungswiderständen führen. Auch ein hohes Eigengewicht der Brennstoffe übte sich negativ auf die Belüftung aus.

Die Interpretationen der Modelle konnten durch Beobachtungen aus den Praxisversuchen gestärkt werden (Abschnitt 7.3.1). Bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker führten die Verwendung von Sieben mit engen Lochgrößen sowie die Nutzung stumpfer Messer zu erhöhten Werten für ΔP . Aus Kapitel 5 ist bekannt, dass kleine Siebkörbe hohe Anteile an Feinmaterial und kleinen Partikeln bedingen. Stumpfe Messer erzeugen raue, gerissene Hackschnitzel und führen ebenso zu viel Feinmaterial. Bei den Feldversuchen zeigte sich vor allem bei den Proben aus KUP-Material ein geringer Belüftungswiderstand. Die untersuchten Proben wiesen alle einen geringen Anteil an Fein-

material auf ($Q_{25} > 24$ mm, $F_{<3} < 5$ Ma.-%). Die Optimierungsempfehlungen aus Kapitel 5 (physikalische Hackschnitzelqualität), z. B. die strikte Verwendung scharfer Messer bei der Produktion, sind demnach übertragbar für die energieeffiziente, technische Hackguttrocknung, die idealerweise an hochwertigen, scharfkantigen Hackschnitzeln mit wenig Feinmaterial durchgeführt wird.

Insgesamt ließ sich der Belüftungswiderstand gut mithilfe der Modelle abbilden. Die Ergebnisse werden helfen, die Gebläseleistung bei der technischen Trocknung energieeffizient auszulegen und die Bereitstellungskette der Hackschnitzelproduktion weiter zu optimieren.

8 Umrechnungsfaktoren und Schätzverfahren

FABIAN SCHULMEYER, DANIEL KUPTZ, KARL HÜTTL, HERBERT BORCHERT & HANS HARTMANN

Im Rahmen der Feldmessungen (Kapitel 4) und den stationären Hackversuchen am TFZ (Kapitel 5) wurden die Volumina des Hackholzes und die produzierten Mengen an Hackschnitzeln gemessen. Ziel der Untersuchung war die Evaluierung bestehender Methoden und die Ableitung praxistauglicher Schätzverfahren.

8.1 Stand des Wissens

8.1.1 Forst- und holzwirtschaftliche Maßeinheiten

In der Forst- und Holzwirtschaft wird eine Vielzahl von Einheiten verwendet [14][37].

Geerntetes **Stammholz** wird üblicherweise in **Festmetern ohne Rinde (Fm o. R.)** gemessen. Bei der forstlichen Stammholzvermessung wird der Mittendurchmesser bei der halben Stammlänge (ohne Berücksichtigung des Längenübermaßes) mit einer geeichten Messkluppe ermittelt. Bis 19 cm Durchmesser ohne Rinde genügt eine einfache Kluppung, darüber sind zwei zueinander senkrecht stehende Messungen (möglichst der kleinste und der größte Durchmesser) vorgesehen. Die gemessenen Werte werden auf ganze Zentimeter abgerundet, bei der zweifachen Messung werden die abgerundeten Werte gemittelt und ggf. erneut abgerundet. Anschließend wird ein pauschaler Rindenabzug vorgenommen. Zudem wird ein Längenübermaß von 1 % (bei Standardlängen: 10 cm) gewährt. Das System der Rundholzvermessung ist für stoffliche Sortimente entwickelt worden und zielt auf Derbholz ab. Aufgrund der relativ geringen Durchmesser von Hackholz und der Tatsache, dass die Derbholzgrenze bei der Aushaltung hier i. d. R. nicht berücksichtigt wird, ist es nicht sinnvoll, den Rindenabzug von 1 cm anzuwenden. Auch bei Energierundholz aus Derbholz ist die mehrfache Abrundung nicht sinnvoll, da das gesamte gehackte Holz inklusive Rinde ja auch der Verbrennung zugeführt wird, also für den Verwendungszweck des Sortiments geeignet ist.

Beim **Industrieholz** sowie Brennholz in Stammabschnitten zur Scheitholzproduktion („Brennholz lang“) und Energierundholz ist die Messung des Raummaßes in **Raummetern (Rm)** üblich. Ein Raummeter entspricht einem m³ aufgeschichtetem Holz, also inklusive aller Zwischenräume zwischen den Hölzern. Zur Umrechnung zwischen Fm und Rm sind die Faktoren $1 \text{ Rm} \triangleq 0,7 \text{ Fm o. R.}$ (für Holz in Rinde) und $1 \text{ Rm} \triangleq 0,8 \text{ Fm o. R.}$ (für entrindetes Holz) üblich [28]. Tatsächlich können je nach Holzart, Dimensionen und Krümmung erhebliche Schwankungen auftreten. Beim Raummeter gibt es keinen Rindenabzug. Beim Aufmessen der Polter wird jedoch ein Übermaß von 4 % gewährt [37]. Das Raummaß wird aus Länge und Tiefe des Polters und der mittleren Höhe ermittelt. Die Länge wird an der Basis der Stirnseite gemessen. Die Tiefe ergibt sich aus den Sortierungskriterien, die zumindest beim Industrieholz i. d. R. eine feste Längenaushaltung vorsehen. Die mittlere Höhe wird im **Sektionsverfahren** bestimmt. Dazu wird die Stirnseite des Polters in gleich lange Abschnitte unterteilt. Die Länge der Abschnitte („Sektionen“) ist abhängig von der Gesamtlänge des Polters. Die Höhe in der Mitte jedes Ab-

schnitts wird gemessen und aus diesen Messwerten die mittlere Höhe des Polters errechnet [14] [37].

Hackholz zur Erzeugung von Hackschnitzeln kann in Raummeter oder in **Schüttraummeter (Srm)** erzeugter Hackschnitzel abgerechnet werden. Die Abrechnung nach Schüttraummeter hat den Vorteil, dass die großen Schwankungen beim Holzinhalt vor allem der Waldrestholz-Polter ausgeblendet werden. Werden **Hackschnitzel** verkauft, kann ebenfalls in Srm (i. d. R. unter Angabe weiterer Qualitätsparameter) oder nach **Masse** bei gegebenem Wassergehalt (**Tonne lufttrocken, t_{lutro} , oder Tonne absolut trocken, t_{atro}**) abgerechnet werden. Letzteres bietet sich in der Praxis an, da diese Abrechnung Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Schüttdichten und Wassergehalte im Schüttgut ausschließt. Die Abrechnung nach enthaltener **Wärmemenge (kWh)** kommt seltener zum Einsatz.

8.1.2 Schätzverfahren für zu erwartende Hackschnitzelmengen

In der Praxis werden verschiedene Umrechnungs- und Schätzverfahren verwendet, um die zu erwartenden Mengen in Srm Waldhackschnitzel pro Rm Hackholz-Poltervolumen oder pro zu hackender Krone abschätzen zu können. Ebenso kann das Aufkommen an Waldhackschnitzeln über das Stammholzaufkommen eines Hiebs angeschätzt werden.

Aus dem Kreis der Forstleute und der Hackerunternehmer wurde wiederholt die Ungenauigkeit der üblichen Schätzverfahren bemängelt, was die Disposition der Maschinen und Fahrzeuge erschwert. Zudem wird ein möglichst treffendes Kontrollmaß bei der Abrechnung in Schüttraummeter benötigt. Von mehreren Praktikern war zu erfahren, dass sich auf lange Sicht die Ergebnisse zwar ausgleichen, im Einzelfall jedoch Abweichungen um bis zu 100 % nicht selten sind.

Schätzung anhand des vorangegangenen Hiebs

Aus der angefallenen Menge stofflicher Sortimente eines Hiebs kann überschlägig der sich ergebende Anfall an Hackschnitzeln aus Gipfelmateriale angeschätzt werden. Im bayerischen Staatswald wird als Faustregel verwendet, dass je Fm Stammholz mit 0,3 bis 0,6 Srm Hackschnitzeln (zusätzlich zum Stammholz) zu rechnen ist [11]. Nach aktueller Einschätzung des Zentrums für Energieholz der BaySF bewegt sich der Wert in Altdurchforstungen und Verjüngungsnutzungen in der Fichte (Zopf der stofflichen Sortimente: 12 bis 14 cm) zwischen 0,25 und 0,33 Srm [209].

Schätzung anhand der Durchmesser und Anzahl der Kronen

Eine weitere Variante bei geringem Mengenanfall ist das Zählen der ungehackten Kronen. Je nachdem bis zu welchem Durchmesser stoffliche Sortimente ausgehalten werden, variiert der Hackschnitzelanfall pro Krone [201]. Für Kronenfußdurchmesser von 10 cm werden rund 0,1 Srm Hackschnitzel je Krone erwartet, für 20 cm fallen rund 0,75 Srm je Krone an. Im bayerischen Staatswald wird davon ausgegangen, dass bei

einem Kronenfußdurchmesser von 12 bis 14 cm mit rund 0,3 Srm je Krone zu rechnen ist, bei einem Kronenfußdurchmesser größer 14 cm mit rund 0,6 Srm je Krone [11].

Schätzung anhand des Poltervolumens

Um anhand des Poltervolumens auf die zu erwartende Hackschnitzelmenge schließen zu können, muss im ersten Schritt das Hackholzpolter aufgemessen oder das Volumen in Raummetern (Rm) geschätzt werden. Für Industrieholz und „Brennholz lang“ ist das Raummaß die übliche Verkaufseinheit und relativ genau im Sektionsverfahren zu bestimmen (Abschnitt 8.1.1). In der Praxis wird dieses Verfahren auch bei Hackholzpoltern verwendet. Allerdings gibt es vor allem bei Waldrestholz i. d. R. keine fixen Längen, weshalb die Tiefe des Polters zusätzlich gemessen werden muss. Durch die Heterogenität der Hölzer können sich Hackholzpolter nach hinten sowohl in der Höhe als auch der Breite mehr oder weniger stark verändern. Auch ist die Bestimmung der einzelnen Strecken schwieriger als bei Industrieholzpoltern.

Aus dem Poltervolumen wird im zweiten Schritt mittels eines Umrechnungsfaktors die sich ergebende Hackschnitzelmenge in Schüttraummetern (Srm) berechnet. Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Maßeinheiten finden sich z. B. in der früheren österreichischen Norm ÖNORM M 7132 [158]. Diese sind jedoch nicht baumartenspezifisch und die verwendeten Begriffe sind nicht näher definiert. Für Waldhackgut der Klasse G30 ist der Faktor 0,4 Fm/Srm angegeben. Setzt man diesen Wert zu den Angaben zum Festgehalt von „Rollen, Scheiter und Prügel 1 m lang, geschichtet“ mit 0,7 Fm/Rm bzw. „Knüppel, Äste, Reisig geschichtet“ mit 0,35 Fm/Rm in Beziehung, ergeben sich je nach Ausgangsmaterial Umrechnungsfaktoren von 1,75 Srm/Rm bzw. 0,88 Srm/Rm.

Unter Auswertung der Betriebserfahrung der Raurica Waldholz AG wurden in der Schweiz praxisübliche Schätzverfahren untersucht [126]. Die Polterform wird als Quader verstanden und mit verschiedenen Korrekturfaktoren getestet. Dazu wurden 23 vermessene Hackholzpolter den Werkseingangsmeldungen zu den erzeugten Hackschnitzelmengen gegenübergestellt. Als geeigneter Korrekturfaktor des Quadervolumens bei Poltern bis 200 Rm Volumen wird 0,6 angegeben, für größere Polter 0,4. Zudem wird eine komplexere Formel abgeleitet, bei der die Anteile an Nadel- bzw. Laubholz und an Derbholz bzw. Reisig berücksichtigt werden. Diese wird als recht treffend (Abweichungen unter 10 %) bezeichnet. Allerdings müssen die Nadel- und Laubholzanteile bzw. der Derbholzanteil auch entsprechend genau geschätzt werden.

Für den bayerischen Staatswald wird ein vereinfachtes Schätzverfahren empfohlen. Das Raummaß wird ebenfalls über die Quaderformel ermittelt, allerdings wird nicht die Höhe der Stirnseite gemessen, sondern die mittlere Höhe des Polters geschätzt. Das Poltervolumen wird mit dem Faktor $1 \text{ Rm} \cong 0,6 \text{ Srm}$ auf das zu erwartende Hackschnitzelvolumen umgerechnet. Bei einem hohen Stammholzanteil und einem mittleren Zopfdurchmesser über 15 cm soll bei dieser Methode ein höherer, bei hohem Reisiganteil und einem Zopfdurchmesser unter 12 cm ein geringerer Faktor angesetzt werden [11].

Schätzung anhand des reinen Holzvolumens

Alternativ zur Schätzung am Polter kann das anfallende Volumen an Hackschnitzeln direkt über das reine Holzvolumen abgeschätzt werden. Dies kann jedoch ausschließlich für Energierundholz angewendet werden, da hier das tatsächliche Holzvolumen relativ leicht gemessen werden kann. Dabei werden in der Literatur recht einheitliche Umrechnungsfaktoren angegeben. Die meisten Publikationen verwenden einen Umrechnungsfaktor von 2,5 Srm/Fm, der erstmals in der ehemaligen ÖNorm M7132 [158] angegeben wurde. Die ÖNorm M7132 gibt sogar zwei Umrechnungsfaktoren an, wobei gezielt auf die Partikelgrößenverteilung der Hackschnitzel eingegangen wird. Demnach sollte für feines Hackgut, bei dem die freien Luftzwischenräume im Schüttgut minimiert sind und das somit stärker verdichtet ist, ein geringerer Faktor verwendet werden (G30: 2,5 Srm/Fm) als bei groben Hackschnitzeln (G50: 3,0 Srm/Fm). Inwieweit Unterschiede in den Umrechnungsfaktoren dabei direkt von rohstoff- und produktionsbedingten Einflüssen abhängen, wurde bisher nicht untersucht. Eine große Unsicherheit liegt zudem in der Berechnung des tatsächlichen Holzvolumens. Das Volumen wird dabei mal als „Fm“, als „Fm o. R.“ oder als „m³“ angegeben (Unterkapitel 8.1).

Freie Schätzung

Neben den beschriebenen Schätzverfahren wird von Praktikern auch immer wieder von einer freien Schätzung aufgrund von Erfahrungswerten berichtet. Diese Schätzungen sind individuell sehr verschieden und auch oft von den Anwendern nicht näher definierbar. Sie können daher auch nicht bewertet werden.

8.2 Material und Methoden

8.2.1 Charakterisierung der Hackholzpolter

Bei den Feldmessungen wurden die Hackholzpolter nach Poltertyp und Baumarten analog zu Abschnitt 4.2.4 eingeteilt. Die Erfassung erfolgte optisch am Polter und wurde durch Befragung der Einsatzleiter ergänzt. Für die Ermittlung von Umrechnungsfaktoren und Schätzverfahren wurden Polter der Typen „Waldrestholz“ und „Energierundholz“ betrachtet.

8.2.2 Volumenermittlung

Zur weiteren Analyse und zur Ableitung von Umrechnungsfaktoren wurden bei den Hackereinsätzen im Wald und bei den stationären Versuchen die Volumina des Hackholzes und der daraus produzierten Hackschnitzel ermittelt.

8.2.2.1 Messungen bei den Hackereinsätzen im Wald

Bei den Hackereinsätzen im Wald wurden die Hackholzpolter komplett vermessen. Dazu wurden Maßbänder, Fluchtstäbe und Teleskopmessstangen eingesetzt. Gemessen wurden an Stirnseite und Rückseite die Basislänge, die obere Länge und die Höhe sowie die linksseitige und rechtsseitige Tiefe. Bei einem Teil der Polter wurde die mittlere Höhe im Sektionsverfahren bestimmt (Abschnitt 8.1.1 und Abbildung 99A). Ziel war es, möglichst umfassende Daten zu den einzelnen Poltern zu gewinnen, um die Polterform mit verschiedenen geometrischen Funktionen beschreiben zu können.



Abbildung 99: Unterteilung der Stirnseite eines Waldrestholzpolters zur Ermittlung der mittleren Höhe im Sektionsverfahren (A) (die vertikalen Striche unterteilen das Polter in 1 m breite Abschnitte) und Vermessung der Kronenfüße mit Hilfe eines Holzrahmens mit 1 × 1 m Seitenlänge (B)

Anhand verschiedener Polter wurden geometrische Formen ausgewählt, welche die Polterform möglichst treffend beschreiben sollen. In der folgenden Analyse wurden Zusammenhänge zwischen den Formen und den daraus erzeugten Hackschnitzelmengen untersucht.

Die an der Stirnseite der Hackholzpolter sichtbaren Kronenfüße wurden nach Stückzahl, Baumart und Durchmesser (cm) erfasst. Bei kleineren Poltern erfolgte dies als Vollaufnahme. Bei größeren Poltern wurde ein 1 × 1 m großer Holzrahmen zur Messung von Stichproben eingesetzt. Dieser wurde an mehreren, als repräsentativ eingeschätzten Stellen an die Polterstirnseite gehalten und alle darin befindlichen Kronenfüße aufgenommen (Abbildung 99B). Ziel war die Erfassung von mindestens 20 % der Stirnfläche. Aus diesen Daten wurden neben der genaueren Baumartenzusammensetzung der mittlere Durchmesser der Kronenfüße sowie als Maß für den Festgehalt der Prozentanteil der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche ermittelt.

8.2.2.2 Geometrische Formen zur Beschreibung des Poltervolumens

Zur Beschreibung der Polterform wurden sechs geometrische Körper verwendet (Tabelle 79). Eine grafische Gegenüberstellung der Formen gibt Abbildung 100.

Tabelle 79: Zur Beschreibung der Hackholzpolter verwendete geometrische Körper und notwendige Eingangsgrößen

Bezeichnung	Beschreibung	Eingangsgrößen
Quader V_{Qu}	Quader mit Höhe der Stirnseite	- Basislänge Stirnseite (l_{BSs}) - Höhe Stirnseite (h_{Ss}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r)
Quader (Sektionsverfahren) V_{QS}	Quader mit mittlerer Höhe der Stirnseite aus Sektionsverfahren	- Basislänge Stirnseite (l_{BSs}) - mittlere Höhe Stirnseite aus Sektionsverfahren (h_{SkSs}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r)
Prisma V_{Pr}	Gerades, vierseitiges Prisma mit Trapez als Grundfläche	- Basislänge Stirnseite (l_{BSs}) - obere Länge Stirnseite (l_{OSs}) - Höhe Stirnseite (h_{Ss}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r)
Pyramidenstumpf V_{PSt}	Pyramidenstumpf mit Trapez als Grund- und Deckfläche	Wie V_{Pr} , zusätzlich: - Basislänge Rückseite (l_{BRs}) - obere Länge Rückseite (l_{ORs}) - Höhe Rückseite (h_{Rs})
Zylinder V_{Zy}	Liegender, gerader Zylinder mit einer halbierten Ellipse als Grundfläche	- Basislänge Stirnseite (l_{BSs}) - Höhe Stirnseite (h_{Ss}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r)
Halbierter Kegelstumpf V_{hKSt}	Liegender halbiertes gerader Ellipsenkegelstumpf	Wie V_{Zy} , zusätzlich: - Basislänge Rückseite (l_{BRs}) - Höhe Rückseite (h_{Rs})

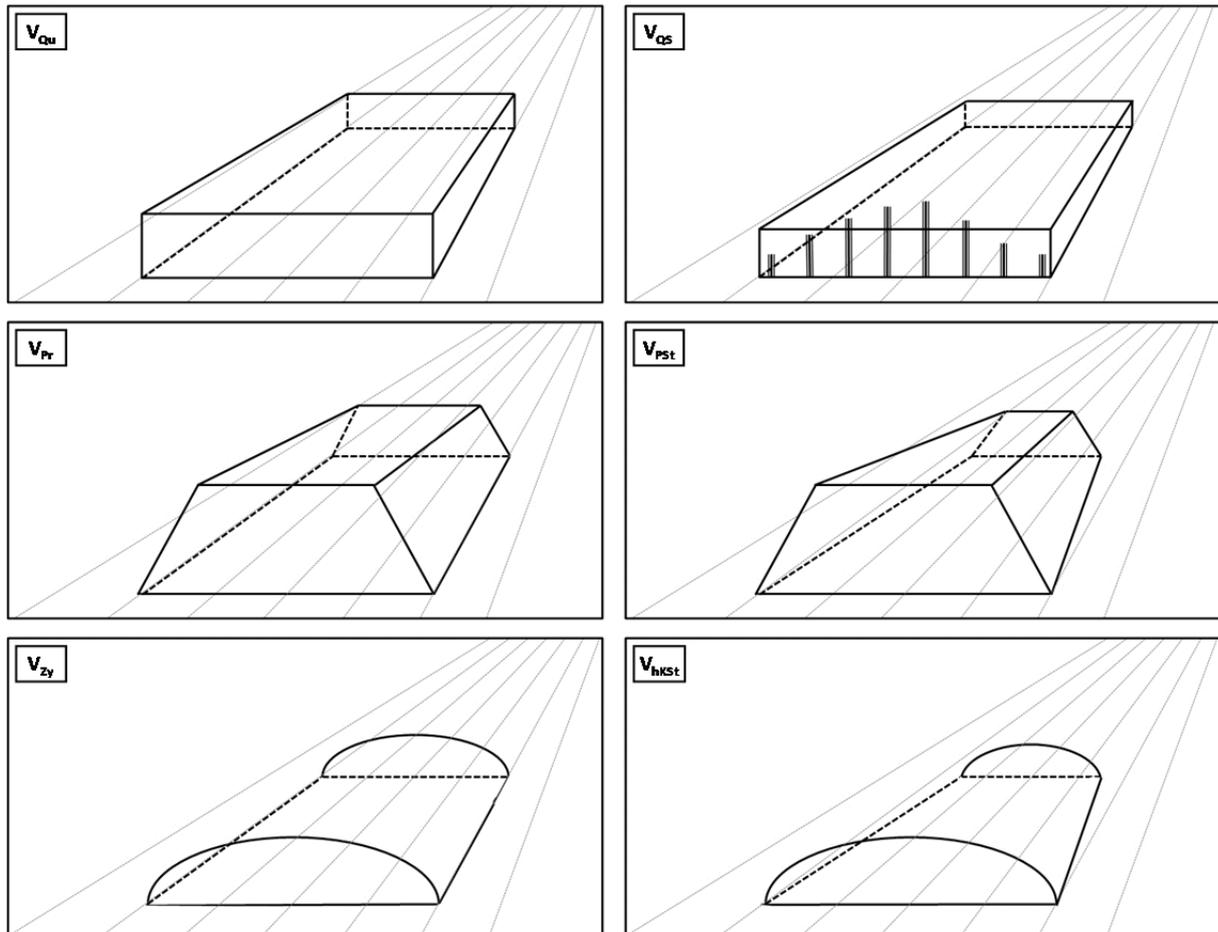


Abbildung 100: Übersicht über die zur Beschreibung der Polterform verwendeten geometrischen Formen (von links oben nach rechts unten: Quader, Quader mit mittlerer Höhe aus Sektionsverfahren, Prisma, Pyramidenstumpf, Zylinder, halbierter Kegelstumpf)

Quader

Der Quader ist die einfachste verwendete Form. Sein Volumen V_{Qu} wird nach Formel [9-1] berechnet.

$$V_{Qu} = l_{BSS} \times h_{SS} \times \frac{t_l + t_r}{2} \quad \text{Formel [9-1]}$$

Quader (Sektionsverfahren)

Um der Form der Stirnseite besser gerecht zu werden, kann die Höhe h_{SS} in der Quaderformel (Formel [9-1]) durch die mittlere Höhe nach Sektionsverfahren h_{SkSS} ersetzt werden (Formel [9-2]).

$$V_{QS} = l_{BSS} \times h_{SkSS} \times \frac{t_l + t_r}{2} \quad \text{Formel [9-2]}$$

Prisma

Ein gerades Prisma entsteht durch Parallelverschiebung der Deckfläche senkrecht zur Grundfläche. Grundfläche (beim Polter: Stirnseite) und Deckfläche (beim Polter: Rückseite) sind also deckungsgleich. Die Grundfläche wird als Trapez erfasst. Ein Trapez ist ein Viereck mit zwei parallel zueinander liegenden Seiten. Das Volumen des Prismas V_{Pr} ist dann das Produkt aus der Fläche der Stirnseite und der mittleren Tiefe des Polters (Formel [9-3]).

$$V_{Pr} = \frac{l_{BSs} + l_{OSs}}{2} \times h_{SS} \times \frac{t_l + t_r}{2} \quad \text{Formel [9-3]}$$

Pyramidenstumpf

Die Grundfläche einer Pyramide ist ein Vieleck. Bei der Polterbetrachtung handelt es sich dabei (wie auch beim Prisma) um ein Trapez mit der Fläche A_{SS} . Von den Ecken der Grundfläche ausgehende Kanten laufen in der Spitze der Pyramide zusammen. Wird die Pyramide parallel zur Grundfläche geschnitten, entsteht ein Pyramidenstumpf. Im Vergleich zum Prisma wird die Beschreibung der Polterform genauer, da auch die Fläche der Rückseite A_{RS} des Polters einfließt. Das Volumen des Pyramidenstumpfs V_{PSt} errechnet sich nach Formel [9-4].

$$V_{PSt} = \frac{t_l + t_r}{3} \times \left(A_{SS} + \sqrt{A_{SS} \times A_{RS}} + A_{RS} \right) \quad \text{Formel [9-4]}$$

Zylinder

Das Polter wird als liegender, gerader Zylinder beschrieben. Die Grundfläche (Stirnseite des Polters) wird als halbierte Ellipse berechnet. Das Volumen V_{Zy} ist dann das Produkt aus der Stirnseitenfläche und der Höhe des Zylinders, also der mittleren Tiefe des Polters (Formel [9-5]).

$$V_{Zy} = \frac{\pi \times \frac{l_{BSs}}{2} \times h_{SS}}{2} \times \frac{t_l + t_r}{2} \quad \text{Formel [9-5]}$$

Halbierter Kegelstumpf

In dieser Betrachtung wird das Polter als halbiertes, liegendes Stumpf eines geraden Ellipsenkegels verstanden. Die Flächeninhalte der Stirn- und Rückseite (A_{SS} bzw. A_{RS}) werden analog zum Zylinder als halbierte Ellipsen berechnet. Das Volumen des Ellipsenkegelstumpfs wird analog zu Formel [9-4] auf Grundlage der Flächeninhalte und der Höhe (also der mittleren Tiefe) ermittelt (Formel [9-6]).

$$V_{hKSt} = \frac{t_l + t_r}{3} \times (A_{Ss} + \sqrt{A_{Ss} \times A_{Rs}} + A_{Rs}) \quad \text{Formel [9-6]}$$

Die beschriebenen geometrischen Formeln wurden auf die vermessenen Polter angewendet. Als Beispiel ist in Abbildung 101 ein Waldrestholzpolter mit den Formen Pyramidenstumpf und halbiertes Kegelstumpf belegt.

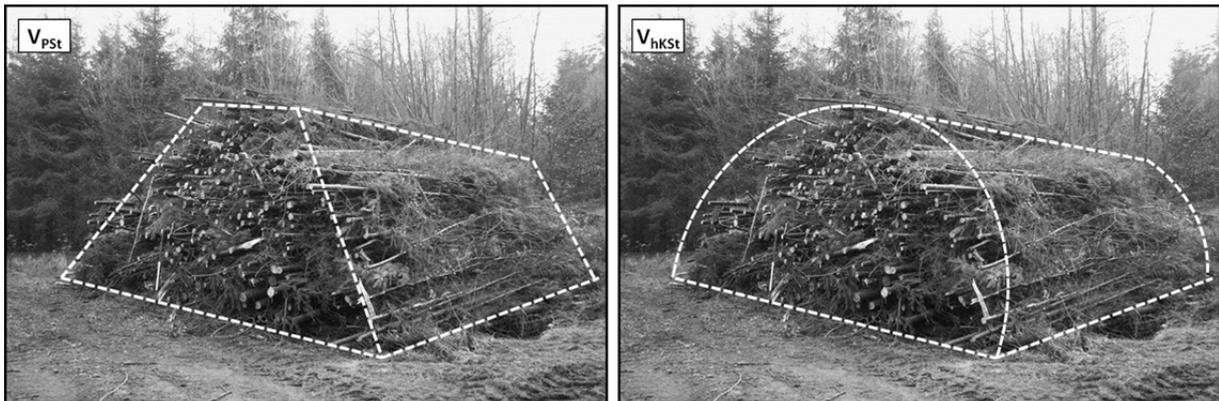


Abbildung 101: Beispielhafte Belegung eines Hackholzpolters (Waldrestholz) mit den geometrischen Formen Pyramidenstumpf (V_{PSt}) und halbiertes Kegelstumpf (V_{hKSt}).

8.2.2.3 Volumenmessung bei den stationären Hackversuchen am TFZ

Für die stationären Hackversuche mit dem elektrischen Trommelhacker am TFZ wurde das tatsächliche Volumen des Hackholzes (V in m^3) von Hand vermessen (Abschnitt 6.2.1). Hierzu wurden von jedem zu hackenden Stamm der obere und untere Durchmesser (D und d in mm) mithilfe einer elektrischen Schieblehre (Messschieber 412810 150, Horex) sowie die Länge (l in mm) mit einem Maßband (Loggers Tape JA, Spencer) bestimmt. Das Volumen ergibt sich dabei aus Formel [9-7]:

$$V = \frac{\pi}{4} \times \frac{(D^2 + d^2)}{2} \times l \quad \text{Formel [9-7]}$$

Für die Versuche mit den zapfwellenbetriebenen Hackern (Abschnitt 6.2.1) wurde das Volumen als Zylinder über den Mittendurchmesser und die Länge der Stämme berechnet (Formel [9-8]). Der Mittendurchmesser (D_M) wurde mithilfe einer elektronischen Messkluppe (Masser Excaliper, Savcor IT GmbH) auf mm genau gemessen. Die Länge wurde erneut mithilfe des Maßbands bestimmt.

$$V = \frac{\pi}{4} D_M^2 \times l$$

Formel [9-8]

Die Bestimmung aller Stammdurchmesser erfolgte jeweils durch zwei Messungen, wobei die Kluppe/Schieblehre bei der zweiten Messung im 90°-Winkel zur Erstmessung ange-setzt wurde.

Das Volumen der Stämme wurde in m³ mit Rinde berechnet (m³ m. R.). Weiterhin wurde der Erntefestmeter mit Rinde (Efm m. R.) durch Abrunden der Durchmesser und der Erntefestmeter ohne Rinde (Efm o. R.) durch den zusätzlichen Abzug der Rinde vom Durchmesser berechnet (siehe auch Abschnitt 8.1.1).

Neben dem tatsächlichen Holzvolumen wurde für die Versuche mit den zapfwellenbe-triebenen Hackern der Raummeter der Einzelchargen bestimmt. Hierzu wurden die Stämme in Rungengestelle (Innenabmessung: 1,5 × 1,5 × 1,5 m) überführt. Die sich er-gebende Füllhöhe im Gestell wurde mittels eines Meterstabs gemessen. Das Volumen an Raummeterern ergab sich somit aus der Breite des Rungengestells (1,5 m) × Länge der Stämme (Fichte: 3 m, Buche: 4 m) × Füllhöhe.

Analog zu den Feldmessungen wurde die Packungsdichte des Raummeters über den Festgehalt abgeschätzt. Dieser berechnet sich bei den stationären Versuchen über den gesamten Anteil aller Stammfußflächen im Verhältnis zur Polterstirnfläche, d. h. zur Brei-te des Rungengestells × Füllhöhe. Für die Abschätzung wurden die Durchmesser aller Stämme einzeln mithilfe der elektronischen Messkluppe gemessen.

8.2.2.4 Volumenmessung der produzierten Hackschnitzel

Alle aufgenommenen Volumina der ungehackten Rohmaterialien wurden mit den zuge-hörigen Mengen an Hackschnitzeln (V_{Srm} in Srm) ins Verhältnis gesetzt. Das Schüttgut-volumen V_{Srm} wurde bei den Feldmessungen über das Fassungsvermögen des Contai-ners abzüglich des Leervolumens nach dem Befüllen ermittelt. Das Fassungsvermögen wurde dabei von den Typenschildern auf den Containern abgelesen. Für das Leervolu-men nach dem Befüllen wurden die Hackschnitzel im Container zunächst mittels Mais-gabel und Rechen nivelliert, anschließend wurde das verbleibende Leervolumen als Quader mit Maßband und Meterstab gemessen (Abschnitt 4.2.5). Zur Verprobung und Komplettierung des Datensatzes wurden die von den Einsatzleitern und den Maschinen-führern vor bzw. nach dem Hacken geschätzten Hackschnitzelmengen abgefragt.

Im Fall der Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker wurde das gehackte Material unter Zuhilfenahme eines Lastenkrans aus einem Big Bag zunächst in Holzkisten (1600 × 390 × 790 mm bzw. 1310 × 950 × 1050 mm) überführt. Das Schüttgut wurde anschließend mittels eines Kantholzes nivelliert. Das verbleibende Leervolumen wurde mittels eines Meterstabs bestimmt (Abschnitt 6.2.3).

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Schätzverfahren und Umrechnungsfaktoren aus den Feldversuchen

8.3.1.1 Geometrische Formen zur Beschreibung des Poltervolumens

Insgesamt wurden umfangreiche Messungen an 101 Hackholzpoltern im Wald durchgeführt (Tabelle 80). Für alle 101 Polter war die Berechnung als Prisma (V_{Pr}), als Zylinder (V_{Zy}) und als Quader (V_{Qu}) möglich. Für 72 Polter konnte die Rückseite vermessen und so die Volumenberechnung als Pyramidenstumpf (V_{PSt}) und als halbiertes Kegestumpf (V_{hKSt}) durchgeführt werden. Die Bestimmung der mittleren Höhe der Stirnseite im Sektionsverfahren als Eingangsgröße für das Quadervolumen (V_{QS}) wurde bei 19 Poltern durchgeführt. Eine Erfassung der mittleren Höhe der Rückseite im Sektionsverfahren konnte nicht sinnvoll durchgeführt werden.

Tabelle 80: Geometrische Formen zur Beschreibung der Polterform und Anzahl der Polter, für die die entsprechenden Eingangsgrößen ermittelt wurden

Bezeichnung		Anzahl Polter		
		Waldrestholz	Energierundholz	Gesamt
Quader	V_{Qu}	70	31	101
Quader (Sektionsverfahren)	V_{QS}	9	10	19
Prisma	V_{Pr}	70	31	101
Pyramidenstumpf	V_{PSt}	41	31	72
Zylinder	V_{Zy}	70	31	101
Halbierter Kegelstumpf	V_{hKSt}	41	31	72

8.3.1.2 Beziehungen zwischen den geometrischen Körpern

Bei den Hackereinsätzen wurde festgestellt, dass die vorgefundenen Hackholzpolter sehr heterogene Ausformungen hatten. Am ehesten zur Beschreibung des tatsächlichen Poltervolumens geeignet erschien in der Mehrzahl der Fälle der Pyramidenstumpf. In diese Formel gehen auch die meisten der gemessenen Größen ein. Der Pyramidenstumpf kann daher als diejenige Form bezeichnet werden, die die reale Form der Polter am besten abbildet. Allerdings führen die notwendigen umfangreichen Messungen in der Praxis zu einem unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand. Um zu prüfen, ob eine der einfacheren Formeln mit hinreichender Verlässlichkeit zur Ermittlung des Poltervolumens verwendet werden kann, werden die berechneten Volumina im Verhältnis zum Volumen des Pyramidenstumpfs V_{PSt} betrachtet, wobei $V_{PSt} = 1,0$ gesetzt wird (Abbildung 102).

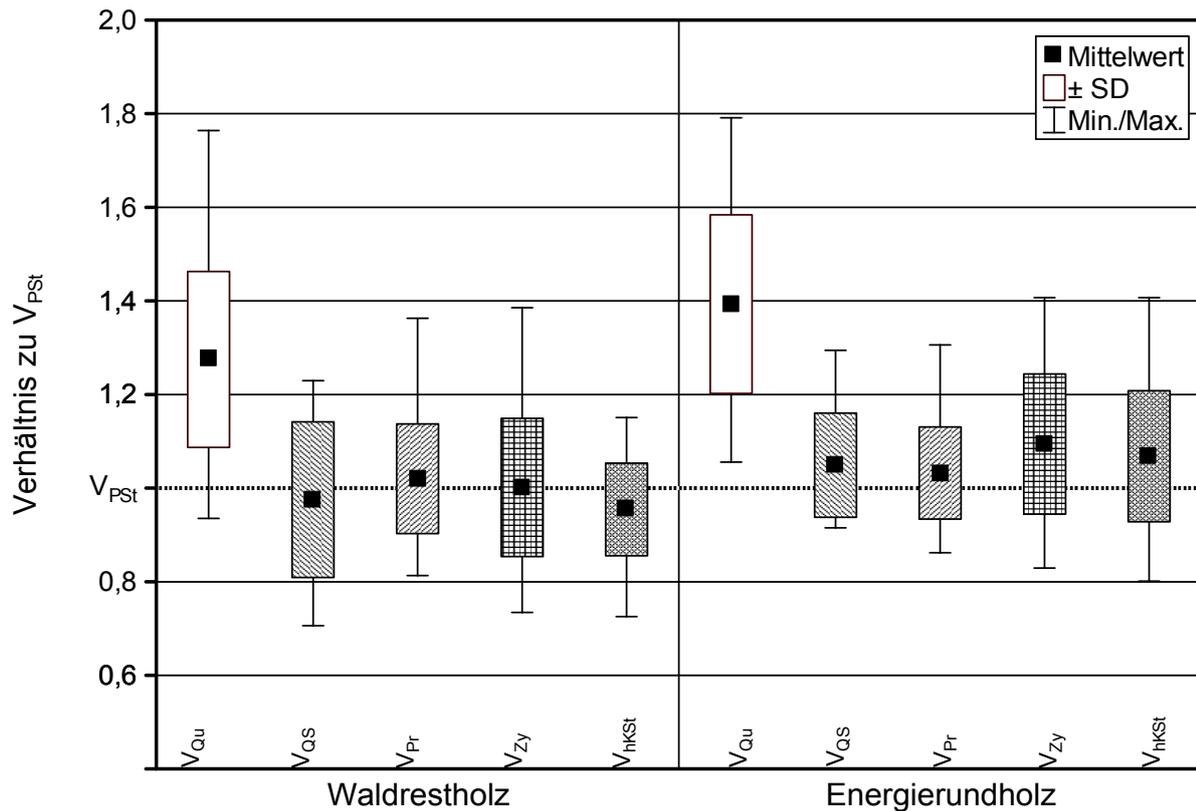


Abbildung 102: Übersicht der Verhältnisse der Volumina der geometrischen Formen zum Volumen des Pyramidenstumpfs ($V_{Pst} = 1,0$)

Erwartungsgemäß liegt der Mittelwert beim einfachen Quader am weitesten vom Bezugswert entfernt (Tabelle 81).

Tabelle 81: Verhältnisse der Volumina der geometrischen Formen zum Volumen des Pyramidenstumpfs ($V_{Pst} = 1,0$)

		V_{Qu}	V_{QS}	V_{Pr}	V_{Zy}	V_{hkSt}
Wrh	Mittelwert	1,28	0,98	1,02	1,00	0,95
	Standardabweichung	0,19	0,17	0,12	0,15	0,10
Er	Mittelwert	1,39	1,05	1,03	1,09	1,07
	Standardabweichung	0,19	0,11	0,10	0,15	0,14

Es wird deutlich, dass eine größere Anzahl gemessener Größen, die in die Formeln einfließen, zu einer stärkeren Annäherung an das Volumen des Pyramidenstumpfs führt. Messungen an der Rückseite des Polters fließen in die Formeln von V_{Pst} und V_{hkSt} ein. Sie erlauben eine Berücksichtigung der Veränderung in Breite und Höhe im Vergleich zur Stirnseite. Betrachtet man das Verhältnis der Länge an der Basis der Rückseite zur

Länge an der Basis der Stirnseite (l_{BRs} zu l_{BSs}) bzw. das Verhältnis der Höhe der Rückseite zur Höhe der Stirnseite (h_{RS} zu h_{SS}), kommen die Mittelwerte sehr nahe beim Faktor 1,0 zum Liegen (Tabelle 82). Demnach gleichen sich die Abweichungen in den Messreihen über alle Messwerte gesehen aus. Die Werte streuen jedoch teilweise stark, am stärksten bei den Höhen der Waldrestholzpolter. Beim Energierundholz liegen die Basislängen relativ eng beieinander, die Höhen zeigen jedoch auch erhebliche Abweichungen nach oben und nach unten. Obwohl sich die Werte langfristig ausgleichen, können starke Abweichungen im Einzelfall zu Fehleinschätzungen führen.

Tabelle 82: Verhältnis der Länge an der Basis der Rückseite zur Länge an der Basis der Stirnseite (l_{BRs} zu l_{BSs}) und Verhältnis der Höhe der Rückseite zur Höhe der Stirnseite (h_{RS} zu h_{SS})

		l_{BRs} zu l_{BSs}	h_{RS} zu h_{SS}
Wrh	Mittelwert	0,98	0,96
	Standardabweichung	0,15	0,25
	Min.	0,62	0,15
	Max.	1,34	1,54
Er	Mittelwert	0,97	0,99
	Standardabweichung	0,06	0,14
	Min.	0,83	0,67
	Max.	1,08	1,35

8.3.1.3 Umrechnungsfaktoren

Von den vermessenen Poltern konnte bei 56 Stück eine weitere Analyse der daraus erzeugten Hackschnitzelmengen angeschlossen werden. Bei 30 wurden genaue Messungen der Hackschnitzelmenge durchgeführt (Wrh: 20, Er: 10). Bei 35 Poltern (Wrh: 23, Er: 12) sind Mengenschätzungen der Maschinenführer erfasst worden. Die Schätzungen der Maschinenführer wurden anhand von 10 Kontrollmessungen überprüft. Von der gemessenen Hackschnitzelmenge wichen die Schätzungen nur geringfügig ab (Mittelwert: 1,04; Standardabweichung: 0,08; Min./Max.: 0,95-1,18). Sie wurden deshalb zur Erweiterung des Datensatzes als gültig anerkannt. Bei Waldrestholz konnte dadurch auf 36 Werte, bei Energierundholz auf 20 Werte zurückgegriffen werden. Die sich ergebenden Faktoren zur Beschreibung des Verhältnisses der erzeugten Hackschnitzelmenge zum Poltervolumen sind in Abbildung 103 dargestellt.

Demnach gilt für Waldrestholz das Verhältnis 1 Rm Poltervolumen \triangleq 0,32 \pm 0,15 Srm Hackschnitzel, für Energierundholz gilt 1 Rm Poltervolumen \triangleq 1,59 \pm 0,35 Srm Hackschnitzel.

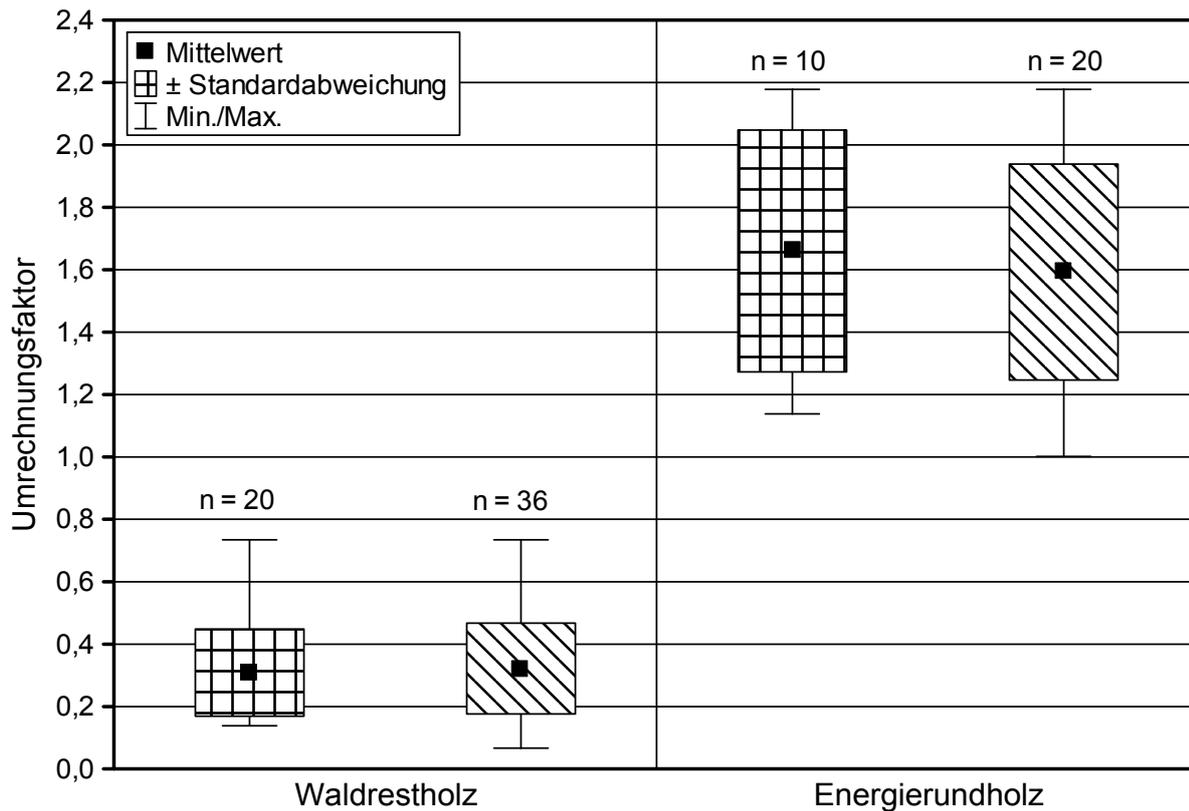


Abbildung 103: Verhältnis der erzeugten Hackschnitzelmenge in Schüttraummetern zum Poltervolumen in Raummetern. Für Waldrestholz und Energierundholz sind jeweils die tatsächlich gemessenen Datenreihen links und die um die geprüften Schätzwerte der Maschinenführer erweiterten Datenreihen rechts dargestellt.

Berücksichtigung der Kronenfußmessungen

Der geplante Stichprobenumfang von 20 % der Stirnfläche bei der Vermessung der Kronenfüße wurde bei 29 Poltern (Wrh: 11, Er: 18) erreicht. Bei weiteren 15 Poltern (alle Wrh) konnte der Umfang aus Zeitgründen bzw. aus Gründen der Arbeitssicherheit nicht erreicht werden. Diese sind in der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt. Die Aufnahme der Kronenfüße hat sich bei den Waldrestholzpoltern als aufwendig herausgestellt. Aufgrund der Polterstruktur ist oft keine auch nur annähernd zweidimensionale Stirnfläche vorhanden, an der gemessen werden kann. Weiter hinten liegende Kronenfüße können durch feinere Kronenteile verdeckt sein. Bei den Energierundholzpoltern ist die Polterstirnfläche geordneter, eine verlässliche Erfassung aller Kronenfüße ist leichter möglich.

Der mittlere **Kronenfußflächenanteil** an der Stirnseite der Waldrestholzpolter betrug $20,2 \pm 8,9 \%$, bei den Energierundholzpoltern $61,5 \pm 8,6 \%$. Betrachtet man den gesamten Datensatz über beide Poltertypen hinweg, ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Anteil der Kronenfußfläche und dem sich ergebenden Umrechnungsfaktor feststellbar ($R^2 = 0,7914$, Abbildung 104).

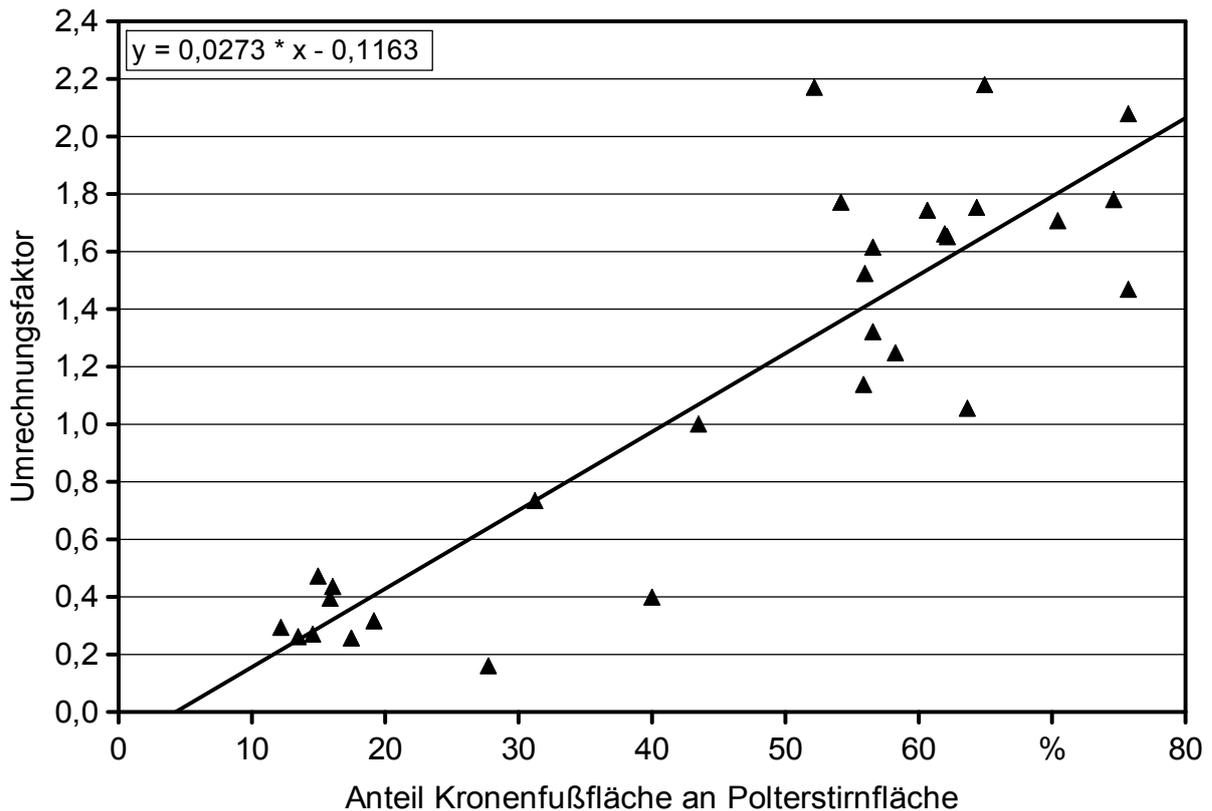


Abbildung 104: Zusammenhang zwischen Kronenfußflächenanteil und dem Umrechnungsfaktor von Poltervolumen zu Hackschnitzelvolumen ($R^2 = 0,7914$)

Der mittlere **Kronenfußdurchmesser** betrug bei Waldrestholz $14,42 \pm 4,50$ %, bei Energierundholz $18,19 \pm 6,70$ %. Anders als bei den Kronenfußflächenanteilen ist hier in einem Streudiagramm kein Zusammenhang ersichtlich. In einer multiplen Regression wurde zudem untersucht, inwiefern beide Variablen gemeinsam einen Einfluss auf den Umrechnungsfaktor haben. Auch hier konnte ein signifikanter Zusammenhang nur für den Anteil der Kronenfußfläche und nicht für den mittleren Kronenfußdurchmesser festgestellt werden.

8.3.2 Umrechnungsfaktoren bei den stationären Versuchen am TFZ

Die Messungen am TFZ erfolgten parallel zu den stationären Versuchen zur physikalischen Hackschnitzelqualität (Unterkapitel 5.5) und zum Energiebedarf (Kapitel 6). Die Bezeichnung und Anzahl der Einzelchargen sowie die verwendeten Rohmaterialien und Maschineneinstellungen wurden analog verwendet.

Der mittlere Umrechnungsfaktor vom Schüttraummeter (S_{rm}) je m^3 Holz lag bei den stationären Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker bei $2,72 \pm 0,15$ S_{rm}/m^3 m. R. (Abbildung 105). Bei Berücksichtigung des forstlichen Abrundens lag der Umrechnungsfaktor im Mittel bei $3,18 \pm 0,26$ S_{rm}/E_{fm} o. R., bei zusätzlicher Berücksichtigung des Rindenabzugs sogar bei $4,49 \pm 0,49$ S_{rm}/E_{fm} o. R. (Abbildung 105).

Die Umrechnungsfaktoren lagen damit größtenteils über dem üblichen Faktor von 2,5 (siehe ÖNorm M7132 [158]). Bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker wurde das Schüttgut ohne gesondertes Austragssystem (Gebläse, Wurfschaufeln) zur Volumenbestimmung in Holzkisten überführt. Es kam somit im Gegensatz zu den Versuchen im Feld und zu den stationären Versuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern am TFZ zu keiner zusätzlichen Verdichtung durch das Austragssystem. Die etwas höheren Faktoren im Vergleich zu Literaturwerten waren somit zu erwarten.

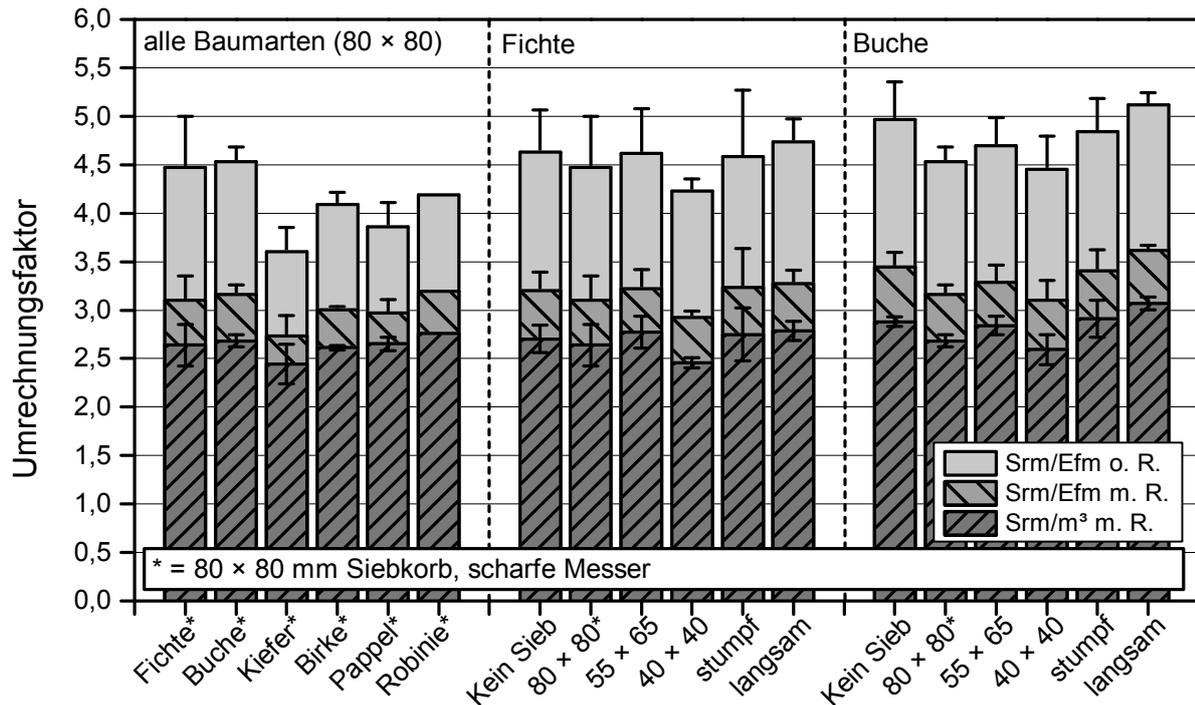


Abbildung 105: Mittlere Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (Srm) bei den stationären Versuchen mit elektrischem Trommelhacker (\pm SD; $n = 3$)

Die Unterschiede zwischen den drei Bezugseinheiten (m^3 m. R.; Efm m. R.; Efm o. R.) waren für die Baumarten Buche und Fichte am stärksten ausgeprägt. Buche und Fichte hatten in der präsentierten Versuchsreihe deutlich geringere mittlere Stammdurchmesser (63,2 und 63,2 mm) als Kiefer, Birke, Pappel und Robinie (jeweils > 70 mm, siehe Tabelle 68 in Abschnitt 5.5.1.1). Zu beachten ist dabei, dass der Efm in der forstlichen Praxis als Bezugseinheit für Derbholz (> 7 cm Durchmesser) Anwendung findet (siehe Unterkapitel 8.1) und ein Großteil der vermessenen Stämme unterhalb der Derbholzgrenze lag. Je geringer der Stammdurchmesser, desto größer ist folglich der durch das forstliche Abrunden „verlorene“ Anteil an Biomasse (vgl. unten). Entsprechend steigt der Unterschied zwischen den Umrechnungsfaktoren.

Die Standardvarianten mit dem 80 × 80 mm großen Siebkorb und scharfen Messern, die am ehesten den Prozesseinstellungen im Feld entsprachen (Abschnitt 5.2.2.4), zeigten mittlere Umrechnungsfaktoren von $2,60 \pm 0,15$ Srm/m³ m. R., $3,18 \pm 0,26$ Srm/Efm m. R. und $4,08 \pm 0,42$ Srm/Efm o. R. Unterschiede zwischen den Varianten waren gering und nicht signifikant. Dennoch zeigten die Varianten mit feinem Siebkorb (40 × 40 mm) und die Variante mit Kiefer die niedrigsten Werte. Die Varianten „ohne Sieb“, „stumpfe Messer“ und „langsamer Einzug“ hatten dagegen die höchsten Umrechnungsfaktoren. Innerhalb derselben Baumart (Buche, Fichte) verliefen die Ergebnisse dabei analog zu den Messungen der Schüttdichte (Abschnitt 5.5.1.2), wobei eine hohe Schüttdichte einen geringeren Umrechnungsfaktor zur Folge hatte. Je höher die Verdichtung des Schüttguts, z. B. durch eine geringere durchschnittliche Partikelgröße, desto weniger Luftzwischenräume finden sich im Schüttgut und desto geringer ist das Schüttvolumen. Die ÖNorm M7132 [158] gibt für Schüttgüter mit der Partikelgrößenverteilung G30 den Umrechnungsfaktor 2,5 Srm/Fm, für die gröbere Klasse G50 den Faktor 3,0 Srm/Fm an. Die Unterschiede zwischen den Baumarten, d. h. der niedrigere Mittelwert für Kiefer im Vergleich zu den anderen Arten, lässt sich dagegen nicht durch eine höhere Verdichtung des Materials erklären. Vielmehr kommt der beobachtete Unterschied durch einen Einzelwert zustande, weshalb ein Einfluss der Baumart auf den Umrechnungsfaktor Srm/m³ m. R. als vernachlässigbar angesehen wurde.

Bei den stationären Hackversuchen mit den zapfwellenbetriebenen Hackern zeigten die Varianten im Durchschnitt $2,49 \pm 0,14$ (Trommel), $2,57 \pm 0,14$ (Schnecke) und $2,48 \pm 0,16$ (Scheibenrad) Srm/m³ m. R. (Abbildung 106). Der Faktor Srm/Efm m. R. lag analog zu den Ergebnissen der Versuche mit dem elektrischen Trommelhacker höher (Trommel: $2,66 \pm 0,16$; Schnecke: $2,88 \pm 0,19$; Scheibenrad: $2,70 \pm 0,18$), gefolgt von den Werten für den Srm/Efm o. R. (Trommel: $2,94 \pm 0,18$; Schnecke: $3,48 \pm 0,15$; Scheibenrad: $3,09 \pm 0,21$).

Unterschiede zwischen den Varianten desselben Hackers waren kaum auszumachen. Lediglich eine Erhöhung der Zapfwellendrehzahl (Scheibenradhacker) und eine gröbere Hackerschnecke (Schneckenhacker) führten zu geringeren Umrechnungsfaktoren. Die Erhöhung der Zapfwellendrehzahl beeinflusst dabei direkt die Drehzahl des Hackrotors und somit die Geschwindigkeit der Wurfschaufeln des Auswurfs. Hierdurch kommt es mitunter zu einer höheren Verdichtung im Container. Weiterhin war die durchschnittliche Partikelgröße bei einer hohen Zapfwellendrehzahl geringer, wodurch die Schüttdichte erhöht, das Volumen an Schüttgut jedoch verringert wurde. Im Fall der gröberen Hackerschnecke lässt sich der beobachtete Effekt nicht über die höhere Verdichtung des Materials erklären. Die beobachteten Unterschiede blieben jedoch insgesamt gering.

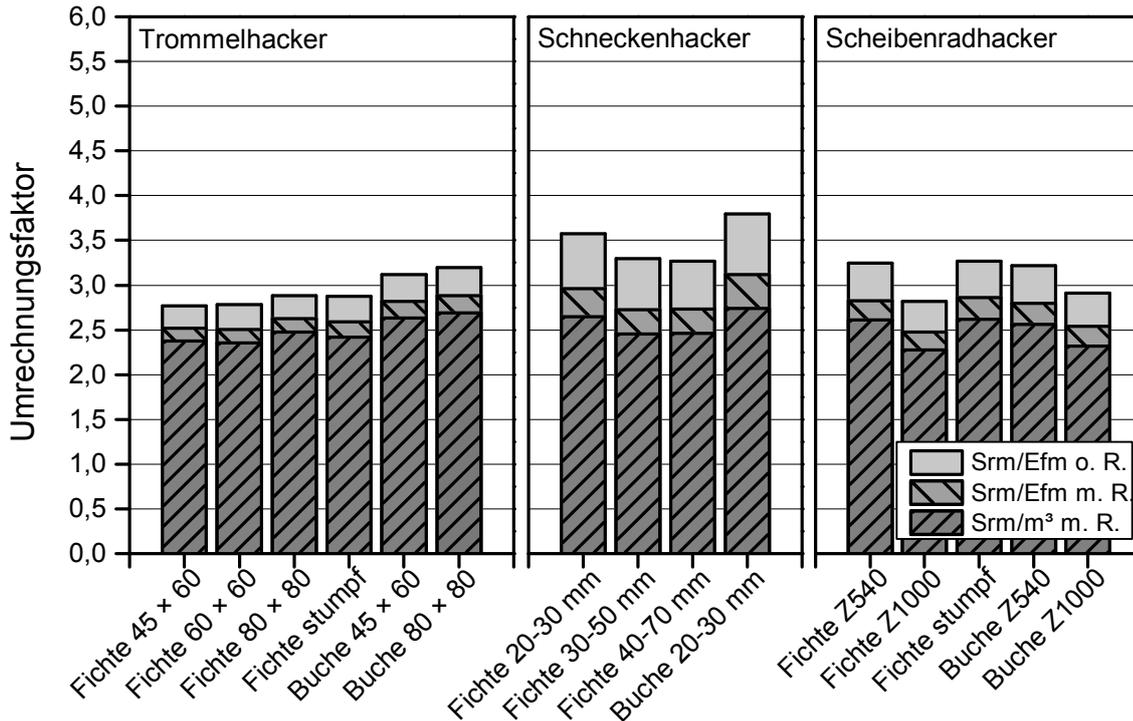


Abbildung 106: Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (Srm) bei stationären Versuchen mit zapfwellenbetriebenen Hackern

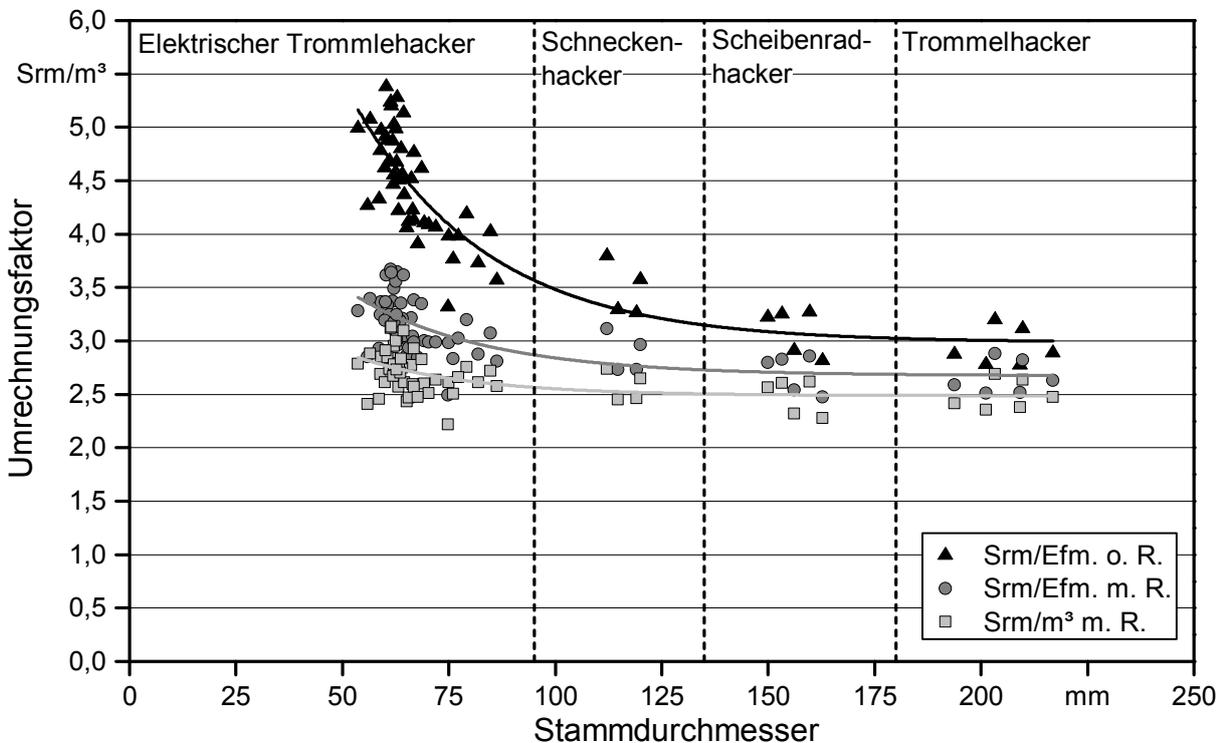


Abbildung 107: Umrechnungsfaktoren von m^3 Holzvolumen (m^3 m. R., Efm m. R. und Efm o. R.) auf Schüttraummeter (Srm) in Bezug auf mittleren Stammdurchmesser der Charge bei den stationären Versuchen

Ähnlich wie beim elektrischen Trommelhacker war der Unterschied der drei Umrechnungsfaktoren S_{rm}/m^3 m. R., S_{rm}/E_{fm} m. R. und S_{rm}/E_{fm} o. R. vom Durchmesser der Stämme abhängig (Abbildung 107). Der Effekt des Stammdurchmessers war dabei spätestens ab ca. 125 mm vernachlässigbar, wobei sich Mittelwerte von $2,48 \pm 0,14$ S_{rm}/m^3 m. R.; $2,68 \pm 0,16$ S_{rm}/E_{fm} m. R. und $3,01 \pm 0,20$ S_{rm}/E_{fm} o. R. ergaben. Für den Faktor S_{rm}/m^3 m. R. war die Angabe eines einheitlichen Werts sogar schon ab 10 cm Durchmesser möglich, wobei sich der Faktor $2,51 \pm 0,14$ ergab.

Über alle Versuchsreihen hinweg lässt sich die Abhängigkeit des Umrechnungsfaktors vom Durchmesser (D in mm) gut mittels Regressionsberechnung als mathematische Formel abbilden (Abbildung 107):

$$S_{rm} = (2,986 + 12,106 \times 0,968^D) \times E_{fm} \text{ o. R.} \quad R^2 = 0,816 \quad \text{Formel [9-9]}$$

$$S_{rm} = (2,674 + 4,095 \times 0,968^D) \times E_{fm} \text{ m. R.} \quad R^2 = 0,502 \quad \text{Formel [9-10]}$$

$$S_{rm} = (2,487 + 2,567 \times 0,963^D) \times m^3 \text{ m. R.} \quad R^2 = 0,248 \quad \text{Formel [9-11]}$$

Das deutlich niedrigere Bestimmtheitsmaß von Formel [9-11] (m^3 m. R.) lässt sich dabei durch die niedrigere Streuung der Werte und die insgesamt niedrigere Abhängigkeit des m^3 m. R. vom Durchmesser der Stämme erklären.

Für die Abschätzung des Schüttgutvolumens mittels des Raummeters, d. h. für den Faktor S_{rm}/R_m bzw. R_m/m^3 m. R., konnte bei den stationären Versuchen mit den zapfwel-lenbetriebenen Hackern kein einheitlicher Wert angegeben werden (Abbildung 108). Vielmehr waren diese Umrechnungsfaktoren stark vom Anteil an Holzvolumen im Raummeter abhängig. Analog zu den Feldversuchen (Abschnitt 8.3.1.3) war der Anteil der Kronenfußfläche an der gesamten Polterstirnseite ein guter Anhaltspunkt, um die jeweiligen Umrechnungsfaktoren abzuschätzen (Abbildung 108). Dabei war dieser Anteil für die Baumart Fichte aufgrund der kürzeren und insgesamt weniger verdrehten Stämme höher als für die Baumart Buche. Aufgrund des relativ einheitlichen Verhältnisses zwischen reinem Holzvolumen (m^3 m. R.) und Schüttgutvolumen (S_{rm}) waren die Umrechnungsfaktoren mit Bezug auf den Raummeter dabei linear vom Anteil der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche abhängig (Abbildung 108).

Für einen Anteil der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche von 60 % ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,5 S_{rm}/R_m , für 70 % von 1,7 S_{rm}/R_m . Bei den in den Feldversuchen vermessenen Energierundholzpoltern ergaben sich 1,5 bzw. 1,8 S_{rm}/R_m .

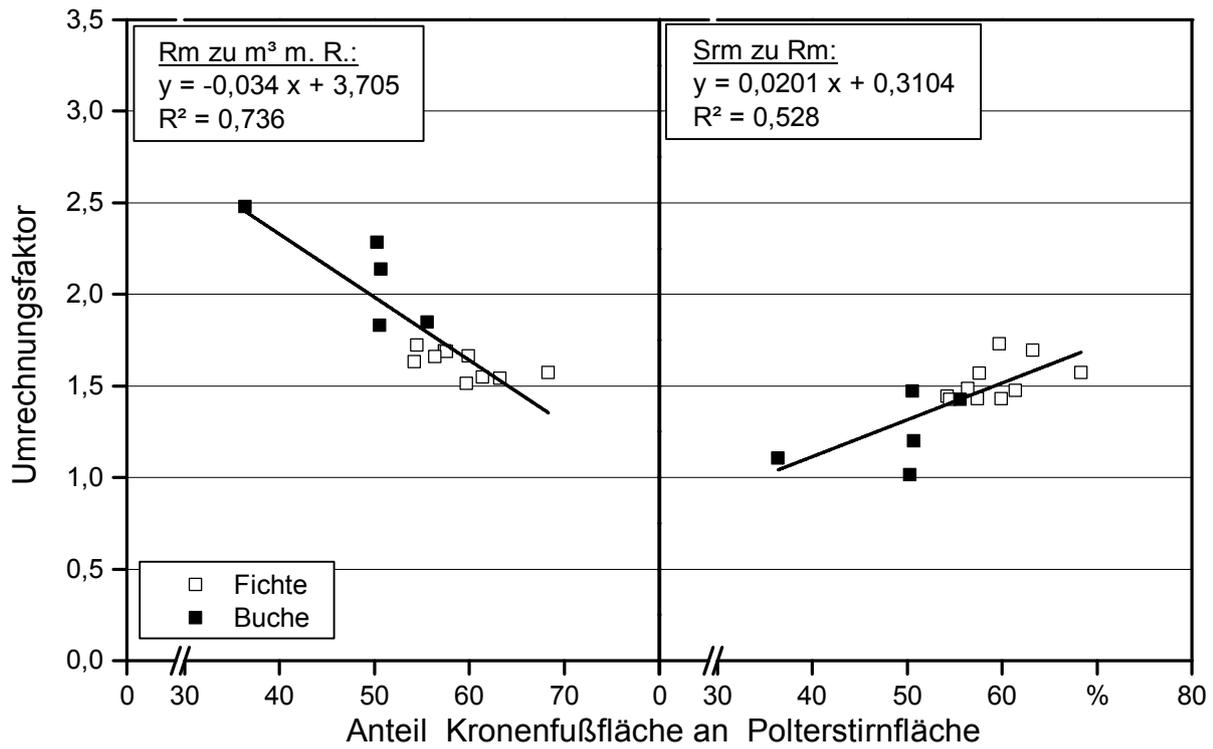


Abbildung 108: Umrechnungsfaktoren (R_m zu m^3 (m. R.) und S_{rm} zu R_m) in Bezug auf den Anteil der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche

8.4 Ableitung praxistauglicher Schätzverfahren

Für den Einsatz unter Praxisbedingungen im Wald werden im Folgenden geeignete Mess- und Schätzverfahren abgeleitet. Möglich ist die Schätzung anhand der gesamten im vorangegangenen Hieb angefallenen Holzmenge, der Kronenfußdurchmesser und der Anzahl zu hackender Kronen sowie aus dem Volumen des zu hackenden Polters (Abschnitt 8.1.2). Die angefallene Holzmenge ist nicht immer allen Beteiligten entlang der Prozesskette bekannt. Die zu hackenden Kronen zu zählen und zu vermessen, ist bei bedeutenden Mengen keine praxistaugliche Option. Deshalb wird im Folgenden die Schätzung anhand des Poltervolumens weiterverfolgt.

In den Abschnitten 8.2.2.2 und 8.3.1.1 wurde die Eignung verschiedener geometrischer Formeln zur Beschreibung der Polterform untersucht. Die Genauigkeit erhöht sich dabei mit steigender Zahl der Messwerte, die in eine Formel eingehen. In Abschnitt 8.3.1.3 sind die ermittelten Auflockerungsfaktoren von Poltervolumen zu Hackschnitzelvolumen beschrieben.

8.4.1 Poltervolumen

Das Verhältnis des Messaufwands zur Verlässlichkeit der Ergebnisse spielt bei der Ermittlung des Poltervolumens eine zentrale Rolle. Da die beiden Sortimenten Energierundholz und Waldrestholz verschiedene Charakteristika haben und auch unterschiedliche Wertschöpfungspotenziale bergen, werden sie differenziert betrachtet.

Auf Grundlage der Daten in Tabelle 81 lassen sich Wertebereiche für Korrekturfaktoren ableiten, mit denen das jeweils gemessene Volumen multipliziert werden kann, um das der Realität am nächsten kommende (aber in der Praxis umständlich zu messende) Volumen des Pyramidenstumpfs V_{PSI} zu erhalten. Bei den Werten handelt es sich um die Kehrwerte der vorweg ermittelten Verhältniszahlen (Abschnitt 8.3.1.2). Die Wertebereiche in Tabelle 83 sind so gewählt, dass 70 % der Messwerte innerhalb des angegebenen Bereichs liegen.

Tabelle 83: Korrekturfaktoren bei der Bestimmung des Poltervolumens

Sortiment	Wertebereich	V_{Qu}	V_{QS}	V_{Pr}	V_{Zy}	V_{hkSt}
Wrh	Mittelwert	0,8	1,0	1,0	1,0	1,1
	von	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0
	bis	0,9	1,2	1,1	1,1	1,1
Er	Mittelwert	0,7	1,0	1,0	0,9	0,9
	von	0,6	0,9	0,9	0,8	0,8
	bis	0,8	1,1	1,0	1,1	1,1

In die Formeln für V_{PSt} und V_{hKSt} fließen Messungen der Polterrückseite ein, was die Ergebnisse sehr genau macht. Für die Praxis sind diese Messungen aber zu aufwendig. Die einfachste Volumenformel V_{Qu} weicht wie zu erwarten am deutlichsten von V_{PSt} ab. Zudem ist der Schwankungsbereich einer möglichen Korrektur hier am größten (Abbildung 102).

Die Ermittlung der mittleren Höhe der Stirnseite im Sektionsverfahren zur Verwendung in V_{QS} ist mit relativ geringem Aufwand verbunden, bringt dabei jedoch eine erhebliche Verbesserung der Treffgenauigkeit. Daher wird für die Praxis die Verwendung dieser Formel empfohlen. Das berechnete Volumen kann bei Energierundholz in vielen Fällen direkt verwendet werden. Beim Waldrestholz ist das Wertschöpfungspotenzial deutlich geringer als beim Energierundholz. Hinzu kommt, dass eine fehlerhafte Schätzung des Poltervolumens nur zu einer Abweichung bei der Hackschnitzelmenge von im Mittel 0,32 Srm, beim Energierundholz jedoch im Mittel 1,59 Srm führt. Daher ist bei der Volumenermittlung eine größere Unsicherheit akzeptabel als beim Energierundholz. Statt V_{QS} kann für Waldrestholzpolter das Zylindervolumen V_{Zy} empfohlen werden. Hierzu sind lediglich die Eingangsgrößen Basislänge Stirnseite, Höhe Stirnseite und mittlere Tiefe zu messen. In der Praxis sollte bei Waldrestholzpoltern im Einzelfall entschieden werden, ob die Zylinderform passend ist oder die Höhe der Stirnseite so unregelmäßig ausfällt, dass ein Aufmaß im Sektionsverfahren notwendig ist.

Tabelle 84: *Empfohlene Mess- und Berechnungsverfahren für das Poltervolumen bei Waldrestholz (Wrh) und Energierundholz (Er)*

	Wrh	Er
Geometrische Form	Zylinder*	Quader (Sektionsverfahren)
Notwendige Messungen	- Basislänge Stirnseite (l_{BSS}) - Höhe Stirnseite (h_{SS}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r) ergeben die mittlere Tiefe t_M	- Basislänge Stirnseite (l_{BSS}) - mittlere Höhe Stirnseite aus Sektionsverfahren (h_{SKSS}) - Tiefe links und rechts (t_l und t_r) ergeben die mittlere Tiefe t_M
Formel	$V_{Zy} = \frac{\pi}{4} \times l_{BSS} \times h_{SS} \times t_M$ vereinfacht: $V_{Zy} = 0,8 \times l_{BSS} \times h_{SS} \times t_M$	$V_{QS} = l_{BSS} \times h_{SKSS} \times t_M$
Korrekturfaktor	0,9–1,1	0,9–1,1

*) Bei stark ungleichmäßiger Ausformung der Höhe an der Polterstirnseite wird auch für Waldrestholzpolter das Sektionsverfahren wie beim Energierundholz rechts beschrieben empfohlen.

Der entscheidende Aspekt bei der Genauigkeit der Formenbeschreibung ist, ob in der Formel Veränderungen in Höhe und Länge des Polters nach hinten berücksichtigt sind, also ob die Fläche der Polterrückseite einfließt. Die in Tabelle 83 angegebenen Faktorenbereiche erlauben eine gutachtliche Einwertung dieser Verjüngung. Bei nicht außergewöhnlicher Polterform ist der Mittelwert zu verwenden. Bei augenscheinlichen Besonderheiten der Polterform kann entsprechend das obere oder untere Ende des angegebenen Faktorenbereichs eingesetzt werden (z. B. Faktor 0,9 bei sich deutlich verjüngenden Energierundholzpoltern). Die empfohlenen Formeln und Korrekturfaktoren sind in Tabelle 84 zusammenfassend dargestellt.

8.4.2 Umrechnungsfaktoren

Bei den Umrechnungsfaktoren sollte der Einfluss des Kronenfußflächenanteils berücksichtigt werden, ohne zu aufwendige Messungen notwendig zu machen. Bei den Anteilen der Kronenfußfläche an der Polterstirnfläche zeigt sich deutlich der unterschiedliche Charakter der Poltertypen. Die Waldrestholzpolter haben alle einen Kronenfußflächenanteil von bis zu 40 % (Mittelwert 20,2 %, siehe Abschnitt 8.3.1.3), die Energierundholzpolter liegen bei 43,5–75,7 % (Mittelwert: 61,5 %). Um die Umrechnungsfaktoren weiter einzugrenzen, wird der Kronenfußflächenanteil in Tabelle 85 in 5-%-Schritten aufgeführt und dazugehörige Faktoren definiert. Zum Beispiel gilt für ein Waldrestholzpolter mit einem Kronenfußflächenanteil von 20 % ein Umrechnungsfaktor von 1 Rm Poltervolumen \cong 0,4 Srm Hackschnitzel, für ein Energierundholzpolter mit einem Kronenfußflächenanteil von 60 % ein Umrechnungsfaktor von 1 Rm Poltervolumen \cong 1,5 Srm Hackschnitzel. Für eine schnelle Einschätzung der Polterklasse wird als Schätzhilfe ein Fotokatalog zusammengestellt und in Form eines LWF-Merkblatts verfügbar gemacht.

Tabelle 85: Polterklassen nach Anteilen der Kronenfußflächen an der Polterstirnfläche und jeweils gültige Umrechnungsfaktoren vom Raummaß [Rm] des Polters auf die zu erwartende Hackschnitzelmenge [Srm]

Poltertyp	Wrh	Wrh	Wrh	Wrh	Er	Er	Er	Er	Er	Er
Kronenfußanteil [%]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Umrechnungsfaktor	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6

Im Fall von Energierundholz lässt sich der Anfall an Schüttraummetern zudem mit hoher Genauigkeit abschätzen, wenn das tatsächliche Holzvolumen bekannt ist. Die Versuche am TFZ zeigten für die Umrechnung vom reinen Holzvolumen (m^3 m. R.) auf den Schüttraummeter relativ einheitliche Werte und konnte für Stämme > 10 cm Durchmesser mit $2,51 \pm 0,14$ Srm/ m^3 m. R. angegeben werden. Soll das forstliche Volumen Efm o. R. verwendet werden, muss für den Umrechnungsfaktor der mittlere Durchmesser der Stämme berücksichtigt werden. Ab einem mittleren Durchmesser > 12 cm kann jedoch wieder ein einheitlicher Faktor von $3,01 \pm 0,20$ Srm/Efm o. R. angenommen werden. Die

Umrechnung von R_m auf S_{rm} bzw. vom m^3 m. R. auf R_m war analog der Feldversuche stark abhängig von der Stapeldichte des Holzes im Polter.

$$S_{rm} = 2,5 \times m^3 \text{ m. R.} \qquad \text{Formel [9-12]}$$

$$S_{rm} = 2,7 \times E_{fm} \text{ m. R.} \qquad \text{Formel [9-13]}$$

$$S_{rm} = 3,0 \times E_{fm} \text{ o. R.} \qquad \text{Formel [9-14]}$$

Für Energierundholz kann auch die Entwicklung optischer Verfahren zum Abschätzen des Holzvolumens von Stammholz [7] eine vielversprechende Möglichkeit darstellen, das zu erwartende Volumen an Hackschnitzeln schnell zu erfassen.

Insgesamt ermöglichen die überarbeiteten Schätzverfahren und Umrechnungsfaktoren eine effizientere Abschätzung des tatsächlich in der Praxis anfallenden Schüttvolumens bei verträglichem Arbeitsaufwand und damit eine deutliche Rationalisierung der Bereitstellungskette.

Zusammenfassung

DANIEL KUPTZ, FABIAN SCHULMEYER, HERBERT BORCHERT & HANS HARTMANN

Die hohe Nachfrage nach Waldhackschnitzeln bietet für viele Forstbetriebe, Biomassehöfe und landwirtschaftliche Unternehmen die Möglichkeit, ehemals ungenutzte Holzsortimente sinnvoll zu vermarkten. Die energetische Nutzung von Waldrestholz, aber auch von Holz aus der Pflege von Verkehrswegen und Stromtrassen, aus der Landschaftspflege, aus urbanen Bereichen sowie die gezielte Aushaltung schwacher Stämme (Energierundholz) oder die Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen findet zunehmend Anwendung in der Praxis. Dem sehr dynamischen Hackschnitzelmarkt steht eine Reihe ökonomischer, ökologischer und sozialer Anforderungen gegenüber. Waldhackschnitzel sollen nachhaltig, d. h. boden-, bestands- und klimaschonend produziert werden, von hoher physikalischer und stofflicher Qualität sein, die regionale Wertschöpfung steigern und eine kostengünstige Alternative zu fossilen Brennstoffen darstellen. Obwohl die Bereitstellung von Holzhackschnitzeln die genannten Punkte schon umfangreich erfüllt, bieten sich bei vielen Detailaspekten weitere Optimierungspotenziale.

Das Forschungsprojekt „Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel“ untersucht zahlreiche Aspekte der Hackschnitzelbereitstellung. Mittels Literaturrecherchen, Expertenbefragungen und umfangreicher eigener Messungen – sowohl im Feld als auch stationär am Betriebshof des TFZ – wurden ausführliche Datensätze zur Prozesskette, zur physikalischen und stofflichen Hackschnitzelqualität, zum Energieverbrauch und zur Durchsatzleistung des Prozessschritts „Hacken“, zur technischen Hackgut Trocknung sowie zu Schätzverfahren des Mengenanfalls an Schüttraummetern erarbeitet und analysiert.

Prozesskettenanalyse. In einer Expertenbefragung wurde der aktuelle Status der Waldhackschnitzelbereitstellung in Bayern ermittelt. Befragt wurden Mitarbeiter der Forstverwaltung und der Bayerischen Staatsforsten, forstliche Zusammenschlüsse sowie forstliche Dienstleistungsunternehmen. Die Aushaltung von Hackholz erlaubt demnach eine Wertschöpfung in bislang defizitären Bereichen. Die beiden wichtigsten Ausgangsmaterialien beim Hackholz sind Waldrestholz und Energierundholz. Am häufigsten wird Fichten-Waldrestholz (mit Beimischung anderer Nadelhölzer und von Laubhölzern) gehackt. Die Bereitstellung sogenannter Premium-Hackschnitzel aus Energierundholz (auch Premiumware, „Weiße Ware“, Stammholz) gewinnt zunehmend an Bedeutung.

In der Waldhackschnitzelbereitstellung werden meist Standardverfahren und etablierte Maschinenausstattungen eingesetzt. Eine weitgehende Entkopplung des Verfahrensschritts Hacken hat sich in der Praxis durchgesetzt. Dabei wird das Hackholz aus dem Bestand gerückt und an der Forststraße gepoltet, wo es auch gehackt wird. Der Transport ist zumeist an das Hacken gekoppelt. Der Organisation der Logistik kommt daher bei der Hackerauslastung die entscheidende Rolle zu. In der Ernte werden bei kombinierter Aushaltung stofflicher Sortimente und Energieholz i. d. R. motormanuelle Verfah-

ren oder Standard-Harvester-Aggregate eingesetzt. In der reinen Energieholzernte können Fäller-Bündler-Aggregate an preisgünstigen Trägerfahrzeugen (z. B. Bagger) die Maschinenkosten senken. Neuere Entwicklungen gehen hin zu Kombi-Aggregaten wie in der Fallstudie Sailerhausen gezeigt. Diese können in Übergangsbeständen sowohl stoffliche Sortimenten aushalten als auch Energieholz bündelweise und damit zeitsparend fällen und ablegen. Beim Verfahrensschritt Hacken hat sich der Einsatz mobiler Großhacker auf der Forststraße etabliert. Es handelt sich meist um Trommelhacker, entweder als Lkw-Aufbau oder an leistungsstarken landwirtschaftlichen Schleppern. Diese Entwicklung ist auch im Privatwald zu beobachten, wobei die Erschließungssituation oft ein Hemmnis darstellt. Die Lagerung des ungehackten Holzes wird uneinheitlich gehandhabt und spielt vor allem im Privatwald eine Rolle. Ein wichtiges Thema bei der Energieholznutzung ist die Nährstoffnachhaltigkeit. Es werden standortbezogene Entscheidungshilfen für die Kronennutzung benötigt. Angepasste Ernteverfahren, wie z. B. die Aushaltungsvariante „Grob entastetes Energierundholz“ in der Fallstudie Eurasburg, können den Nährstoffentzug bei der Energieholzernte reduzieren.

Die Praxis lässt die Definition von vier Modellverfahrensketten zur Waldhackschnitzelbereitstellung (zzgl. zwei Varianten) zu. Diese unterscheiden sich nach Zielsortimenten, eingesetzten Maschinen und der Organisation der Verfahrensschritte. Höher mechanisierte Verfahren zeichnen sich durch höhere Leistung aus, gehen allerdings auch mit höheren Maschinenkosten einher. Die Gesamtkosten der Waldhackschnitzelbereitstellung (ohne Ferntransport) belaufen sich je nach Modellverfahrenskette auf 5 bis 31 €/Srm. Innerhalb der Verfahren steigt die Leistung mit der Stückmasse der bearbeiteten Bäume.

Der Verfahrensschritt „Hacken“ wurde im Rahmen von 38 Praxiseinsätzen begleitet. Die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) beträgt bei Waldrestholz $74,0 \pm 25,3$ Srm/h (MAS), bei Energierundholz $99,1 \pm 40,1$ Srm/h (MAS). Die TAP steigt mit zunehmender Antriebsleistung. Der Anteil der Arbeitsunterbrechungen an der Maschinenarbeitsstunde beläuft sich auf 8,8 %. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen Waldrestholz (17,8 %) und Energierundholz (5,5 %), der vorrangig durch mechanische Verteilzeiten und Umsetzzeiten bedingt ist. Die höheren mechanischen Verteilzeiten könnten auf eine höhere Maschinenbeanspruchung bei Waldrestholzeinsätzen hindeuten. Die höheren Umsetzzeiten resultieren aus den geringeren Auflockerungsfaktoren der Waldrestholzpolter. Unter Praxisbedingungen im Wald spielt zudem die Auslastung bezogen auf die Gesamte Arbeitszeit (GAZ) eine entscheidende Rolle. In den Arbeitsstudien liegt diese bei 57 %, streut jedoch sehr stark. Den bedeutendsten Anteil an den Allgemeinen Zeiten (AZ) haben die Wartezeiten des Hackers, die durch den Wechsel von Transportbehältern verursacht werden. Wartezeiten können durch organisatorische Maßnahmen reduziert werden. Allerdings wird immer ein gewisser Zeitbedarf für Fahrzeugwechsel und Rangieren verbleiben. Aus den untersuchten Logistikzyklen ergibt sich, dass Wartezeiten beim Einsatz von Lkw-Containern bis 15 Minuten, bei Schubboden-Aufliegern bis 37 Minuten auch bei guter Organisation zu erwarten sind und akzeptiert werden können. Das Zusammenspiel von Hacker und Logistik wurde in sechs Fallstudien näher beleuchtet. Daraus wurden für die häufigsten Transportfahrzeuge typische Logistikabläufe defi-

niert. Die Modellrechnung für Container-Lkw-Züge bei Solo-Waldfahrten zur Beladung ergibt eine mittlere Aufenthaltsdauer des Lkw am Umladeplatz und im Wald von 1,5 h.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch beim Hacken wurde mit 36 Zeitstudien bestimmt und liegt zwischen 0,17 und 0,71 l/Srm bzw. zwischen 1,13 und 4,10 l/t_{atro}. Die niedrigsten Verbrauchswerte zeigten Maschinen mit Antriebsleistungen zwischen 200 und 400 kW. Weiterhin war der Kraftstoffverbrauch durch das Sortiment und die Maschineneinstellungen beeinflusst, wobei das Hacken von Waldrestholz anstelle von Energierundholz, aber auch die Verwendung feiner Siebkorbweiten oder stumpfer Messer geringfügig höhere Verbräuche zur Folge hatte. Insgesamt lag der Energieinput des Prozessschritts „Hacken“ im Vergleich zu der bereitgestellten Energiemenge mit ca. 0,5 % der im Holz gespeicherten Energie jedoch sehr niedrig.

Hackschnitzelqualität (physikalisch). Für die Beurteilung der physikalischen Hackschnitzelqualität und ihrer Abhängigkeit von rohstoff- und maschinenbedingten Einflüssen wurden 55 Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen, 58 Proben aus stationären Versuchen mit einem elektrischen Trommelhacker sowie weitere 16 Proben aus stationären Versuchen mit drei zapfwellenbetriebenen Hackern < 150 kW (1 × Trommel-, 1 × Scheibenrad- und 1 × Schneckenhacker) analysiert. Bei den Feldversuchen wurden Waldrestholz, Vollbäume, Energierundholz, Holz aus der Pflege von Verkehrswegen und Stromtrassen, KUP sowie Holz aus dem Siedlungsbereich als Rohmaterial verwendet. Bei den stationären Versuchen wurde ausschließlich Energierundholz verwendet. Alle Proben wurden auf Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert, Schüttdichte, Stauchfaktor und Korngrößenverteilung nach DIN-EN-Norm für biogene Festbrennstoffe untersucht. Zusätzlich wurden Partikelgröße und Partikelform mittels eines Bildanalyseverfahrens analysiert. Die Qualitätsbeurteilung erfolgte nach DIN EN ISO 17225-4.

Der Wassergehalt von Hackschnitzeln aus frisch geschlagenem Holz liegt mit durchschnittlich 49,1 Ma.-% deutlich über den Anforderungen nach DIN EN ISO 17225-4 (< 35 Ma.-%). Die Trocknung des ungehackten Rohmaterials über einen Sommer reduzierte den Wassergehalt bei den Feldversuchsproben auf 31 Ma.-%, bei den stationären Hackversuchen sogar auf bis zu 13,2 Ma.-% (lufttrocken). Der Heizwert reinen Waldholzes liegt zwischen 17,9 und 19,8 kJ/kg. Der Aschegehalt von Waldrestholz liegt bei 0,8 bis 5,4 Ma.-%, der von Energierundholz bei 0,4 bis 1,7 Ma.-%. Ein hoher Grünanteil im Brennstoff (v. a. Waldrestholz, Verkehrsbegleitgehölz, Siedlungsholz) führt zu einer Erhöhung des Aschegehalts und häufig zur Überschreitung der DIN EN ISO 17225-4. Mit zunehmender Verunreinigung des Brennstoffs durch einen Eintrag mit Mineralboden steigt der Aschegehalt sogar auf Werte > 10 Ma.-%. Gleichzeitig sinkt der Heizwert auf Werte bis zu 16 kJ/kg.

Die Schüttdichte (bei gleichem Wassergehalt) ist vornehmlich abhängig von der Baumart. Unterschiedliche Maschineneinstellungen (stationäre Versuche) führen dagegen zu keiner Änderung. Geringfügig höhere Stauchfaktoren und damit höhere Verdichtungsverhalten der Schüttgüter treten bei Waldrestholz, Vollbäumen und KUP im Vergleich zu Energierundholz auf (Feldversuche), aber auch bei Verwendung stumpfer Messer (stationäre Versuche).

Partikelklassen nach DIN EN ISO 17225-4 konnten für 36 % der Feldversuchsproben erreicht werden. Ausschlusskriterium war ein hoher Feinanteil oder die maximale Partikellänge. Eingehalten wurde die DIN EN ISO 17225-4 vor allem von Hackschnitzeln aus Energierundholz, das mit scharfen Messern gehackt worden war. Die stationären Versuche bestätigten die Feldversuche, wobei lediglich die Verwendung stumpfer Messer, Hacken ohne Siebkorbeinsatz (Trommelhacker) oder die Verwendung einer sehr groben Hackerschnecke (Schneckenhacker) zu Überschreitungen der DIN EN ISO 17225-4 führten. Ebenso wurde die Partikelform von der Verwendung von Energierundholz und scharfen Messern, aber auch von der Verwendung des Schneckenhackers (stationäre Versuche) positiv beeinflusst.

Insgesamt ließ sich die höchste Brennstoffqualität (Klassen A1 und A2 nach DIN EN ISO 17225-4) vornehmlich unter Verwendung von Energierundholz produzieren. Für die Klassen B1 und B2 kommt zusätzlich Waldrestholz, KUP und in Einzelfällen auch durch händische Vorsortierung (Verfahrenskette 1) aufbereitetes Siedlungsholz infrage. Voraussetzung hierfür ist, dass eine Partikelklasse nach DIN EN ISO 17225-4 eingehalten wird, ggf. durch nachträgliches Aufbereiten des Brennstoffs, z. B. durch Siebung. Alle übrigen Brennstoffproben sollten dagegen vornehmlich in Anlagen nach der 4. BImSchV genutzt werden.

Energieverbrauch und Durchsatzleistung (stationär). Die rohstoff- und maschinenbedingten Einflüsse auf den spezifische Energieverbrauch und die Durchsatzleistung konnten in den Feldversuchen nur bedingt dargestellt werden, weshalb beide Parameter bei den stationären Hackversuchen am TFZ gezielt analysiert wurden. Die Varianten unterschieden sich hinsichtlich ausgewählter Prozessparameter (Hackertyp, Messerschärfe, Siebkorbeinsatz, Einzugswalzengeschwindigkeit, Zapfwellendrehzahl, Schnittweite der Hackerschnecke) sowie unterschiedlicher Rohmaterialien (Energierundholz von insgesamt sechs Baumarten).

Bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker (n = 58) wurde der Energieverbrauch direkt über einen Stromzähler in kWh ermittelt. Bei den Versuchen mit den drei zapfwellenbetriebenen Hackern < 150 kW kam ein rapsölbetriebener John-Deere-Schlepper zum Einsatz. Der Kraftstoffverbrauch wurde gravimetrisch in kg Rapsöl ermittelt und über die Dichte und den Heizwert auf l Diesel umgerechnet.

Die volumenbezogene Durchsatzleistung (in Srm/h) war bei den stationären Versuchen direkt abhängig von der Baumart und den Maschineneinstellungen. Demnach sinkt die Durchsatzleistung beim Hacken von Baumarten mit hoher Rohdichte (z. B. Buche, Robinie), bei der Verwendung feiner Siebkorbweiten (z.B. 40 × 40 mm), bei langsamen Einzugswalzengeschwindigkeiten oder bei der Verwendung von Hackerschnecken mit schmalen Schnittweiten. Vor allem die Verwendung stumpfer Messer verringert die Durchsatzleistung enorm und liegt um bis zu 75 % niedriger als bei der Verwendung scharfer Messer, da es durch die hohe Belastung der Maschine regelmäßig zu Unterbrechungen im Einzug kommt („No-Stress“-Sicherheit).

Die massebezogene Durchsatzleistung des elektrischen Trommelhackers (in $\text{Srm}/t_{\text{atro}}$) zeigt hinsichtlich der Maschineneinstellungen dieselben Tendenzen wie die volumenbezogene, hinsichtlich der Baumart allerdings keinen Einfluss. Bei den zapfwellenbetriebenen Hackern konnten für die härtere Baumart (Buche) sogar höhere Durchsatzleistungen erzielt werden als für Fichte. Das geringere Schüttvolumen wird demnach durch höhere Rohdichten kompensiert, weshalb sich beim Hacken harter Baumarten mit längeren Produktionszeiten im Wald, auf die Masse und damit auf den Energiegehalt der Brennstoffe bezogen jedoch keine Unterschiede zeigen.

Der spezifische Energiebedarf war bei den stationären Versuchen direkt abhängig von der Durchsatzleistung. Eine hohe Auslastung der Maschine ist somit für die energieeffiziente Produktion ausschlaggebend, wobei die Überlastung der Maschine dringend vermieden werden sollte. Vor allem die Verwendung stumpfer Messer führt dabei zu deutlich höheren Verbräuchen durch Überlastung. Insgesamt lag der Energieverbrauch jedoch auch bei ungünstigen Bedingungen immer noch über 1 % der im Holz gespeicherten Energie.

Belüftungswiderstand bei der technischen Trocknung. Der spezifische Belüftungswiderstand in Pa/m ist ein essenzieller Parameter für die Dimensionierung der Gebläseleistung bei der technischen Hackguttrocknung. Die hohe Bandbreite unterschiedlicher Hackschnitzelqualitäten erschwert diese Abschätzung, weshalb in der Praxis die Gebläseleistung häufig überdimensioniert wird. Die damit einhergehenden hohen Energieverbräuche könnten somit vermieden werden.

Der Belüftungswiderstand wurde für 95 Hackschnitzelproben aus den Feldversuchen und den stationären Versuchen in einem selbstkonstruierten Belüftungskanal experimentell bestimmt. Der Belüftungswiderstand zeigte aufgrund der sehr unterschiedlichen Hackschnitzelproben eine große Wertespanne (von 10,7 bis 100,2 Pa/m Schüttgut bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s). Feinkörnige Hackschnitzel zeigten dabei generell höhere Widerstände als grobe Hackschnitzel.

Aus den Messdaten lassen sich für jedes Schüttgut mittels Modell-Regressionen (nach Ramsin, Shedd, Hukill & Ives und Ergun) zwei materialspezifische Parameter a und b abschätzen. Mithilfe dieser Materialparameter kann der Belüftungswiderstand für jedes Schüttgut und jede Belüftungsgeschwindigkeit gezielt angegeben werden. Multiple lineare Regressionsanalysen wurden verwendet, um die Parameter a und b anhand einfach messbarer physikalischer Größen (Schüttdichte, Stauchfaktor, Partikelgröße, Partikelform) abschätzen zu können. Dabei wurden jeweils zwei Modelle, ein „wissenschaftliches“ und ein „vereinfachtes“ Modell entwickelt. Das „wissenschaftliche“ Modell verwendet alle verfügbaren physikalischen Brennstoffparameter, das „vereinfachte“ Modell beschränkt sich auf die Schüttdichte, den Stauchfaktor und zwei Siebfraktionen.

Mittels des wissenschaftlichen Modells lassen sich die Einflussgrößen auf den Belüftungswiderstand mit hoher Genauigkeit abbilden (R^2 der modellierten Parameter a und b jeweils $> 0,83$). Demnach steigt der spezifische Widerstand bei Hackgut mit hoher Schüttdichte, hohem Feinanteil und einer zerfaserten Partikelform. Ausschlaggebend ist

somit sowohl die Größe als auch die Oberflächenbeschaffenheit des Schüttguts. Weiterhin lässt sich die Verwendung scharfer Messer beim Hacken im Hinblick auf eine anschließende Belüftung empfehlen.

Das „vereinfachte“ Modell erlaubt die schnelle Abschätzung des Belüftungswiderstands in der Praxis, wobei aufgrund der geringeren Anzahl an Brennstoffparametern das Modell eine geringere Genauigkeit besitzt (R^2 der modellierten Parameter a und $b \geq 0,7$).

Umrechnungsfaktoren und Schätzverfahren. In Literatur und Praxis wird eine Vielzahl von Umrechnungsfaktoren und Schätzverfahren verwendet, um zu erwartende Hackschnitzelmengen zu quantifizieren. Aus der Praxis wird regelmäßig von Unsicherheiten bei der Anwendung und Ungenauigkeiten in den Ergebnissen berichtet. Verfahren mit verlässlichen Ergebnissen bedingen dabei i. d. R. aufwendige Messungen. Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Messungen an Hackholzpoltern und den daraus erzeugten Hackschnitzeln sowohl unter Praxisbedingungen im Wald als auch bei stationären Versuchsreihen vorgenommen. Aus den Erhebungen unter Praxisbedingungen wurde ein Schätzverfahren abgeleitet, das mit geringem Messaufwand eine hinreichend verlässliche Einschätzung des zu erwartenden Hackschnitzelvolumens aus dem Poltervolumen im Wald erlaubt.

Die vorgefundenen Polterformen wurden mit verschiedenen geometrischen Formeln beschrieben und die Abweichung der Ergebnisse von der realen Polterform ermittelt. Zur Ermittlung des Volumens von Energierundholzpoltern wird die Quaderformel (Länge \times mittlere Höhe \times Tiefe) unter Verwendung der mittleren Höhe aus dem Sektionsverfahren empfohlen. Beim Waldrestholz liefert die vereinfachte Zylinderformel ($0,8 \times$ Länge \times Höhe \times Tiefe) gute Ergebnisse.

Der Zusammenhang zwischen Poltervolumen und erwarteter Hackschnitzelmenge wird unter Berücksichtigung des Anteils der Kronenfußflächen an der Polterstirnfläche betrachtet. Dabei zeigte sich, dass Waldrestholzpolter typischerweise Anteile der Kronenfußflächen von bis zu 40 %, Energierundholzpolter von 40 bis 75 % der Polterstirnfläche aufweisen. Je Raummeter Poltervolumen sind je nach Anteil 0,4 bis 1,8 Srm Hackschnitzel zu erwarten. Zur schnellen und praxistauglichen Einschätzung des Kronenfußflächenanteils wird ein Fotokatalog in Form eines Merkblatts erstellt.

Neben den Volumenschätzverfahren über die Hackholzpolter wurde der Umrechnungsfaktor vom Festmeter auf den Schüttraummeter bei den stationären Versuchen analysiert und mit Werten aus der Literatur verglichen. Zur einfacheren Abschätzung des absoluten Holzvolumens wurde hierbei Energierundholz verwendet.

Im Gegensatz zum Polterschätzverfahren lag der Faktor S_{rm}/m^3 relativ einheitlich bei $2,5 S_{rm}/m^3$ (mit Rinde) bzw. bei $3,0 S_{rm}/E_{fm}$ (ohne Rinde). Lediglich bei Stammdurchmessern < 10 cm stieg der auf das forstliche Volumen bezogene Umrechnungsfaktor, d. h. der S_{rm}/E_{fm} (ohne Rinde), aufgrund des bei der Rundholzvermarktung üblichen Rindenabzugs deutlich an. Unterschiedliche Maschineneinstellungen am Hacker führten zu geringen, jedoch vernachlässigbaren Unterschieden aufgrund unterschiedlicher Partikelgrößenverteilungen.

Analog zu den Feldversuchen war auch bei den stationären Versuchen die Holzdichte im Polter, gemessen über das Festmaß, ein guter Indikator für die Umrechnung von Festmeter auf Raummeter bzw. von Raummeter auf Schüttraummeter.

Fazit. Das Forschungsprojekt „Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel“ liefert eine Vielzahl an Verfahrenskennzahlen zur Bereitstellung von Hackschnitzeln. Dabei konnten in jedem der Einzelkapitel Optimierungspotenziale für die jeweiligen Teilbereiche aufgezeigt werden. Das Projekt ermöglicht somit eine zunehmende Professionalisierung der Hackschnitzelbereitstellung sowie der Vermarktung der Brennstoffe.

Quellenverzeichnis

- [1] AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K. (2007): Energieholzbereitstellung mit Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingenaggregat, Fallstudie im Forstbetrieb Fürst Esterhazy'sche Privatstiftung Lockenhaus. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, 29 Seiten
- [2] AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K. (2007): Energieholzmehrmengen bei Seilnutzung im Baumverfahren, Fallstudie in der Prinz Reuss'schen Forstverwaltung Mautern sowie im Forstbetrieb Franz Mayr-Meinhof-Saurau. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, 30 Seiten
- [3] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN E. V. (2010): Erneuerbare Energien 2020 – Potentialatlas Deutschland. 2. Aufl., Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (AEE), Februar 2010, 34 Seiten
- [4] AGRAR Plus GmbH (2003): Optimierung der Bereitstellungskette von Waldhackgut. Wien: Österreichische Bundesforste AG Consulting (ÖBfconsulting) und Universität für Bodenkultur, 94 Seiten
- [5] AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE) (2003): ASAE Standard D272.3 DEFC01: Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and perforated metal sheets. St. Joseph: ASAE, 8 Seiten
- [6] ASSIRELLI, A.; CIVITARESE, V.; FANIGLIULO, R.; PARI, L.; POCHI, D.; SANTANGELO, E.; SPINELLI, R. (2013): Effect of piece size and tree part on chipper performance. *Biomass & Bioenergy*, Jg. 54, Nr. 7, S. 77–82
- [7] BARKOWSKI, R. (2013): Automatisierte fotogrammetrische Rohholzvermessung mit AForRS. *AFZ – Der Wald*, Jg. 68, Nr. 21, S. 34–36
- [8] BARONTINI, M.; SCARFONE, A.; SPINELLI, R.; GALLUCCI, F.; SANTANGELO, E.; ACAMPORA, A.; JIRJIS, R.; CIVITARESE, V.; PARI, L. (2014): Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass & Bioenergy*, Jg. 62, Nr. 3, S. 17–25
- [9] BAUER, J.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; BURGER, F. (2006): Energieholzmarkt Bayern: Analyse der Holzpotentiale und der Nachfragestruktur. LWF Wissen, Nr. 53. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 67 Seiten, ISSN 0945-8131
- [10] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF) (2012): Hackschnittel richtig lagern! LWF-Merkblatt 11, Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 4 Seiten
- [11] BAYERISCHE STAATSFORSTEN (2009): Grundsätze zur Bereitstellung von Energieholz. Regensburg: Bayerische Staatsforsten AöR (BaySF), 7 Seiten
- [12] BAYERISCHE STAATSFORSTEN (2009): Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitteln. Regensburg: Bayerische Staatsforsten AöR (BaySF), 8 Seiten
- [13] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1990): Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. Zusammengestellt für den Gebrauch in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. Auflage 1990, München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BaySTMELF), 334 Seiten

- [14] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2010): Holzeinschlag und Holzverkauf. Wegweiser für bayerische Waldbesitzer. Auflage 2010, München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BaySTMELF), 83 Seiten
- [15] BECK, J.; KÖLLING, C.; DIETZ, E. (2013): Das Bayerische Standortinformationssystem. LWF aktuell, Jg. 20, Nr. 94 (3), S. 4–7, ISSN 4035-4098
- [16] BECKER, G.; CREMER, T.; SAUTER, U. (2007): Mobilisierung und wirtschaftliche Nutzung von Rohholz aus Wald und Landschaft zur Energieerzeugung. Osnabrück: Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 257 Seiten
- [17] BIERNATH, D. (2010): Der FKG 650; Kneifen und Schneiden mit einem Aggregat. Forstmaschinen-Profi, Jg. 17, Nr. 5 (Mai), S. 16–17
- [18] BIERNATH, D. (2010): Hier kann man sich entfalten. Das mobile Zwischenlager nimmt fast 200 Schüttraummeter auf. Forstmaschinen-Profi, Jg. 17, Nr. 4 (April), S. 18–19
- [19] BIERNATH, J. (2010): Gehacktes zum Mitnehmen. Forstmaschinen-Profi, Jg. 17, Nr. 5 (Mai), S. 18–19
- [20] BIERNATH, J. (2011): Der L-ENZ ist da. Neues Trocknungssystem für Brennholz & Co. Forstmaschinen-Profi, Jg. 18, Nr. 1 (Januar), S. 32–33
- [21] BJÖRHEDEN, R. (1991): Basic time concepts for international comparisons of time study reports. Journal of Forest Engineering, Jg. 2, Nr. 2, S. 33–39
- [22] BJÖRHEDEN, R.; APEL, K.; SHIBA, M.; THOMPSON, M. (1995): Forest work study nomenclature. Garpenberg: Swedisk University of Argicultural Science, Department of Operational Efficiency, Schweden, 16 Seiten
- [23] BJÖRKLUND, Ö.; ELIASSON, L. (2011): Effects of knife wear on the performance and fuel consumption for a drum chipper. In: FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE (INFRES) (Hrsg.): FORMEC 2013 – 46. International Symposium on Forestry Mechanisation, 30. September – 02. Oktober 2013, Stralsund, Germany, s. p.
- [24] BÖHM, T.; HARTMANN, H. (2002): Größenverteilung von Holzhackschnitzeln. Ein Vergleich der Bestimmungsmethoden. Landtechnik, Jg. 57, Nr. 3, S. 152–153
- [25] BÖHM, T.; HARTMANN, H. (2005): Bestimmung der Schüttdichte von Biomassebrennstoffen. Landtechnik, Jg. 60, Nr. 3, S. 158–159
- [26] BRECHT, K.; HEINRICH, B. (2011): Durchs Raster fallen für mehr Qualität. Erste KWF-Marktübersicht stationärer und mobiler Hackschnitzel-Siebanlagen. Forstmaschinen-Profi, Jg. 18, Nr. 8 (August), S. 72–77
- [27] BRUMMACK, J. (2010): Es geht auch ohne Fremdenergie. Wald und Holz, Nr. 9, S. 34–36
- [28] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1983): Umrechnungszahlen für Rohholz. Anlage zum Schreiben vom 20.09.1983 Az. 613-7164/4. In: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.): Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald, 32 Seiten

- [29] BUNDESMINISTERIUM FÜR NATUR, UMWELT UND REAKTORSICHERHEIT (2013): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung. 1. Aufl., Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 112 Seiten
- [30] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 32 Seiten
- [31] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2014): Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland. Stand August 2014, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 41 Seiten
- [32] CARMEN E. V. (2007): Richtiges Lagern von Holzhackschnitzeln für Heizwerke: Vermeidung von Bränden durch Selbstentzündung. URL: www.carmen-ev.de (Stand: Januar 2014)
- [33] CARMEN E. V. (2014): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln – der Energieholzindex. URL: <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel> (Stand: Oktober 2014)
- [34] CHRYSSOLOURIS, G. (1992): Manufacturing systems – theory and practice. New York: Springer, 407 Seiten
- [35] CREMER, T. (2008): Bereitstellung von Holzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft. Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse. Dissertation. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität, Fakultät für Forst und Umweltwissenschaften, 199 Seiten
- [36] MUMME, M.; GÖGGERLE, T.; FEUERBORN, B. (2012): Jeder Tropfen zählt. DLZ-agrarmagazin, Jg. 63, Nr. 6, S. 20–26
- [37] DEUTSCHER FORSTWISSENSCHAFTSRAT E. V. & DEUTSCHER HOLZWIRTSCHAFTSRAT E. V. (2014): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). 1. Aufl. Unveröffentlichte Arbeitsversion, Stand 31.03.2014
- [38] DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG (RAL) (2008): Güte- und Prüfbestimmungen Brennholz. RAL – GZ 451, Endfassung Oktober 2008. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, Berlin: Beuth-Verlag
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG (RAL) (2011): Vergabegrundlage für Umweltzeichen („Blauer Engel“): Technisch getrocknete Holzhackschnitzel/Holzpellets. RAL-UZ 153, St. Augustin, 22 Seiten
- [40] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2000): DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme. Anforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, 46 Seiten
- [41] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2007): DIN 30722-1. Abrollkipperfahrzeuge, Abrollbehälter – Teil 1: Abrollkipperfahrzeuge bis 26 t, Abrollbehälter System 1570 aus Stahl. Berlin: Beuth-Verlag
- [42] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14588 Feste Biobrennstoffe – Definitionen und Beschreibungen. Berlin: Beuth Verlag, 8 Seiten

- [43] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14774-2. Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung. Berlin: Beuth-Verlag, 9 Seiten
- [44] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14774-3. Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes – Verfahren der Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in gewöhnlichen Analysenproben. Berlin: Beuth-Verlag, 8 Seiten
- [45] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14775. Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [46] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14780. Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung. Berlin: Beuth-Verlag, 22 Seiten
- [47] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14918. Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Heizwertes. Berlin: Beuth-Verlag, 60 Seiten
- [48] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14961-1. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen. Berlin: Beuth-Verlag, 58 Seiten
- [49] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 14961-4. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen. Berlin: Beuth-Verlag, 13 Seiten
- [50] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 15103. Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [51] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN EN 15149-1. Feste Brennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber. Berlin: Beuth-Verlag, 15 Seiten
- [52] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 14778. Feste Brennstoffe – Probennahme. Berlin: Beuth-Verlag, 61 Seiten
- [53] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 15104. Feste Brennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff – Instrumentelle Verfahren. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [54] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 15290. Feste Brennstoffe – Bestimmung von Hauptelementen – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [55] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 15297. Feste Brennstoffe – Bestimmung von Nebenbestandteilen. Berlin: Beuth-Verlag, 9 Seiten
- [56] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2011): DIN EN 15370. Feste Brennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens von Asche. Berlin: Beuth-Verlag, 10 Seiten
- [57] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (1997): DIN EN 844-2. Rund- und Schnittholz – Terminologie – Teil 2: Allgemeine Begriffe über Rundholz. Berlin: Beuth-Verlag

- [58] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-1. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, 60 Seiten
- [59] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-2. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Einteilung von Holzpellets. Berlin: Beuth-Verlag, 15 Seiten
- [60] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-3. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 3: Einteilung von Holzbriketts. Berlin: Beuth-Verlag, 15 Seiten
- [61] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-4. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Einteilung von Holzhackschnitzeln. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten
- [62] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-6. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 6: Einteilung von nicht-holzigen Pellets. Berlin: Beuth-Verlag, 15 Seiten
- [63] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): DIN EN ISO 17225-7. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 7: Einteilung von nicht-holzigen Briketts. Berlin: Beuth-Verlag, 14 Seiten
- [64] DIETER, M.; ENGLERT, H. (2001): Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft, Institut für Ökonomie, 40 Seiten
- [65] EBERHARDINGER, A. (2007): „Sieben auf einen Streich“ Erstdurchforstung mit Mehrfachfällkopf. *Waldforschung aktuell, Nachrichten aus dem Zentrum Wald, Forst, Holz, LWF aktuell*, Jg. 14, Nr. 61, S. 37–38
- [66] EBERHARDINGER, A. (2010): Energieholzernte innovativ. Auf der Suche nach Lücken im Stück-Masse-Gesetz bieten Ernteverfahren mit Sammelaggregaten neue Möglichkeiten in der Energieholzbereitstellung. *LWF aktuell*, Jg. 17, Nr. 74, S. 16–18
- [67] EBERHARDINGER, A. (2011): Innovative Verfahrenstechnik bei der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung. Dissertation. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, 244 Seiten
- [68] EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009): Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung. Freising: Technische Universität München, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, 162 Seiten
- [69] ECLARON GMBH (2014): Biomasseatlas – Abfrage nach Leistung 0-101 kW, Heizart Holzhackschnitzel, Bundesland Bayern, Datum 01/2005–12/2013. URL: <http://www.biomasseatlas.de> (Stand April 2014)
- [70] ENCKE, B.-G. (2007): Die Forstbetriebe als zuverlässige Partner am Energieholzmarkt. *AFZ – Der Wald*, Jg. 62, Nr. 21, S. 1138–1139
- [71] ERGUN, S. (1952) Fluid flow through packed columns. *Chemical engineering progress: CEP*, Jg. 48, Nr. 2, S. 89–94

- [72] ERNI, V.; LEMM, R.; FRUTIG, F.; BREITENSTEIN, M.; RIECHSTEINER, D.; OSWALD, K.; THEES, O. (2003): HeProMo – Produktivitätsmodelle für Holzerntearbeiten. Windows-Software. Version 1.xx. Eidg. Forschungsanstalt WSL. Birmensdorf. Online-Version aktualisiert, Stand 10.11.2004
- [73] Ettl, R.; GÖTTLEIN, A. (2007): Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen. AFZ – Der Wald, Jg. 62, Nr. 14, S. 756–758
- [74] 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 & Bioenergy, Jg. 59, Nr. 12, S. 468–476
- [75] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) (2013): Handbuch Bioenergie Kleinanlagen. 3. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 195 Seiten
- [76] FADLER, C. (2013): Reduzierter Nährstoffentzug bei der Energieholzernte am Beispiel des Verfahrens „Energierundholz“. Masterarbeit. Freising-Weihenstephan: Technischen Universität München, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement. 114 Seiten
- [77] FEHRLE, M. (2011): Scharfe Zwicker für scharfe Rechner. Forst & Technik, Jg. 23, Nr. 9, S. 66–67
- [78] FEHRLE, M. (2011): ISE – das neue Energieholzsortiment. Forst & Technik, Jg. 23, Nr. 5, S. 18–20
- [79] FEICHT, E. (2002): Hackschnitzel-Alveolitis. Gesundheitliche Probleme bei der Handhabung und Lagerung von Hackschnitzeln. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.): Materialien der LWF, Nr. 3, 92 Seiten
- [80] FELLER, S.; WEBENAU, B.; WEIXLER, H.; KRAUSENBOECK, B.; GÖLDNER, A.; REMLER, N. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.), 105 Seiten
- [81] FELLER, S.; REMLER, N.; WEIXLER, H. (1998): Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung – Ergebnisse einer Arbeitsstudie am Hackschnitzel-Harvester. Freising: Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), 76 Seiten.
- [82] FENZ, B.; STAMPFER, K. (2007) Motormanuelle Holzernte mit Waldhackgutbereitstellung. Fallstudien im Laubholz – Montecuccoli'sches Gut Mitterau. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, 26 Seiten
- [83] FRIEDRICH, S.; GAGGERMEIER, A.; HIENDLMEIER, S.; ZETTINIG, C. (2014): Energieholzmarkt Bayern 2012 – Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, (unveröffentlicht)
- [84] GÖTTLEIN, A.; WEIS, W. (2011): Stoffliche Nachhaltigkeitskriterien für die bayerische Forstwirtschaft. Freising: Kuratorium für forstliche Forschung in Bayern, 140 Seiten
- [85] GÖTTLEIN, A.; WEIS, W. (2012): Nachhaltige Biomassenutzung. LWF aktuell, Jg. 19, Nr. 90, S. 44–47

- [86] GUBA, E.; KUPRAT, H.; FÜLLGRABE, R.; HOHENDORF, F.; KOHRS, T.; BEHR, S. (2008): Selektive Durchforstung in Laubholzjungbeständen mit Fäller-Sammler. In: KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (Hrsg.): „Holz heiß begehrt – eine Branche macht mobil“, 15. KWF-Tagung 2008 Schmallebenberg, Tagungsführer. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., S. 89–91
- [87] GUBA, E.; KUPRAT, H.; FÜLLGRABE, R.; HOHENDORF, F.; KOHRS, T.; BEHR, S. (2008): Energieholzgewinnung aus Lichtraumprofilauflieb. In: KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (Hrsg.): „Holz heiß begehrt – eine Branche macht mobil“, 15. KWF-Tagung 2008 Schmallebenberg, Tagungsführer. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., S. 92–94
- [88] HAHN, J. (2010): Aktuelle Entwicklungen im Energieholzsektor. LWF aktuell, Jg. 17, Nr. 74, S. 13–15
- [89] HARTMANN, H. (2009): Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, S. 333–374
- [90] HARTMANN, H. (2009): Transport, Lagerung, Konservierung, Trocknung. In: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, S. 277–332
- [91] HARTMANN, H.; BÖHM, T.; MAIER, L. (2000): Naturbelassen biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) (Hrsg.), München: Selbstverlag, Reihe „Materialien“, 150 Seiten
- [92] HEINEK, S.; POLANZ, S.; HUBER, M.B.; HOFMANN, A.; MONTHALER, G.; FUCHS, H. P.; LARCH, C.; GIOVANNINI, A. (2013): Biomass conditioning – degradation of biomass during the storage of woodchips. In: ELDRUP, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): 21. European Biomass Conference & Exhibition, 3.–7. Juni 2013, Bella Center, Copenhagen, Denmark, Session 1AO.3.5, S. 11–20
- [93] HEINIMANN, H. R.: (2001) Forstliche Verfahrenstechnik I, Grundzüge und Rahmenbedingungen technischer Produktionssysteme, Vorlesungsskript. Zürich: ETH Zürich, Stand: Sommersemester 2001, s. p.
- [94] HEINIMANN, H. R.: (2001) Forstliche Verfahrenstechnik III, Analyse, Gestaltung und Steuerung technischer Produktionssysteme, Vorlesungsskript. Zürich: ETH Zürich, Ausgabe Sommersemester 2001, s. p.
- [95] HEINRICH, B. (2011): Hacker. Forst & Technik, Jg. 23, Nr. 2, S. 24
- [96] HEINRICH, B. (2012): Welches Aggregat wozu? Einsatzbereiche und Grenzen von Fäller-Bündler-Aggregaten. Forstmaschinen-Profi, Jg. 19, Nr. 4 (April), S. 30–35
- [97] HEINRICH, B. (2012): Das Sortiment entscheidet! Fäller-Bündler-Aggregate „light“ – welches Aggregat für welchen Zweck? Forstmaschinen-Profi, Jg. 19, Nr. 6 (Juni), S. 82–88
- [98] HEINRICH, B.; KRÄMER, G. (2013): Kleines Einmaleins der Trocknungstechnik. Forstmaschinen-Profi, Juni, S. 40–44

- [99] HEPERLE, F. (2007): Energieholz – Konkretisierung betrieblicher Nutzungspotentiale. FVA-Einblick, Nr. 3, S. 2–4
- [100] HEPERLE, F. (2010): Prognosemodell zur Abschätzung regionalen Waldenergieholzpotentials auf der Grundlage forstlicher Inventur und Planungsdaten unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Nutzungseinschränkungen. Dissertation. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität, Fakultät für Forst und Umweltwissenschaften, 166 Seiten
- [101] HINTERREITER, S. (2010): Bestimmung und Einflussgrößen der Brückenbildung bei der Lagerentnahme von biogenen Festbrennstoffen. Dissertation, Freising-Weihenstephan: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, 166 Seiten
- [102] HÖLDRICH, A.; HARTMANN, H.; DECKER, T.; REISINGER, K.; SOMMER, W.; SCHARDT, S.; WITTKOPF, M.; OHRNER, G. (2006): Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren. Berichte aus dem TFZ, Nr. 11. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 274 Seiten, ISSN 1614-1008
- [103] HOLZLEITNER F.; KANZIAN C.; HÖLLER N. (2013). Monitoring the chipping and transportation of wood fuels with a fleet management system. *Silva Fennica*, Jg. 47, Nr. 1, S. 1–11
- [104] HUBER, C.; BORCHERT, H.; KREMER, J.; WEIS, W.; MATHIES, D.; GÖTTLEIN, A. (2010): Biomasse- und Nährelementverschiebungen bzw. -verluste bei Harvesterdurchforstungen und deren Auswirkungen auf Bodeneigenschaften und Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Freising-Weihenstephan: Technische Universität München und Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 96 Seiten
- [105] HUKILL, W. V.; IVES, N. C. (1955): Radial flow resistance of grain. *Agricultural Engineering*, Jg. 25, Nr. 5, S. 332–342
- [106] HUMMEL, J.; OERTLE, A.; STERNBERG, J. (2005): Das neue große Forstmaschinen-Buch. Königswinter: Heel. 168 Seiten
- [107] IFA (2013): Maschinenkosten-Kalkulator. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie, URL: <http://www.uni-forst.gwdg.de/forst/iwf> (Stand: 12.12.2013)
- [108] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2000): ISO 565. Test sieves – Metal wire cloth, perforated metal plate and electroformed sheet – Nominal sizes of openings. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 3 Seiten
- [109] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2006): ISO 13322: Particle size analysis. Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 32 Seiten
- [110] JACOBSEN, C.; RADEMACHER, P.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K. J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten, Literaturstudie und Datensammlung. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Band 69, Göttingen: Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, 81 Seiten

- [111] JENSEN, P. D.; BECH, K. S.; HARTMANN, H.; HINTERREITER, S.; LAZDINS, A.; BARDULE, A. ET AL. (2010): Methods for determining impurities in solid particulate biofuels. In: WIRKNER, R.; WITT, J.; SEYFERT U. (Hrsg.): BioNorm II – Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards, Specific Targeted Research or Innovation Projekt, Project contract no. 038644, 01.01.2007–31.12.2009, Final Report, 11. Januar 2010. Leipzig: German Biomass Research Centre (DBFZ), European Commission (EC), S. 27–36
- [112] JERNELÖV, A. (1975): Microbial alkylation of metals. Paper. In: HUTCHINSON, T. C. (Hrsg.): International Conference on Heavy Metals in the Environment, Toronto, October 27, Proceedings. Toronto, Ontario, Canada, S. 845–859
- [113] JÖNSSON, A. (2012): Hacken, Pressen, Verpacken. Forst & Technik, Jg. 24, Nr. 7, S. 22–23
- [114] KABATA-PENDIAS, A. (2011): Trace Elements in Soils and Plants. 4. Aufl. Boca Raton: CRC-Press, 520 Seiten, ISBN 978-1-4200-9368-1
- [115] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 1030 Seiten, ISBN 978-3-540-85094-6
- [116] KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut, Verfahren Energieholz Bündel im Gebirge. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwirtschaften, 32 Seiten
- [117] KANZIAN, C.; FENZ, B.; HOLZLEITNER, F., STAMPFER, K. (2006): Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass. Fallbeispiele aus Laub- und Nadelholz. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwirtschaften, 29 Seiten
- [118] KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; KINDERMANN, G.; STAMPFER, K. (2006): Regionale Energieholzlogistik Mittelkärnten. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwirtschaften, 133 Seiten
- [119] KNIGGE, W.; SCHULZ, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte. Singhofen: Parey, 584 Seiten
- [120] KOLB, E.; GÖTTLEIN, A. (2012): Regionale Bewertung erntebedingter Nährstoffentzüge. AFZ – Der Wald, Jg. 67, Nr. 15, S. 4–7
- [121] KÖLLING, C. (2010): Macht sauer wirklich lustig? LWF aktuell, Jg. 17, Nr. 78, S. 21–24
- [122] KÖLLING, C. (2010): Maß halten. Biomassenutzung kann Produktionskapital verzehren. LWF aktuell, Jg. 17, Nr. 78, S. 28–31
- [123] KÖLLING, C.; GÖTTLEIN, A.; ROTHE, A. (2007): Energieholz nachhaltig nutzen. LWF aktuell, Jg. 14, Nr. 61, S. 32–36
- [124] KORTEN, S.; HEINDL, U. (2008): Mehr Effizienz im Rundholzholztransport. LWF aktuell, Jg. 15, Nr. 65, S. 12–13
- [125] KRÄMER, G. (2012): Scheitholz & Hackschnitzel. AFZ – Der Wald, Jg. 67, Nr. 10–11, S. 79–81

- [126] KRESS, R. (2010): Raurica Waldholz AG. Studie zur Polter- und Hackschnitzelschätzung. Ein Soll-Ist-Vergleich. 21 Seiten
- [127] KRISTENSEN, E. F.; KOFMANN, P. D.; DAUGBJERG JENSEN, P. (2003): Counter pressure on ventilation of different types of wood chips and chunks. *Biomass & Bioenergy*, Jg. 25, Nr. 4, S. 399–408
- [128] KUBATTA-GROÙE, M. (2011): Die Buche kommt – was ist mit der Fichte? *Forst & Technik*, Jg. 23, Nr. 5, S. 40–41
- [129] KUDERNATSCH, T.; STETTER, U.; KÖLLING, C. (2010): Ein Viertel der Wälder ist sauer – In diesen Gebieten ist Waldkalkung ab sofort förderfähig. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, Jg. 200, Nr. 17, S. 54–55
- [130] KÜHMAIER, M., KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K. (2007): Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwirtschaften, 283 Seiten
- [131] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2004): Tagungsführer zur 14. KWF-Tagung 2004 in Groß-Umstadt. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forstwirtschaft, 142 Seiten
- [132] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2008): Holz heiß begehrt – eine Branche macht mobil. Tagungsführer zur 15. KWF-Tagung 2008 in Schmallingenberg. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forstwirtschaft, 157 Seiten
- [133] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2012): Faszination Forstwirtschaft – Durch Zusammenarbeit gewinnen. Tagungsführer zur 16. KWF-Tagung 2012 in Bopfingen. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forstwirtschaft, 181 Seiten
- [134] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2013): Forstmaschinen vorauskalkulieren; Hintergründe, KWF-Richtwerte und Berechnungsbeispiele. *KWF Merkblatt*, Nr. 17, 35 Seiten
- [135] LAITILA, J.; VÄÄTÄINEN, K. (2012): Truck transportation and chipping productivity of whole trees and delimbed energy wood in Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Jg. 33, Nr. 2, S. 199–210
- [136] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER VORARLBERG (2005): Energie aus Holz. Voralberg: Landwirtschaftskammer Voralberg, 110 Seiten
- [137] LECHNER, H. (2011): Massenanzahl und Nettoflächenerlöse bei der Energieholzbereitstellung. Dissertation. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 223 Seiten
- [138] LIPTAY, P. (2012): Energieholz effizient ernten. *Arbeit im Wald*, April, 8 Seiten
- [139] LÖFFLER, H. (1992): Arbeitswissenschaft für Studierende der Forstwissenschaft, Manuskript zu den Lehrveranstaltungen. 3., neu bearb. Aufl. Weihenstephan, 391 Seiten
- [140] LÖFFLER, H. (1989): Manuskript zu den Lehrveranstaltungen: Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte). München: Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München, 516 Seiten

- [141] LOHMANN, U. (2003): Holz-Lexikon. 4. Aufl. Leinefelden: DRW-Verlag, 689 Seiten
- [142] MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. (2012): Good practice guidelines for biomass production studies. Cost Action FP-0902, wg 2. Sesto Fiorentino: CNR IVALSA, Italien, 50 Seiten
- [143] MANTAU, U. (2009): Holzrohstoffbilanz Deutschland: Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012. vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft, Nr. 327, S. 27–36
- [144] MANTAU, U. (2013): Auswirkungen der stofflichen und energetischen Nutzung auf den Waldholzverbrauch. AFZ – Der Wald, Jg. 68, Nr. 2, S. 22–27
- [145] MARCHI, E., MAGAGNOTTI, N., BERRETTI, L., NERI, F., SPINELLI, R. (2011): Comparing Terrain and Roadside Chipping in Mediterranean Pine Salvage Cuts. Croatian Journal of Forest Engineering, Jg. 32, Nr. 2, S. 587–598
- [146] MEIER, D. (2011): Trocknen für mehr Qualität bei Holzhackschnitzeln. Forstmaschinen-Profi, Jg. 18, Nr. 7 (Juli), S. 51
- [147] MEIWES, K. J.; ASCHE, N.; BLOCK, J.; KALLWEIT, R.; KÖLLING, C.; RABEN, G.; v. WILPERT, K. (2008): Potentiale und Restriktionen der Biomassennutzung im Wald. AFZ – Der Wald, Jg. 63, S. 598–603
- [148] NATI, C.; ELIASSON, L.; SPINELLI, R. (2014): Effect of chipper type, biomass type and blade wear on productivity, fuel consumption and product quality. Croatia Journal of Forest Engineering, Jg. 35, Nr.1, S. 1–7
- [149] NATI, C.; SPINELLI, R.; FABRI, R. (2010): Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. Biomass & Bioenergy, Jg. 34, Nr. 5, S. 583–587
- [150] NEFF, R. (2007): Aufbereitung von Holzhackschnitzeln zur energetischen Verwertung – unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Dissertation. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, 262 Seiten
- [151] NEMESTOTHY, N. (2012): Energieholzzerkleinerung – vom wertvollen Holzrohstoff zum Hackschnitzel oder zu Staub? BFW-Praxisinformation, Nr. 28, S. 24–26
- [152] NEMESTOTHY, N. (2012): Grundlagen für die Normung sowie Optimierung von Herstellung und Nutzung von Hackgut. BFW-Praxisinformation, Nr. 28, S. 21–23
- [153] NEUGEBAUER, G.; STROBL, R. (2007): Dienstleistung, Energieversorgung, Pacht – Neue Geschäftsfelder der Bayerischen Staatsforsten (BaySF). LWF aktuell, Jg. 14, Nr. 56, S. 22–23
- [154] NEUGEBAUER, G.; WITTKOPF, S.; BAUDISCH, C.; GÜNSCHE, F. (2005): Hackschnitzel auf dem Vormarsch. LWF aktuell, Jg. 12, Nr. 48, S. 9–10
- [155] OBERER, F. (2011): Der räumt auf! Neuer Biomasse-Transporter von Candinas Forstlog. Forstmaschinen-Profi, Jg. 18, Nr. 6 (Juni), S. 76–77
- [156] ODENTHAL-KAHABKA, J. (2005): Handreichung Sturmschadensbewältigung. Hrsg. LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG UND LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ. URL: <http://waldwissen.net> (überarbeitete Version, Stand: 21.07.2008)

- [157] OSENSTETTER, S.; FALK, W.; REGER, B.; BECK, J. (2013): Wasser, Luft und Nährstoffe – alles was ein Baum zum Leben braucht. Neue Basiskarten beschreiben Wasserhaushalt, Lufthaushalt und Basenausstattung. LWF aktuell, Jg. 20, Nr. 94, S. 12–17
- [158] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ÖN) (1998): Önorm M7132: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff, Begriffsbestimmungen und Merkmale. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ÖN), 9 Seiten
- [159] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ÖN) (1998): Önorm M7133. Hackgut für energetische Zwecke – Anforderungen und Prüfbestimmungen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ÖN), 7 Seiten
- [160] PAUSCH, R. (2002): Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayerischer Mittelgebirge. Dissertation. München: Technische Universität München, Department für Ökologie und Landschaftsmanagement, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, 301 Seiten
- [161] PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C.; DARIES, W.; EHLERT, D. (2013): Efficient harvest and storage of field wood for profitable production of bioenergy from short rotation coppice. In: ELDRUP, A.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): 21. European Biomass Conference & Exhibition, 3.–7. Juni 2013, Bella Center, Copenhagen, Denmark, Session 1CO.3.1, S. 120–124
- [162] PRETZSCH, H.; MOSHAMMER, R.; DIELER, J.; BÖTTCHER, M.; GÖTTLEIN, A.; WEIS, W.; BLOCK, J.; SCHUCK, J.; GAUER, J. & WUNN, U. (2012): Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte Teil 1: Nährstoffbilanzen wichtiger Waldstandorte in Bayern und Rheinland-Pfalz. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), 204 Seiten
- [163] PURFÜRST, T. (2009): Der Einfluss des Menschen auf die Leistung von Harvestersystemen. Dissertation. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen, 307 Seiten
- [164] RAKEL, T.; DÖBRICH, M.; BAHR, W.; RUICK, S.; HORST, G. (2008): Energieholzgewinnung – Hackschnitzel-Vollernter mit Fäller-/Sammleraggregat. In: KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (Hrsg.): „Holz heiß begehrt – eine Branche macht mobil“, 15. KWF-Tagung 2008 Schmallenberg, Tagungsführer. Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., S. 95–98
- [165] RAKEL, T.; DÖBRICH, M.; WEINHOLD, T.; FRIEDRICH, H.; ZIEGENHALS, F.; QUITTER, R.; MEHNERT, M. (2012): Energieholzgewinnung – Optimale Wertschöpfung bei Aufschluss und Pflege von Nadelholz-Beständen durch Aushaltung von Energie- und Industrieholz. In: KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.): Exkursionsführer der 16. KWF-Tagung, Groß-Umstadt: Kuratorium für Waldarbeit und Forstwirtschaft (KWF), S. 96–99
- [166] RAMSIN, L. K. (1928): Der Gaswiderstand verschiedener Schüttstoffe. *Varme*, Nr. 51, S. 301–303
- [167] RASPE, S.; KENNEL, M.; DIETRICH H.-P. (1999): Untersuchungen an den Waldklimastationen Ebersberg und Flossenbürg. *Waldklima-Stationen Jahrbuch 1999*. Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), S. 136–146

- [168] REFA FACHAUSSCHUSS FORSTWIRTSCHAFT (1998) Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft. REFA Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung, 175 Seiten
- [169] REFA-BRANCHENORGANISATION FORSTWIRTSCHAFT (2008): Organisation in der Forstwirtschaft – mit REFA – Methoden zu effizienten Arbeitsprozessen. 3. Aufl. Darmstadt: REFA Bundesverband e. V., 283 Seiten, ISBN 978-3-935089-08-2
- [170] REUSS, G. (2013): Verbesserung der Dienstleistungsfähigkeit durch überbetriebliche Kooperationen. In: KOMPETENZZENTRUMS HESSENROHSTOFFE (HERO) (Hrsg.) (2013): Tagungsunterlagen zum Fachgespräch „Qualitätssicherung in der Bereitstellungs- und Wertschöpfungskette Energieholz“. Witzenhausen: Kompetenzzentrum HessenRohstoffe (HERO) e. V., 29.08.2013
- [171] RIEGER, G. (1986): Einsatz, Kosten und Leistung forstlicher Maschinen; Mitteilungen der FVA Baden-Württemberg, Nr. 106, 274 Seiten
- [172] ROTTENSTEINER, C.; AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K. (2009): Fällen, Sammeln, Rücken. Forstzeitung, Ausgabe 1, S. 16–17
- [173] SAUTER U. H.; VERHOFF, S.; DEHNING, J. (2009): Gütesortierung nach der Forst-HKS – eine Option für Deutschland? AFZ – Der Wald, Jg. 64, Nr. 14, S. 758–762
- [174] SAUTER, P.; WIPPEL, B.; VÖGTLIN, J.; WEIß, D. (2012): Große Hacker, große Leistung? Forst & Technik, Jg. 24, Nr. 3; S. 26–28
- [175] SAUTER, U. H.; HEPERLE, F.; HÜNLICH, B.; WOHNHAS, M.; KÖHLER, C. (2013) Regionale Abschätzung des Waldenergieholzpotentials – ein Prognosetool für Entscheider. In: FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (FVA) (Hrsg.): Freiburger Forstliche Forschung, Nr. 94, 126 Seiten
- [176] SAUTER, U. H.; SIEMES, P. (2007): Energieholznutzung aus Starkholz. FVA-Einblick, Nr. 3, S. 2–4
- [177] SCHÄFER, R. (2005): Mit Holz heizen und mit Öl fahren – nicht umgekehrt. LWF aktuell, Jg. 12, Nr. 48, S. 17–20
- [178] SCHÖN, C.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P. (2011): User and fuel impacts flue gas emissions of a chimney stove. In: FAULSTICH, M.; OSSENBRINK, H.; DALLEMAND, J. F.; BAXTER, D.; GRASSI, A.; HELM, P. (Hrsg.): 19th European Biomass Conference – From Research to Industry and Markets. Proceedings of the International Conference, Berlin, Germany, 6.–10. Juni 2011. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, S. 960–966
- [179] SCHÖN, H.; AUERNHAMMER, H.; BAUER, R. (1998): Die Landwirtschaft. Band 3: Landtechnik/Bauwesen. 9. Aufl., München: BLV-Verlag, 576 Seiten
- [180] SEINTSCH, B.; WEIMAR, H. (2013): Holzbilanzen 2010 bis 2012 für die Bundesrepublik Deutschland. Thünen Working Paper, Nr. 9, Hamburg: Thünen-Institut für Forstökonomie, 37 Seiten
- [181] SHEDD, C. K. (1953): Resistance of grains and seeds to air flow. Agricultural Engineering, Jg. 34, Nr. 9, S. 616–619
- [182] SLOBODA, B.; GAFFREY, D.; MATSUMURA, N. (1993): Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Jg. 164, Nr. 12, S. 225–228

- [183] SMALTSCHINSKI, T. (2010): Reduktion der Leerfahrten beim Rundholztransport. Allgemeine Forst- und Jagd- Zeitung, Nr. 181, S. 197–205
- [184] SOHNS, H. (2012): Moderne Holzernte. Stuttgart: Ulmer, 256 Seiten
- [185] SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. (2001): A Survey of Italian chipping operations. Biomass & Bioenergy, Jg. 21, Nr. 6, S. 433–444
- [186] SPINELLI, R., VISSER, R.J.M. (2009): Analyzing and estimating delays in wood chipping operations. Biomass and Bioenergy, Jg. 33, Nr. 3, S. 429–433
- [187] SPINELLI, R.; GLUSHKOV, S.; MARKOV, I. (2014): Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost. Biomass & Bioenergy, Jg. 62, Nr. 3, S. 117–122
- [188] SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. R.; MAGAGNOTTI, M. (2005): Testing mobile chippers for chip size distribution. International Journal of Forest Engineering, Jg. 16, Nr. 2, S. 29–35
- [189] 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, Jg. 62, Nr. 7/8, S. 584–589
- [190] SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; PALETTO, G.; PRETI, G. (2011): Determining the impact of some wood characteristics on the performance of a mobile chipper. Silva Fennica, Nr. 45, S. 85–95
- [191] STAMPFER, K. (2002): Optimierung von Holzerntesystemen im Gebirge. Habilitationsschrift. Wien: Universität für Bodenkultur, 96 Seiten
- [192] STETTER, U. (2010): Bodenschutzkalkung? Fraget die Bäume ... LWF aktuell, Jg. 17, Nr. 78, S. 25–27
- [193] THEES, O.; LEMM, R. (2009): Management zukunftsfähiger Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: vdf Hochschulverlag. 816 Seiten
- [194] BODELSCHWINGH, E. v.; PAUSCH, R. (2006): Harvester und Forwarder in einer Maschine, Der Harwarder Valmet 801 Combi im Praxistest. LWF aktuell, Jg. 13, Nr. 39, S. 23–26
- [195] WILPERT, K. v.; BÖSCH, B.; BASTIAN, P.; ZIRLEWAGEN, D.; HEPERLE, F.; HOLZMANN, S.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; KÄNDLER, G.; SAUTER, U. H. (2011): Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Nr. 87 Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), 167 Seiten
- [196] WAZULA, H. (2013): Statistische Auswertung – Messung an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Jahr 2012. In: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (Hrsg.): 17. Arbeitskreis Holzfeuerungen am Technologie und Förderzentrum, Straubing, 13.06.2013, Straubing: Technologie- und Förderzentrum Straubing, s. p.
- [197] WEISE, G.; ROSENBACH, D.; SEELING, U. (2011): Zum Kraftstoffverbrauch von Forstmaschinen. Forst & Technik, Jg. 23, Nr. 7, S. 34–35

- [198] WEISE, G.; ROSENBACH, D.; SEELING, U.; WAGNER, T. (2012): Kraftstoffeinsparung beim Betrieb von Forstmaschinen. AFZ – Der Wald, Jg. 67, Nr. 19, S. 20–23
- [199] WENDISCH, J. (2010): Eröffnungsrede zum 3. Symposium „Waldstrategie 2020“ am 12. April 2010. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V., Berlin
- [200] WITT, J.; THRÄN, D.; RENSBERG, N.; HENNIG, C.; NAUMANN, K.; BILLIG, E.; SAUTER, P.; DANIEL-GROMKE, J.; KRAUTZ, A.; WEISER, C.; REINHOLD, G.; GRAF, T. (2012): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. DBFZ-Report 12, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasse Forschungszentrum, 126 Seiten, ISSN 2190-7943
- [201] WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 200. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 209 Seiten, ISBN 3-933506-31-X
- [202] WITTKOPF, S.; HÖMER, U.; FELLER, S. (2003): Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel – Leistung, Kosten Rahmenbedingungen. Berichte der LWF, Nr. 28, Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 82 Seiten
- [203] WITTKOPF, S.; KRICHBAUM, C.; BAUDISCH, C. (2003): Energieholznutzung und Waldschutz im Einklang. LWF aktuell, Jg. 10, Nr. 39, S. 7–10
- [204] WOLFMAYR, U.; RAUCH, P. (2013): Transportketten forstlicher Biomasse – Stand der Technik und Innovationen. Schweizer Zeitschrift für das Forstwesen, Nr. 164, S. 365–373
- [205] 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 & Bioenergy, Jg. 35, Nr. 5, S. 1960–1966
- [206] ZIMMER, B. (2010): Ökobilanz Waldhackschnitzel. Ergebnisse aus der ökologischen Bewertung belegen: Energie aus Hackschnitzeln ist umweltfreundlich. LWF aktuell, Jg. 10, Nr. 74, S. 22–25
- [207] ZORMAIER, F. (2010): Versorgung von Biomasseheiz(kraft)werken mit Waldhackschnitzel. LWF aktuell, Jg. 10, Nr. 74, S. 19–21

Mündliche Mitteilungen

- [208] ACHHAMMER, M. (2011): Leiter Zentrum für Energieholz der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. (ZfE), persönliche Mitteilung vom 18.04.2011 an Florian Zormaier und Karl Hüttl
- [209] ACHHAMMER, M. (2011): Leiter Zentrum für Energieholz der Bayerischen Staatsforsten A. ö. R. (ZfE), persönliche Mitteilung vom 06.12.2013 an Fabian Schulmeyer und Karl Hüttl
- [210] SCHARNAGEL, S. (SEN.) (2012): 1. Vorsitzender der FBG Neuwald/WN Nord, persönliche Mitteilung vom Dezember 2012 an Karl Hüttl
- [211] WALDINGER, L. (2011): Forst- und Hacker-Dienstleistungs-Unternehmer in Buchbach, Niederbayern, persönliche Auskunft vom 07.09.2011 an Karl Hüttl

[212] WALDINGER, L. (2012): Forst- und Hacker-Dienstleistungs-Unternehmer in Buchbach, Niederbayern, telefonische Auskunft vom 15.11.2012 an Karl Hüttl

9 Anhang

9.1 Fragebogen zur Expertenbefragung

Tabelle 86: Fragebogen zur Expertenbefragung (Abschnitte 4.2.1, 4.3.1)

Fragenkomplex	Frage	Adressaten
Erster Fragenkomplex: Verfahrensketten und Maschinenausstattung	Frage 1: Welche Verfahrensketten wurden in Ihrem FBG/WBV-Gebiet bzw. in Ihrem Zuständigkeitsbereich (AELF, BaySF, ZfE) bzw. in Ihrem Dienstleistungsunternehmen (Hacker- oder Forstunternehmen) im Jahr 2011 für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln am häufigsten eingesetzt?	alle
	Frage 2: Welche Maschinen wurden bei Ihnen bis jetzt in diesem Jahr hauptsächlich eingesetzt?	
	Frage 11: Welche neuen Techniken werden aus Ihrer Sicht bei der Bereitstellungskette von Waldhackschnitzeln in Zukunft an Bedeutung gewinnen?	
Zweiter Fragenkomplex: Verwendete Waldholzsortimente	Frage 3: Bitte charakterisieren Sie die typischen Sortimente, aus denen Waldhackschnitzel produziert werden.	alle
	Frage 16: Wie setzen sich die Waldhackschnitzel hinsichtlich der Baumarten zusammen?	alle außer Forstdienstleister
Dritter Fragenkomplex: Betriebsablauf Hacken	Frage 4: Wo wird überwiegend gehackt?	alle außer Forstdienstleister
	Frage 5: Wie lange lagert das Hackholz (zu hackendes Material) üblicherweise an der Forststraße bzw. dem Lagerplatz, bis es gehackt wird?	
	Frage 6: Welcher Anteil der Waldhackschnitzel wird direkt zum Kunden transportiert (Heiz(kraft)werk, Heizungsanlage)?	alle außer Forstdienstleister, für BaySF durch ZfE
	Frage 7: Auf welche Art und wie lange werden die Hackschnitzel zwischengelagert?	zentral beantwortet
	Frage 8: Werden die Hackschnitzel technisch getrocknet?	
Vierter Fragenkomplex: Brennstoffspezifikationen, Qualität, Normung, Zertifizierung	Frage 9: Welche Qualitätsanforderungen an die Waldhackschnitzel haben die Abnehmer/Kunden überwiegend?	alle außer Forstdienstleister
	Frage 10 a: Welche Normen werden derzeit in den Lieferverträgen angewendet?	alle außer Forstdienstleister, für BaySF durch ZfE
	Frage 10 b: Welche Zertifizierungssysteme werden derzeit in den Lieferverträgen angewendet?	zentral beantwortet
	Frage 10 c: Welche Normen werden aus Ihrer Sicht in Zukunft eine Rolle spielen?	
Fünfter Fragenkomplex: Probleme und Schwachstellen, Forschungsbedarf, Hilfsmittel	Frage 12: Was sind aus Ihrer Sicht die derzeit wichtigsten Probleme bzw. Schwachstellen bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln?	alle
	Frage 13: Welchen Forschungsbedarf sehen Sie konkret im Bereich Bereitstellung und Verkauf von Waldhackschnitzeln?	
	Frage 14: Welche Hilfsmittel für die Bereitstellung und den Verkauf von Waldhackschnitzeln benötigen Sie derzeit?	
Sechster Fragenkomplex: Vermarktungsstrukturen	Frage 15: Wie viel Waldhackschnitzel haben Sie im Jahr 2010 bereitgestellt, gehackt bzw. vermarktet?	alle außer Forstdienstleister und AELF, für BaySF durch ZfE
	Frage 17: Charakterisieren Sie bitte kurz Ihre Kundenstruktur anhand der Anlagengröße.	zentral beantwortet
Sonstige Fragen	Frage 18: Besteht Bereitschaft zur weiteren Mitarbeit im Projekt?	alle

9.2 Literaturquellen zu Modellverfahrensketten

Tabelle 87: Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 1)

Nr.	Autor	Kapitel, Fallstudie o. Ä.	Kurzbeschreibung	MVK
1	AGRAR PLUS GMBH (2003)	Modell Eibiswald (S. 14–19)	Motormanuelles Fällen, Vorliefern und Rücken mit Traktor/Krananhänger	I a
2		Modell Mönichkirchen (S. 20–24)	Fällen und Vorliefern mit Harvester, Rücken mit Forwarder	III a
3		Modell Tamsweg - Baumverfahren (S. 25–30)	Fällen motormanuell, Vorliefern und Rücken mit Seilwindenschlepper	I a
4		Modell Kramsach (S. 31–37)	Restholznutzung, Vorliefern und Rückung mit Seilkran	II
5		Modell Wolkersdorf (S. 45–51)	Fällen und Vorkonzentrieren mit „Zwickeraggregat“ an Bagger	–
6		Modell Klosterneuburg (S. 38–44)	Fällen mit der Motorsäge, Rücken mit Forwarder	I b
7	WITTKOPF et al. (2003) a	Bereitstellungssystem 4.1 (S. 47 ff.)	Fällen mit der Motorsäge, Vorliefern von Hand, Hacken auf der Rückegasse, Vorliefern der Hackschnitzel	IV
8		Bereitstellungssystem 4.2 (S. 49 ff.)	Fällen mit der Motorsäge, Vorliefern mit Rückepferd, Rücken mit Kranrückewagen	–
9		Bereitstellungssystem 4.3 (S. 51 ff.)	Fällen mit der Motorsäge, Vorliefern und Rücken mit Seilschlepper	I b
10		Bereitstellungssystem 4.4 (S. 53 ff.)	Fällen mit Motorsäge, Vorliefern mit Seilschlepper, Rücken und Transport zum Lagerplatz mit Kranrückewagen	–
11		Bereitstellungssystem 4.6 (S. 57 ff.)	Fällen mit der Motorsäge, Vorliefern mit Schlepper/Funkseilwinde, Hacken auf der Rückegasse, „Rückung“ der Hackschnitzel in Container	IV
12		Bereitstellungssystem 4.7 (S. 59 ff.)	Fällen und Vorliefern mit Harvester, Rücken mit Forwarder	III b
13	WITTKOPF (2005)	Logistikkette „Teilmechanisiert – Kleinprivatwald“ (S. 115 ff.)	Fällen: Motorsäge, Vorliefern: händisch bis zur Rückegasse, Hacken auf der Rückegasse, „Rückung“ der Hackschnitzel mit Schlepperanhänger	IV
14		Logistikkette Teilmechanisiert – Seilschlepper“ (S. 118 ff.)	Fällen: Motorsäge, Vorliefern: Seillinie, Rücken: Seilschlepper	I b
15		Logistikkette „Teilmechanisiert – Rückewagen“ (S. 121 ff.)	Fällen: Motorsäge, Vorliefern: Seilschlepper (Seillinienverfahren), Rücken: Rückewagen	I b
16		Logistikkette „Teilmechanisiert – Zangenschlepper“ (S. 124 ff.)	Fällen: Motorsäge im Zweimannverfahren; in der Zangenzzone vorliefern mit Zangenschlepper; außerhalb der Zangenreichweite: Vorliefern mit Seilschlepper (Seilzone); Rücken: Zangenschlepper	I b
17		Logistikkette „Vollmechanisiert – Harvester“ (S. 130 ff.)	Vollmechanisiertes Fällen und Vorliefern mit Harvester, Rücken: Forwarder	III a
18		Logistikkette „Vollmechanisiert – Hackschnitzel-Harvester“ (S. 133 ff.)	Fällen, Vorliefern, Hacken (Rückegasse) und Shuttletransport mit Hackschnitzelharvester	–
19		Logistikkette „Vollmechanisiert – Mehrfachfällkopf“ (S. 136 ff.)	Fällen und Vorliefern mit Harvester mit Mehrfachfällkopf, Ablage an der Rückegasse, Rücken: Forwarder	III b

Tabelle 88: Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 2)

Nr.	Autor	Kapitel, Fallstudie o. Ä.	Kurzbeschreibung	MVK
20	WITTKOPF (2005)	Logistikkette „Vollmechanisiert, Kronenholz-Rückewagen“ (S. 139 ff.)	Rücken der Kronen aus vorangegangenen Hieb mit Kranrückewagen	II
21		Logistikkette „Vollmechanisiert, Kronenholz-Bündler“ (S. 142 ff.)	Sammeln der Kronen mit Forwarder, Konzentration an der Forststraße, Bündeln, Poltern der Bündel	–
22	KANZIAN et al. (2006)	Laubholz, Fläche 1	Rückung der Restholzsortimente mit Forwarder	II
23		Laubholz, Fläche 2	Rückung der Restholzsortimente mit Forwarder	II
24		Laubholz, Fläche 3	Rückung der Restholzsortimente mit Forwarder	II
25		Nadelholz – Eisenerz	Rückung der Restholzsortimente mit Seil/Schlepper	II
26		Nadelholz – Knittelfeld	Rückung der Restholzsortimente mit Seil/Schlepper	II
27		Nadelholz – Stanz	Rückung der Restholzsortimente mit Seil/Schlepper	II
28	AFFENZELLER et al. (2007) a		Fällen: Energieholzaggregat (Fallbeilklingenaggregat) an Ladekran des Krananhängers, Vorliefern mit Ladekran, Rücken mit Traktor und Krananhänger	–
29	AFFENZELLER et al. (2007) b	Bestand 1, Mautern – Prinz Reuss	Fällen: Motorsäge, Vorliefern und Rücken mit dem Laufwagen des Mastseilgeräts	–
30		Bestand 2, Mautern – Zidritz	Fällen: Motorsäge, Vorliefern und Rücken mit dem Laufwagen des Mastseilgeräts	–
31		Bestand 3, Leoben-Hochtal	Fällen: Motorsäge, Vorliefern und Rücken mit Laufwagen des Mastseilgeräts	–
32	EBERHARDINGER (2007)		Fällen/Vorliefern mit Fäller-Bündler-Aggregat am Rückekran an Schlepper	III b
33	FENZ & STAMPFER (2007)	Bestand 1	Fällen mit der Motorsäge, Rücken mit Rückezange an Traktor	I b
34		Bestand 2	Fällen mit der Motorsäge, Rücken mit Rückezange an Traktor	I b
35	SAUTER & SIEMENS (2007)	Versuch ULM; Aushaltungsvariante normal	Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Seilschlepper, Rückung mit Tragschlepper/Forwarder, zusätzlich Spalten des Energieholzes mit Spalter am Bagger	I a
36		Versuch ULM; Aushaltungsvariante plus	Motormanuelles Fällen, Vorliefern mit Seilschlepper, Rückung mit Tragschlepper und Forwarder, zusätzlich: Spalten des Energieholzes am Bagger	I a
37	CREMER (2008)	Bestand 1: Kiefernreinbestand, 42 Jahre	Fällen/Vorliefern mit Fäller-Bündler-Aggregat (Kappmesser, keine Astungsrollen) an Harvester, Rücken mit Forwarder	III b
38		Bestand 3: durchgewachsener Eichenmittelwald	Fällen/Vorliefern mit Fäller-Bündler-Aggregat (Kappmesser, keine Astungsrollen) an Harvester, Rücken mit Forwarder	III b
39		Bestand 2: Kiefernreinbestand, 41 Jahre	Fällen/Vorliefern mit Fäller-Bündler-Aggregat (Kappmesser, keine Astungsrollen) am Harvester	III b
40	GUBA et al. (2008) a		Fällen und Vorliefern mit Harvester mit Energieholzaggregat, Rücken mit Forwarder	III b
41	GUBA et al. (2008) b		Fällen und Vorliefern: Fällaggregat an Kettenbagger	–

Tabelle 89: Literaturquellen zu den Modellverfahrensketten (Teil 3)

Nr.	Autor	Kapitel, Fallstudie o.Ä.	Kurzbeschreibung	MVK
42	RAKEL et al. (2008)		Hackschnitzel – Harvester mit Fäll – Sammler-Aggregat (hydraulische Fällschere) und integrierter Hacker	–
43	ROTTENSTEINER et al. (2008)		Fällen/Vorliefern mit Fäll-Bündler-Aggregat Moipu 400 E an Forwarder („Energieholz- Harwarder“)	–
44	EBERHARDINGER (2011)	Fallstudie Ebersberg (S. 67 ff.)	Fällen/Vorrücken mit Aggregat NaarvaGrip 1500-25e am Kran (Schlepper), Ablage in Rauhbeigen entlang der Rückegasse, Rücken: Rückeanhänger	III b
45		Fallstudie Münchsmünster (S. 81 ff.)	Fällen/Vorrücken mit Aggregat NaarvaGrip 1500-40e am Raupenharvester, Ablage in Rauhbeigen entlang der Rückegasse, Rücken: Rückeanhänger	III b
46		Versuchsbestand „Horgau“ des FB Zusmarshausen: Erstdurchforstung Fichte-Buche (S. 92 ff.)	Fällen/Vorliefern mit Aggregat ABAB 350 am Raupenharvester und Ablage in Rauhbeigen entlang der Rückegasse, Rücken mit Forwarder	III b
47		Fallstudie Freihalden: Jungbestandspflege Fichte (S. 100 ff.)	Fällen: Aggregat ABAB 250 am Raupenharvester und Ablage in Rauhbeigen entlang der Rückegasse, Rücken: Forwarder	III b
48		Versuchsfläche in Glöttweng: Jungbestandspflege „Wiebke“ (S. 108 ff.)	Fällen mit Aggregat ABAB 350 am Raupenharvester und Ablage in Rauhbeigen entlang der Rückegasse, Rücken: Forwarder	III b
49	LIPTAY (2011)		Fällen und Vorliefern mit Energieholzaggregat an Bagger	III b
50	RAKEL et al. (2012)	Variante „Harwarder – Forwarder – Hacker“ für EH	Fällen, Vorliefern und Rücken mit einem Forwarder, ausgerüstet mit Energieholzaggregat mit Astungseinrichtung (Harwarder), Hacken mit fernsteuerbarem Hacker, der durch den Harwarder beschickt wird.	–

9.3 Literaturwerte zu Modellverfahrensketten

Die Nummerierungen der nachfolgenden Tabellen (Tabelle 90 bis

Tabelle 101) beziehen sich auf die Studien aus Tabelle 87, Tabelle 88 und Tabelle 89.

Tabelle 90: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I a zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung											
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt
1	N		0,259		Srm/ PSH15	2,3							40		12,4	
3	N		1,183		Srm/ PSH15								120		24	
35	N	48			Fm/h (MAS)				4–5	16– 18			25– 30			
36	N	48			Fm/h (MAS)				7–8	18– 20			28– 35			

Tabelle 91: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I a zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
1	N		0,259		€/Srm	4,6					0,5		3,3		5,3		17,3
3	N		1,183		€/Srm							6,9	1,6		2,1		15,6
35	N	48			€/Fm	8–9				3–4			4–6				24– 31
36	N	48			€/Fm	5–6				3–4			4–6				19– 27

Tabelle 92: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I b zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung											
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt
6	L		0,604		Srm/PSH15	21					36		80		30	
9	n. a.	10			Srm/h (GAZ)											2,0
9	n. a.	15			Srm/h (GAZ)											2,8
9	n. a.	20			Srm/h (GAZ)											3,5
14	N	10			Srm/h (GAZ)	5,4					5,0		20,8		8,7	1,8
14	N	15			Srm/h (GAZ)	10,5					7,5		20,8		8,7	2,6
14	N	20			Srm/h (GAZ)	15,7					10,0		20,8		8,7	3,1
15	N	10			Srm/h (GAZ)				8,1	11,8			20,8		8,7	3,9
15	N	15			Srm/h (GAZ)				18,3	17,1			20,8		8,7	6,2
15	N	20			Srm/h (GAZ)				28,5	22,5			20,8		8,7	7,8
16	N	10			Srm/h (GAZ)				8,1	17,9			20,8		52,6	4,1
16	N	15			Srm/h (GAZ)				18,3	21,9			20,8		52,6	6,0
16	N	20			Srm/h (GAZ)				28,5	26,0			20,8		52,6	7,1
33	L	16			Srm/PSH15								67,8		24,6	
34	L	33			Srm/PSH15								67,8		24,6	

Tabelle 93: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette I b zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
6	L		0,604		€/Srm	2,90			2,90				2,50		4,40		16,33
9	n. a.	10			€/Srm												16,40
9	n. a.	15			€/Srm												12,60
9	n. a.	20			€/Srm												10,90
14	N	10			€/Srm	3,10					7,00		3,40		4,60		18,00
14	N	15			€/Srm	1,60					4,70		3,40		4,60		14,20
14	N	20			€/Srm	1,00					3,50		3,40		4,60		12,50
15	N	10			€/Srm				6,30	5,50			3,40		4,60		15,20
15	N	15			€/Srm				2,80	3,80			3,40		4,60		10,00
15	N	20			€/Srm				1,80	2,90			3,40		4,60		8,10
16	N	10			€/Srm				10,00	3,10			4,10		1,40		18,60
16	N	15			€/Srm				4,40	2,50			4,10		1,40		12,50
16	N	20			€/Srm				2,90	2,10			4,10		1,40		10,50
33	L	16			€/Srm	1,53	3,17						3,69		2,37		10,75
34	L	33			€/Srm	1,94	3,17						3,95		2,33		11,40

Tabelle 94: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette II zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung											
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt
4	N		0,996		Srm/ PSH15								50,0		20,0	
20	N			10	Srm/h (GAZ)					7,8			35,0		52,6	5,7
20	N			15	Srm/h (GAZ)					16,4			35,0		52,6	9,2
20	N			20	Srm/h (GAZ)					25,1			35,0		52,6	11,4
22	L				Srm/ PSH15					4,5			60,0			
23	L				Srm/ PSH15					17,7			65,0			
24	L				Srm/ PSH15					11,9			51,0			
25	N				Srm/ PSH15								48,0			
26	N				Srm/ PSH15								59,0			
27	N				Srm/ PSH15								57,0			

Tabelle 95: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette II zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
4	N		0,996		€/Srm								3,90		3,20		8,10
20	N			10	€/Srm					10,30			3,30		1,40		15,00
20	N			15	€/Srm					4,90			3,30		1,40		9,60
20	N			20	€/Srm					3,20			3,30		1,40		7,90
22	L				€/Srm					11,30			4,80		3,70		19,80
23	L				€/Srm					2,90			4,40		2,60		9,80
24	L				€/Srm					4,30			4,50		3,00		11,80
25	N				-												
26	N				-												
27	N				-												

Tabelle 96: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III a zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung											
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt
2	N		0,214		Srm/PSH15				7,1	9,0			39,2		15,4	
17	N	10			Srm/h (GAZ)				7,3	20,6			22,5		52,6	4,0
17	N	15			Srm/h (GAZ)				21,3	26,6			35,0		52,6	7,6
17	N	20			Srm/h (GAZ)				35,3	32,7			51,8		52,6	10,3

Tabelle 97: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III a zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
2	N		0,214		€/Srm				5,20	2,50			2,00		2,10		16,03
17	N	10			€/Srm				17,20	4,10			5,10		1,40		27,90
17	N	15			€/Srm				5,90	3,20			3,30		1,40		13,80
17	N	20			€/Srm				3,50	2,60			2,20		1,40		9,80

Tabelle 98: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III b zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzerte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt	
12	n. a.	10			Srm/h (GAZ)												3,3
12	n. a.	15			Srm/h (GAZ)												6,9
12	n. a.	20			Srm/h (GAZ)												8,8
19	N	10			Srm/h (GAZ)				7,6	20,6			22,5		52,6		4,1
19	N	15			Srm/h (GAZ)				16,8	26,6			35,0		52,6		6,9
19	N	20			Srm/h (GAZ)				26,0	32,7			51,8		52,6		9,3
32	N	8,6			Srm/h				11,7	30,5							
37	N	14,2			Efm/h	6,9											
38	N	14,4			Efm/h	7,6											
39	M	19,6			Efm/h	7,6											
40	L				Fm/h (MAS)				10,0	14,0			52,8				
44	N	8,7			Srm/h (GAZ)				12,3	30,5							
45	N	7,7			Srm/h (GAZ)				16,4	26,6							
46	M	8,5			Srm/h (GAZ)				14,6	47,1							
47	N	8,4			Srm/h (GAZ)				11,7	39,6							
48	L	6,9			Srm/h (GAZ)				9,3	46,1							
49	n. a.				-												

Tabelle 99: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette III b zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
12	n. a.	10			-												
12	n. a.	15			-												
12	n. a.	20			-												
19	N	10			€/Srm				15,80	4,10			5,10	1,40			26,50
19	N	15			€/Srm				7,10	3,20			3,30	1,40			15,00
19	N	20			€/Srm				4,60	2,60			2,20	1,40			10,90
32	N	8,6			€/Srm				5,10	2,00			3,00	3,10			13,20
37	N	14,2			-												
38	N	14,4			-												
39	M	19,6			-												
40	L				€/Srm				2,27	2,29			4,20	3,00			11,76
44	N	8,7			€/Srm				4,99	2,00			3,00	3,10			13,90
45	N	7,7			€/Srm				4,34	2,30			3,90	2,80			13,34
46	M	8,5			€/Srm				7,47	1,80						6,50	15,77
47	N	8,4			€/Srm				9,80	2,14			2,40	3,00			17,34
48	L	6,9			€/Srm				11,69	1,84						6,50	20,03
49	n. a.				€/Srm							5,00	3,00				8,00

Tabelle 100: Literaturwerte Leistung aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette IV zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Leistung											
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Gesamt
7	n. a.	10			Srm/h (GAZ)											1,4
7	n. a.	15			Srm/h (GAZ)											1,6
11	n. a.	10			Srm/h (GAZ)											4,7
11	n. a.	15			Srm/h (GAZ)											8,8
11	n. a.	20			Srm/h (GAZ)											12,1
13	N	10			Srm/h (GAZ)	5,4	3,0							9,0		
13	N	15			Srm/h (GAZ)	10,5	3,0							9,0		

Tabelle 101: Literaturwerte Kosten aus Fallstudien, die der Modellverfahrenskette IV zugeordnet werden können

Nr.	Material	Dimension			Kosten												
		BHD [cm]	Baumvolumen [Efm o. R.]	Kronenfußdurchmesser [cm]	Bezugsgröße	Fällen	Vorliefern	Bündeln	Fällen + Vorliefern	Rückung	Vorliefern + Rückung	Gesamt Holzernte	Hacken	Rückung + Hacken	Transport	Hacken + Transport	Gesamt
7	n. a.	10			€/Srm												14,40
7	n. a.	15			€/Srm												12,90
11	n. a.	10			-												
11	n. a.	15			-												
11	n. a.	20			-												
13	N	10			€/Srm	3,10	3,30							5,00	4,60		16,00
13	N	15			€/Srm	1,60	3,30							5,00	4,60		14,50

9.4 Einzelvarianten mit dem elektrischen Trommelhacker

Tabelle 102: Schüttdichte, Stauchfaktor, Median, 25%- und 75%-Quartil der Partikelgrößenverteilung sowie Kornformfaktor der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker

Variante	BD ₁₅	SF	Median	Q ₂₅	Q ₇₅	KFF
Fichte, kein Sieb, scharf, langsam	138,67	10,44	28,73	18,99	69,83	1,50
Fichte, kein Sieb, stumpf, schnell	125,47	10,71	36,16	19,91	72,11	2,34
Buche, kein Sieb, scharf, langsam	248,46	8,21	26,17	17,96	36,53	1,30
Buche, kein Sieb, stumpf, schnell	254,56	13,61	65,80	27,92	125,44	1,97
Kiefer, kein Sieb, scharf, schnell	178,57	8,19	27,41	20,05	36,51	1,43
Birke, kein Sieb, scharf, schnell	218,51	14,14	36,82	27,95	51,40	1,38
Fichte, 15 mm, scharf, schnell	210,75	10,92	12,85	9,00	17,16	1,50
Buche, 15 mm, scharf, schnell	311,38	11,17	11,17	7,46	15,57	1,46
Fichte, 80 mm, scharf, mittel	168,44	9,79	29,30	21,05	42,88	1,42
Fichte, 80 mm scharf, sehr schnell	166,32	9,39	29,76	23,96	37,94	1,44
Buche, 80 mm, scharf, mittel	243,95	9,18	31,70	22,24	45,42	1,37
Buche, 80 mm, scharf, sehr schnell	260,16	9,88	36,30	28,28	46,96	1,34

Tabelle 103: Feinanteil, maximale Partikellänge und Partikelklasse nach ISO 17225-4 der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker

Variante	Feinanteil	Maximale Länge	ISO 17225-4
Fichte, kein Sieb, scharf, langsam	1,13	200	keine
Fichte, kein Sieb, stumpf, schnell	11,39	300	keine
Buche, kein Sieb, scharf, langsam	4,59	71	P31S
Buche, kein Sieb, stumpf, schnell	4,94	300	keine
Kiefer, kein Sieb, scharf, schnell	4,67	100	P31S
Birke, kein Sieb, scharf, schnell	1,77	150	P45S
Fichte, 15 mm, scharf, schnell	16,04	71	keine
Buche, 15 mm, scharf, schnell	24,24	45	keine
Fichte, 80 mm, scharf, mittel	0,73	150	P31S
Fichte, 80 mm scharf, sehr schnell	1,74	90	P31S
Buche, 80 mm, scharf, mittel	1,35	112	P31S
Buche, 80 mm, scharf, sehr schnell	2,51	125	P45S

Tabelle 104: Energiebedarf und Durchsatzleistung der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker

Variante	kWh/Srm	kWh/t _{atro}	Srm/h	t _{atro} /h
Fichte, kein Sieb, scharf, langsam	0,74	7,05	9,27	0,97
Fichte, kein Sieb, stumpf, schnell	1,02	9,66	7,09	0,75
Buche, kein Sieb, scharf, langsam	0,93	4,43	7,71	1,61
Buche, kein Sieb, stumpf, schnell	2,33	11,18	3,00	0,63
Kiefer, kein Sieb, scharf, schnell	0,60	4,09	12,04	1,78
Birke, kein Sieb, scharf, schnell	0,49	2,89	15,93	2,69
Fichte, 15 mm, scharf, schnell	1,62	10,59	4,90	0,75
Buche, 15 mm, scharf, schnell	2,95	12,12	2,47	0,60
Fichte, 80 mm, scharf, mittel	0,73	5,56	9,40	1,24
Fichte, 80 mm scharf, sehr schnell	0,46	3,46	16,25	2,17
Buche, 80 mm, scharf, mittel	0,64	3,15	10,86	2,21
Buche, 80 mm, scharf, sehr schnell	0,76	3,62	8,83	1,85

Tabelle 105: Umrechnungsfaktoren der Einzelvarianten bei den Versuchen mit dem elektrischen Trommelhacker

Variante	Srm/m ³ m. R	Srm/Efm m. R.	Srm/Efm o. R.
Fichte, kein Sieb, scharf, langsam	2,98	3,46	4,89
Fichte, kein Sieb, stumpf, schnell	2,63	3,04	4,28
Buche, kein Sieb, scharf, langsam	2,77	3,29	4,84
Buche, kein Sieb, stumpf, schnell	2,80	3,40	4,97
Kiefer, kein Sieb, scharf, schnell	2,76	3,21	4,39
Birke, kein Sieb, scharf, schnell	2,79	3,34	4,69
Fichte, 15 mm, scharf, schnell	2,20	2,53	3,64
Buche, 15 mm, scharf, schnell	2,35	2,84	4,30
Fichte, 80 mm, scharf, mittel	2,76	3,17	4,34
Fichte, 80 mm scharf, sehr schnell	2,60	2,94	4,10
Buche, 80 mm, scharf, mittel	3,09	3,66	5,34
Buche, 80 mm, scharf, sehr schnell	2,91	3,34	4,68

9.5 Vorversuche zum Belüftungswiderstand

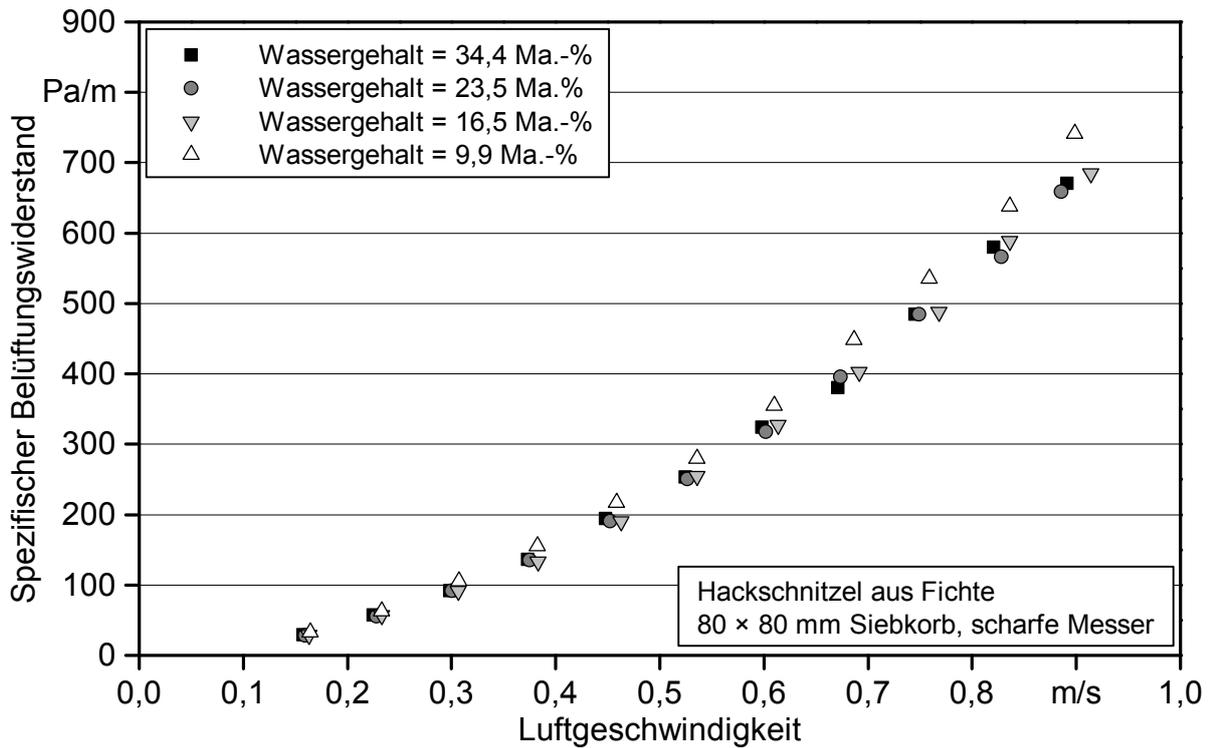


Abbildung 109: Einfluss des Wassergehalts auf den Belüftungswiderstand

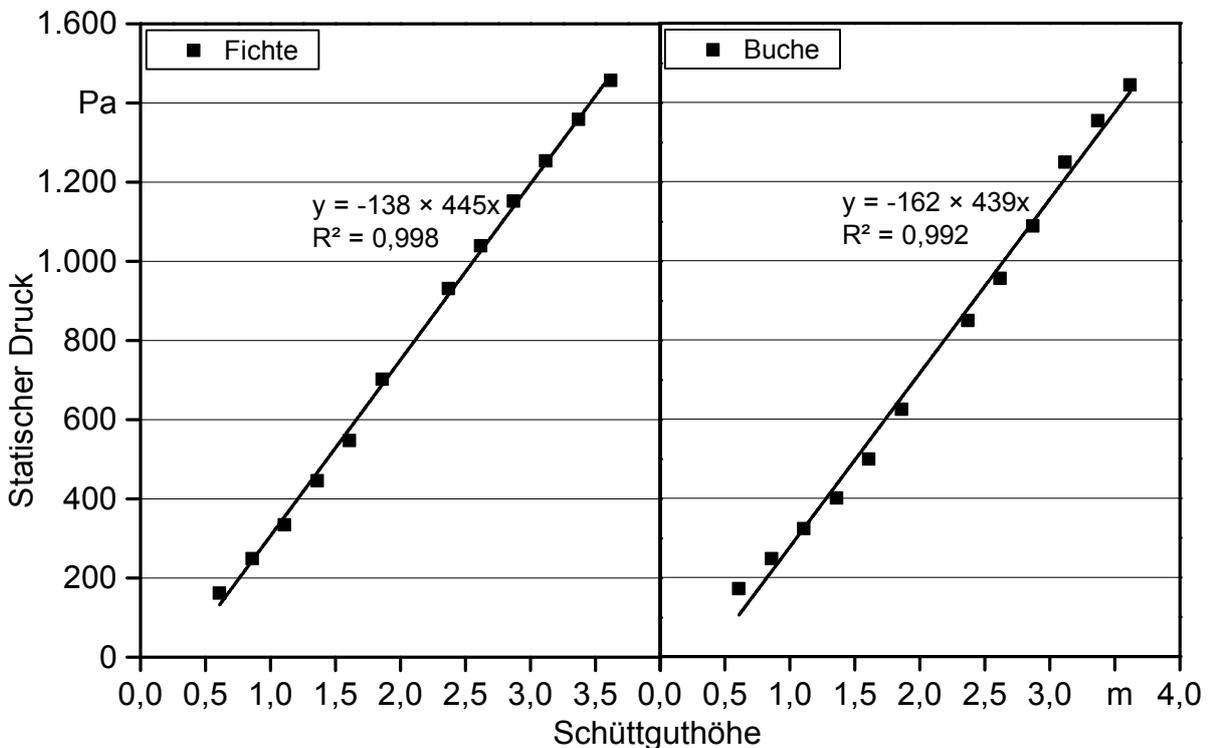


Abbildung 110: Einfluss der Schüttguthöhe auf den Belüftungswiderstand

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 Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion - Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel

