

Campus Klein-Altendorf

Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe

**Analyse und Optimierung innovativer
Verfahrensketten zur Kaskadennutzung von
Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen als
biogener Festbrennstoff**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

der
Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von
Dipl.-Ing. agr.
Martin Alexander Schmid

geboren in
Herten, Kreis Recklinghausen

Referent: Prof. Dr. agr. Ralf Pude
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers
Tag der mündlichen Prüfung: 15. August 2013
Erscheinungsjahr: 2013

Analyse und Optimierung innovativer Verfahrensketten zur Kaskadennutzung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen als biogener Festbrennstoff

Neben dem hochwertigen Nahrungsmittel Obst entstehen in Baumobstplantagen holzartige Biomassen. Ziel der Dissertation war es, diese Biomassepotenziale quantitativ und qualitativ zu beschreiben. Weiterhin wurde die technische Erschließung der Potenziale, sowie deren Bereitstellung bis zum energetisch einsetzbaren biogenen Festbrennstoff untersucht.

Mit dem jährlichen, manuellen Ertragsschnitt von modernen Apfelanlagen wird abhängig von Kulturführung und Witterung ein mittlerer Biomasseertrag von $1,2 \text{ t TM} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ erzielt. Die brennstofftechnischen Eigenschaften von Obstschnittholz sind durch hohe Aschegehalte von 3,8-4,8%, bedingt durch einen hohen Rindenanteil, gekennzeichnet. Durch den anorganischen Rückstand und die elementare Zusammensetzung besitzt der Brennstoff einen verminderten Brennwert sowie Brennstoffqualität. Die technische Bereitstellung erfolgt durch verschiedene Techniken. Schnittholzsammelgeräte und -ballenpressen sind in der Entwicklung. Der Einsatz von Zerkleinerungsorganen mit definiertem Schnitt und einer Aufnahme des Schnittholzes über eine Pick-up Einrichtung ist zielführend.

Nach einer Nutzungszeit von 10-15 Jahren werden moderne Apfelanlagen gerodet. Die Rodungsholzmenge wurde sortenabhängig mit $10,5\text{-}22,9 \text{ t TM} \cdot \text{ha}^{-1}$ bestimmt. Zur Nutzung dieser Ressourcen wurde ein neues Rodeverfahren „RB 60 Klein-Altendorf“ entwickelt. Dabei werden die Obstbäume mit der Wurzel und dem Stützpfeiler aus dem Boden geborgen. Verfahrensbedingt ist die Brennstoffqualität durch hohe Aschegehalte von 4,1-7,1% und durch eine grobe Stückgeometrie gekennzeichnet.

Das Schnitt- und Rodungsholz besitzt nach der Bereitstellung einen Wassergehalt von 40-55% und muss für die thermische Verwertung getrocknet werden. Das Trocknungsverfahren ist in Abhängigkeit des Einsatzzieles zu wählen. Natürliche Trocknungsverfahren sind technisch einfach zu realisieren, besitzen aber niedrige Wasserentzugsraten von 0,02-0,19% pro Tag und führen meist nicht zu Zielwassergehalten von weniger als 20%. Dazu ist eine Aufspaltung der Holzstücke oder der Einsatz von technischen Trocknungsverfahren nötig, durch die der Aufwand steigt. Gleichzeitig konnten dadurch höhere Wasserentzugsraten von 0,19-0,24% pro Tag beobachtet werden.

Um das Schnittholz in Obstbetrieben direkt zu vermarkten wurde der Veredelungsschritt der Brikettierung getestet. Technisch konnte der Prozess der Brikettierung durch die Entwicklung einer wassergekühlten Abkühlstrecke verbessert werden. Zudem wurde die Brikettqualität hinsichtlich der Abriebfestigkeit und Partikeldichte durch die neue Technik gesteigert. Die brennstofftechnischen Eigenschaften von Schnittholz sind allerdings nicht optimal und könnten durch die Beimischung von Festbrennstoffen mit höherwertigen Brennstoffqualitäten optimiert werden.

Die einzelnen Verfahrensschritte der Bereitstellung von Schnitt- und Rodungsholz sind auf die Obstbaubetriebe individuell abzustimmen. Die Nutzung der Potenziale ist eine energetisch interessante Alternative mit der ca. 1.000 Liter Heizöl pro Hektar und Jahr ersetzt werden können. Die regionale Wertschöpfung ist durch die Kaskadennutzung sehr hoch. Bei einem aktuellen Anbauumfang von 48.000 Hektar Baumobstfläche in Deutschland können mit der Nutzung der Potenziale rund 19.000 Haushalte mit Wärmeenergie versorgt werden, ohne zusätzliche land- und forstwirtschaftliche Fläche für die Energieversorgung zu belegen.

Analyzing and optimizing innovative processing chains for cascade use of pruning and clearance wood from orchards as biogenic solid fuels

In addition to fruit orchards produce a high amount of wooden biomass. The aim of this dissertation is to describe the potentials of biomass quantitatively and qualitatively. Furthermore, tapping the potentials and ways of processing up to providing energetically usable biogenic solid fuels, has been studied.

With the annual manual pruning modern apple orchards can earn an average biomass of 1.2 tones dry matter per hectare and year. The fuel properties of fruit pruning wood are characterized by a high ash content of 3.8-4.8% due to the high bark to wood ratio. Because of the inorganic residue and the elementary composition the fuel has a reduced energy value and fuel quality. The technical supply is realized by various techniques. The techniques to collect or bale pruning wood from orchards are in development. The use of grinding machines with a defined cut and a lumber collector on a pick-up is effective.

Modern apple orchards are being cleared after a period of 10-15 years. The biomass of clearance has been determined from 10.5 to 22.9 tones dry matter per hectare, depending on the different kinds of apple trees. To use these resources a new clearance technique "RB 60 Klein-Altendorf" was developed. By this technique the fruit trees are dug out with the post and the root. Depending on the process the fuel properties are characterized by a high ash content of 4.1 to 7.1%, and the pieces are coarse.

The pruning and clearance wood from orchards has a water content of 40-55% after harvest and must be dried for thermal utilization. The drying process must be chosen depending on the operational purpose. Natural drying methods are simple but the water reduction rate is low (from 0.02 to 0.19% per day) and does not usually achieve a water aim content of less than 20%. Therefore it is necessary to split the wood or use a technical drying process but this also means an increase in costs. On the other hand a higher water reduction rate from 0.19% to 0.24% per day could be observed.

To sell the pruning wood from orchards by direct marketing the upgrading step of briquetting was tested. Technically, the process of briquetting was improved by developing a water-cooled cooling line. Moreover the quality of the briquettes concerning abrasion durability and particle density was enhanced. However, the fuel quality of pruning wood is not optimal and could be optimized by adding solid bio-fuels of higher quality.

The steps of providing pruning and clearance wood must be coordinated with the individual fruit farmer. The use of these energy potentials from orchards is an interesting alternative, which can be used to replace approximately 1.000 liters of heating oil per hectare and year. The cascade use of pruning and clearance wood from orchards contributes to the local economy. At the moment the 48.000 hectares of orchards in Germany could be used to supply about 19.000 households with thermal energy without having to occupy additional agriculturally used areas and forests for the energy supply.

**„Wenn wir es intelligenter
anstellen als heute, reicht es künftig für
Tank und Teller“**

Franz Alt (2012)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XV
Formelverzeichnis.....	XVII
Verwendete Abkürzungen.....	XVIII
1. Einleitung.....	1
2. Literatur.....	3
2.1 Biogene Festbrennstoffe.....	3
2.1.1 Definition.....	3
2.1.2 Bereitstellungsketten.....	4
2.1.3 Qualitätsmerkmale.....	5
2.2 Erwerbsobstbau.....	8
2.2.1 Allgemeine Grundlagen.....	8
2.2.2 Schnittholz.....	10
2.2.3 Rodungsholz.....	18
2.3 Trocknung und Lagerung.....	28
2.3.1 Allgemeine Grundlagen.....	28
2.3.2 Verfahren zur Schnitt- und Rodungsholztrocknung.....	31
2.4 Brikettierung.....	35
2.4.1 Allgemeine Grundlagen.....	35
2.4.2 Einsatz von Briketts.....	37
3. Material und Methoden.....	40
3.1 Standortcharakterisierung.....	40
3.2 Schnittholz.....	41
3.2.1 Verfahren zur Schnittholzsammlung.....	41
3.2.2 Schnittholzmengen.....	46
3.2.3 Brennstoffeigenschaften.....	48
3.2.4 Arbeitsqualitätsfaktoren der Schnittholzsammeltechnik.....	53
3.3 Rodungsholz.....	55
3.3.1 Einfluss von Holzurückständen auf Folgekulturen.....	55
3.3.2 Rodeverfahren RB 60 Klein-Altendorf.....	56
3.3.3 Weiterverarbeitungskette der Obstbäume.....	59
3.3.4 Rodungsholzmengen.....	62

3.3.5	Brennstoffeigenschaften	63
3.3.6	Arbeitsqualitätsfaktoren RB 60.....	65
3.4	Trocknung	69
3.4.1	Ganzbaumtrocknung	69
3.4.2	Ballentrocknung.....	70
3.4.3	Hackschnitzeltrocknung.....	70
3.5	Brikettierung.....	74
3.5.1	Maschinenbeschreibung	74
3.5.2	Vorversuche	79
3.5.3	Veränderung des Pressdrucks	81
3.5.4	Energiebedarf für Brikettierung	81
3.5.5	Temperaturverlauf an Abkühlstrecke.....	83
3.5.6	Brikettierqualität in Abhängigkeit der Bauform der Abkühlstrecke.....	83
3.6	Statistische Auswertung	86
4.	Ergebnisse	87
4.1	Schnittholz	87
4.1.1	Verbesserung der Auffangvorrichtung am Kuhn Schnittholzsammler.....	87
4.1.2	Schnittholzmengenerträge	89
4.1.3	Brennstoffeigenschaften	92
4.1.4	Arbeitsqualitätsfaktoren der Schnittholzsammeltechnik.....	95
4.2	Rodungsholz	99
4.2.1	Einfluss von Holzbeimischungen in den Ackerboden auf die Keimrate von Kressesamen.....	99
4.2.2	Rodeverfahren RB 60 Klein-Altendorf	100
4.2.3	Weiterverarbeitungskette	105
4.2.4	Rodungsholzmengen	106
4.2.5	Brennstoffeigenschaften	110
4.2.6	Arbeitsqualitätsfaktoren RB 60 „Klein-Altendorf“	118
4.3	Trocknung	124
4.3.1	Ganzbaumtrocknung	124
4.3.2	Ballentrocknung.....	126
4.3.3	Hackschnitzeltrocknung.....	128
4.4	Brikettierung.....	132
4.4.1	Vorversuche	132

4.4.2	Veränderung des Pressdrucks	133
4.4.3	Energiebedarf für Brikettierung	134
4.4.4	Temperaturverlauf an der Abkühlstrecke	135
4.4.5	Bau einer wassergekühlten Abkühlstrecke	138
4.4.6	Brikettversuch mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke	139
5.	Diskussion	146
5.1	Schnittholzpoteziale, deren Eignung zur energetischen Nutzung, sowie die Bereitstellung durch Bergetechnik.....	146
5.2	Rodungsholzpoteziale und deren Brennstoffeigenschaften, sowie die technische Analyse der Bereitstellungskette	157
5.3	Trocknung von Schnitt- und Rodungsholz.....	173
5.4	Anwenderoptimierte Brikettierung von Obstbaumschnittholz	178
6.	Zusammenfassung	186
7.	Literaturverzeichnis	XX
	Normen.....	XX
	Literatur, Veröffentlichungen und Vorträge	XXI
	Online Quellen.....	XXIX
	Sonstige Quellen.....	XXXI
	Anhang	XXXIII

Abbildungsverzeichnis

<u>Nr.</u>		<u>Seite</u>
2-1	Systematik mit ausgewählten Beispielen energetisch nutzbarer biogener Festbrennstoffe (eigene Darstellung, nach FNR, 2000)	-4-
2-2	Reihenputzer zum Entfernen von Schnittholz aus der Baumreihe (Bildquelle: OBSTWEIN-TECHNIK, 2012)	-13-
2-3	Düngergerhalte von Mulchgras, Blattlaub, Schnittholz und Trester bei der Baumobsterzeugung (verändert nach MOSER, 1981)	-15-
2-4	Schnittholzammelgeräte der Firma Kuhn, Perfect und Caeb (Bildquellen: PUDE, 2010; PERFECT, 2011; CAEB 2011)	-17-
2-5	Lebensphasen eines Obstbaumes in einer klassischen Erwerbsanlage (eigene Darstellung, nach NOGA, 2009)	-19-
2-6	Forstmulcher im Einsatz (Bildquelle: WEISSER, 2012)	-23-
2-7	Forstfräse im Einsatz (Bildquelle: STÜHMER, 2012)	-23-
2-8	Offener Abbrand von Obstbäumen auf dem Feld (Bildquelle: PUDE, 2010)	-25-
2-9	links: Rodepflug RB 60 Klein-Altendorf (Stand 2012); rechts: Rodeflug bei der Rodung	-27-
2-10	Prinzip der Dombelüftungstrocknung (MOLLEKOPF UND BRUMMACK, 2011)	-33-
2-11	Briketts beim Abbrand (Bildquelle: HÖCKER POLYTECHNIK, 2012)	-36-
3-1	Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H (Bildquelle: PUDE, 2010)	-41-
3-2	Pick-up vom Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H; 1: Pick-up; 2: Aufnahmezinken; 3: Gelenkwelle	-42-
3-3	Bunkervorrichtung vom Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H (Bildquelle: TERRA, 2012); 4: Stahlrahmen; 5: Haken; 6: BigBag	-43-

<u>Nr.</u>	<u>Seite</u>
3-4 Perfect Mäh-Lade Wagen; 7: hydraulische Schwenkdeichsel	-44-
3-5 Perfect Mäh-Lade Wagen beim Entladevorgang; 8: Lochblech	-45-
3-6 Schlegelrotor mit 2,2 kg Universalschlägeln des Perfect Mäh-Lade Wagen; 9: Rotorwelle; 10: Schlegel	-46-
3-7 Gepresste Probensubstanz zur Brennwertbestimmung in Verbrennungstütchen	-51-
3-8 Lagerung der Boden-Holz-Mischungen in einer Klimakammer (Bildquelle: MARKELI UND SCHRÖDER, 2012)	-56-
3-9 Kressesamen nach der Keimung unter Frischhaltefolie (Bildquelle: MARKELI UND SCHRÖDER, 2012)	-56-
3-10 Rodepflug RB 60 in der ersten Bauform; 1: Hauptrahmen; 2: Dreipunktaufhängung; 3: Unterschneidemesser; 4: Siebrost; 5: Leiteinrichtung; 6: Schnitttiefeinstellung	-57-
3-11 Siebrost des Rodepflugs in der ersten Bauform (Bildquelle: DRÖPELMANN, 2010)	-57-
3-12 Weiterverarbeitungskette der gerodeten Obstbäume; oben links: gerodete Birnenbäume, oben rechts: Zerkleinerung mit langsam laufenden Schredder, unten: Siebung und Feinzerkleinerung	-60-
3-13 Aufnahme der gerodeten Obstbäume mit dem BioBaler BW55	-61-
3-14 Messpunktverteilung an der Frontseite; Miete Lagerhalle (Bildquelle: WINZER, 2012)	-72-
3-15 Messpunktverteilung an der Oberseite; Miete Lagerhalle (Bildquelle: WINZER, 2012)	-72-
3-16 Messpunktverteilung für Humimetermessung; Feldmiete Dick 10 (Bildquelle: WINZER, 2012)	-73-
3-17 Grundelemente der Brikettierpresse BrikStar C der Firma Höcker Polytechnik (Bildquelle: HÖCKER POLYTECHNIK, 2009)	-75-
3-18 Standardabkühlstrecke an Brikettierung BrikStar C	-78-
3-19 Trommelsieb, Typ Siebmax	-79-

<u>Nr.</u>		<u>Seite</u>
4-1	Modifizierte Bunkereinrichtung für Großkisten des Kuhn-Schnittholzsammlers (Bildquelle: AUMÜLLER GRUBER, 2012); 1: Großkistenaufnahme; 2: Streben	-88-
4-2	Wassergehalte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 33% (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)	-90-
4-3	Aschegehalte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 3% (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)	-92-
4-4	Brennwerte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei $17,8 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)	-93-
4-5	Längenverteilung der gesammelten Schnittholzbiomasse mit der untersuchten Bergetechnik (n=3)	-95-
4-6	Einfluss der Zapfwellendrehzahl (Kuhn 450 = $450 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$; Kuhn 540 = $540 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ Zapfwellendrehzahl) auf die Korngrößenverteilung von gesammelten Schnittholz (n=2)	-97-
4-7	Biomasseverluste, die von den getesteten Schnittholzsammlern in der Obstplantage nicht erfasst wurden (Signifikanzen: T-Test, $\alpha \leq 0,05$, n=3)	-98-
4-8	Einfluss von Holzbeimischung (25 und 50% im Vergleich nur 0-Variante) in einen Ackerboden auf die Keimraten von Kresse. Geprüft mit einem Bioindikatorentest (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=4)	-99-
4-9	Baugruppe Rodepflug RB 60 (Stand 2012); 1: Unterschneidemesser; 2: Siebfläche; 3: Leiteinrichtung (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)	-101-
4-10	Siebrost von Rodepflug RB 60 in der ersten Bauform (Bildquelle: DRÖPPELMANN, 2010)	-102-
4-11	Siebrost von Rodepflug RB 60 in der optimierten Bauform mit Bemaßung (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)	-102-
4-12	Baugruppe Rodepflug RB 60 mit Bemaßung der Leiteinrichtungen (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)	-104-

<u>Nr.</u>	<u>Seite</u>
4-13 Detailansichten der Baugruppe Leiteinrichtung vom Rodepflug RB 60 (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)	-104-
4-14 Biomasseballen des BioBalers aus Obstplantagen	-106-
4-15 Biomasseverluste in der Weiterverarbeitungskette von gerodeten Obstbäumen mittels BioBaler	-106-
4-16 Frischmassenanteile der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig einer im Rodungsalter befindlichen Apfelanlage (15. Standjahr) auf M9 (n=20)	-110-
4-17 Brennstoffeigenschaften der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig einer im Rodungsalter befindlichen Apfelanlage (15. Standjahr) auf M9 (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft n=10)	-111-
4-18 Wasser- (I), Aschegehalt (II) und Brennwert (III) der Baumsegmente unterm und im Veredelungsknoten, sowie am Stamm in 0,4 bzw. 1,3 m Höhe, getrennt in Holz und Rinde (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft n=3)	-114-
4-19 Aschegehalte und Brennwerte von Rohholz verschiedener Obstsorten und -arten. Die Sekundär-Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei $16 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft n=3)	-117-
4-20 Pfahlabbrüche während der Rodung von Apfelplantagen mit dem Rodeverfahren RB 60 (n=100)	-118-
4-21 Pfahlspitzen aus Vorkultur, welche durch herkömmliche Rodeverfahren abgebrochen wurden	-119-
4-22 Verringerung des Erdanteils an den Wurzeln von Obstbäumen durch die Optimierung der Siebfläche (Einzelbaumuntersuchung n=5; Praxisversuch n=1)	-120-
4-23 Rodeversuch in einer 6 jährigen Apfelplantage. Test des Wirkkomplexes aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Zapfwelldrehzahl beim Betrieb des Rodepflugs RB 60 auf die Qualität der Arbeitserledigung (n=20)	-121-

<u>Nr.</u>	<u>Seite</u>
4-24 Rodeversuch in einer 19 jährigen Apfelplantage. Test des Wirkkomplex aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Zapfwellendrehzahl beim Betrieb des Rodepflugs RB 60 auf die Qualität der Arbeitserledigung (n=20)	-122-
4-25 Trocknungsverlauf von aufgepolterten Weiden- und Pappelruten am Campus Klein-Altendorf (n=3) (verändert nach WINZER, 2012)	-125-
4-26 Trocknungsverlauf von Biomasseballen am Standort Klein-Altendorf (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3) (verändert nach VON GLISCZYNSKI, 2011)	-126-
4-27 Trocknungsverlauf von Biomasseballen am Standort Petershagen (Signifikanz: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3) (verändert nach VON GLISCZYNSKI, 2011)	-127-
4-28 Verlauf der Haufwerktemperaturen an der Ober- und Vorderseite der Miete Dach im Vergleich zur Außentemperatur. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei -10°C (n=6)	-128-
4-29 Verlauf der Wassergehalte an der Ober- und Vorderseite der Miete Dach. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei 20% (n=3)	-129-
4-30 Verlauf der Haufwerktemperaturen im Vergleich zur Außentemperatur in der Miete Vlies. Die Haufwerktemperaturen wurden auf drei Höhen an der Miete ermittelt. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei -15°C (n=2)	-130-
4-31 Verlauf der Wassergehalte an den drei Messstellen im unteren, mittleren und oberen Bereich der Miete Vlies. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei 24% (n=2)	131-
4-32 Temperaturverläufe an der Abkühlstrecke und an den Briketts (rote Linien: Briketttemperatur (BT1 und BT2); blaue Linien: Messstellentemperatur (M1-M5); je heller eine Linie, umso größer der Abstand von der Presseinheit der Brikettierung, Raumtemperatur 20°C . Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 20°C	-136-
4-33 Passive (montiert) und aktive Abkühlstrecken der Brikettierung	-138-
4-34 Siebanalyse der drei Eingangsmaterialien Obst-, Paulownien und Akazienholz für den Brikettierversuch (n=8)	-139-

<u>Nr.</u>	<u>Seite</u>
4-35	-142-
<p>Brennstoffeigenschaften der Briketts aus Obst-, Akazien- und Paulowniaholz. Rote Linien markieren Normanforderungen der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz (Signifikanzen: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)</p>	
4-36	-144-
<p>Abriebfestigkeit von Briketts. Varianten: Holzarten: Obst, Akazie und Paulownia; Abkühlstrecken: aktiv, passiv, ohne. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 84% (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)</p>	
4-37	-145-
<p>Partikeldichten von Briketts. Varianten: Holzarten: Obst, Akazie und Paulownia; Abkühlstrecken: aktiv, passiv, ohne. Rote Linie gibt die DIN-Anforderung der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz an (Signifikanzen: Tukey- HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)</p>	
5-1	-155-
<p>Rebholzhäcksler Winnicut der Firma Stoll (Bildquelle: STOLL, 2012)</p>	
5-2	-156-
<p>Lagerung von Schnittholzballen welche mit dem Schnittholzsammler der Firma Caeb produziert wurden</p>	
5-3	-164-
<p>Regression zwischen Aschegehalt und Brennwert von Obstholz. Ordinate schneidet die Abszisse bei $15 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (n=18)</p>	
5-4	-165-
<p>Veredelungsknoten mit Stammstück (Sorte Gala)</p>	

Tabellenverzeichnis

<u>Nr.</u>		<u>Seite</u>
2-1	Qualitätsrelevante Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren Auswirkungen auf die Bereitstellung und Nutzung (verändert nach HARTMANN UND HERING, 2004)	-6-
2-2	Art der Wasserbindung (verändert nach HARTMANN, 2009b)	-29-
2-3	Vergleich der Normen zur Brikettherstellung (DIN 51 731 (2010); ÖNORM M 7135 (2010); CEN/TS 14 961-3 (2010))	-38-
3-1	Versuchsjahre, Apfelsorten, deren Pflanzjahr und Alter zum Zeitpunkt des Schnittholzammelversuchs	-47-
3-2	Übersicht über Versuchsflächen, Sorten, Wiederholungsanzahl und Standjahr zur Bestimmung der Rodungsholzmasse	-63-
3-3	Daten der Probenentnahmen zur Wassergehaltsanalyse von Feldgehölzballen, die mit dem BioBaler der Firma Jenz geerntet wurden (VON GLISCZYNSKI, 2011).	-70-
4-1	Schnittholz mengen aus dem Schnittholzammelversuch (Signifikanz: Tukey-HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=6)	-89-
4-2	Trockenmasseerträge aus dem Schnittholzammelversuch (Signifikanz: Tukey-HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=3)	-91-
4-3	Elementaranalyse von Schnittholz auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)	-94-
4-4	Rodungsholz mengen aus den Praxisversuchen auf den Flächen H2/H1 und Dick 10	-107-

<u>Nr.</u>	<u>Seite</u>
4-5	-108-
Rodungsholzmengen aus den Apfel-Einzelbaumuntersuchungen (Signifikanz: Tukey-HSD -Test, $\alpha \leq 0,05$; n=5, Gala und Boskoop n=10)	
4-6	-112-
Elementaranalyse der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)	
4-7	-115-
Elementaranalyse unterm und im Veredelungsknoten, sowie am Stamm in 0,4 bzw. 1,3 m Höhe, getrennt in Holz und Rinde auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)	
4-8	-134-
Energiebedarf für den Prozessschritt der Brikettierung mit montierter Abkühlstrecke	
4-9	-141-
Temperaturen an den Messstellen M1 (Presskanal), BT 1 und BT 2 (Brikett) im Brikettversuch mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke	
5-1	-160-
Vergleich der ermittelten Trockenmasseerträge mit den vom Bundessorten- amt angegebenen Wuchsstärken in Abhängigkeit der Sorte	
5-2	-174-
Übersicht des Wasserentzugs pro Tag mit Trocknungsdauer und Restwassergehalt, sowie die verwendete Holzart für die untersuchten Trocknungsvarianten, ergänzt durch die Domtrocknung (verändert nach BÄRWOLFF UND HERING, 2012)	
5-3:	-178-
Beurteilung von Trocknungsverfahren für Schnitt- und Rodungsholz	
Anhang	
8-1:	
Briketteigenschaften aus dem Vorversuch ohne Abkühlstrecke (1. Serie) (n=10)	
8-2:	
Briketteigenschaften aus dem Vorversuch mit Abkühlstrecke (2. Serie) (n=10)	
8-3:	
Briketteigenschaften aus dem Vorversuch mit Abkühlstrecke (3. Serie) (n=10)	

Formelverzeichnis

<u>Nr.</u>		<u>Seite</u>
3-1	Berechnung des Wassergehaltes (w) nach DIN EN 14 774-2	-48-
3-2	Berechnung des Aschegehaltes (A_d) nach DIN EN 14 775	-50-
3-3	Berechnung des spezifischen Brennwertes aus der Temperaturerhöhung in einem Kalorimetersystem (IKA, 2010)	-52-
3-4	Berechnung des Arbeitsqualitätsfaktors aus den Boniturwerten vom Resterdanhang, Wurzelabbruch und der Ablagegenauigkeit	-67-
3-5	Berechnung der Partikeldichte (ρ) eines Briketts	-80-
3-6	Berechnung der Wirkleistung im Drehstromnetz (HELU, 2012)	-82-
3-7	Berechnung der mechanischen Festigkeit von Briketts nach DIN 15 210-2	-86-

Verwendete Abkürzungen

B2:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
BT:	Briketttemperatur
CEN/TS:	Unveränderte deutsche Übernahme einer Europäischen Technischen Spezifikation in DIN
CKA:	Campus Klein-Altendorf
Dick 10:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
d:	Messgenauigkeit
DIN:	Deutsches Institut für Normung
FM:	Frischmasse
H1:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
H2:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
I:	Stromstärke
J2:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
L:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
M:	Messstelle zur Temperatur an den Abkühlstrecken der Brikettierung
M9:	schwachwachsende Unterlage für Apfelbäume aus der Malling Reihe
n:	Wiederholungsanzahl je Variante
NN:	Normal Null
nFk:	nutzbare Feldkapazität
NRW:	Nordrhein-Westfalen
n.s.:	nicht signifikant
ÖNORM:	Norm vom Austrian Standards Institute
Pude-Nolden:	Flächenbezeichnungen nach Versuchsfeldführer des Campus Klein-Altendorf
R ² :	Bestimmtheitsmaß
Stabw.:	Standardabweichung
TM:	Trockenmasse
U/min.:	Umdrehungsanzahl pro Minute
α:	Signifikanzniveau

Markennamen werden nicht gekennzeichnet (®)

1. Einleitung

„Wenn wir es intelligenter anstellen als heute, reicht es künftig für Tank und Teller“ (ALT, 2012).

Dieser Satz des bekannten deutschen Journalisten und Buchautors Franz Alt stellt eine der Kernfragen unserer modernen Gesellschaft anschaulich zur Diskussion. Eine stetig ansteigende Weltbevölkerung verbunden mit einem starken Nachfrageschub nach jeglichen Energieformen zwingt zu einem Umdenken von Politik und Gesellschaft. Der Ausbau der regenerativen Energien nimmt vor diesem Hintergrund stärker zu. Besonderes Interesse besteht im Biomassektor, da dieser im Gegensatz zur Photovoltaik und Windkraft keine volatilen Eigenschaften aufweist (BMELV, 2012).

Die Biomasseproduktion ist eine klassische land- und forstwirtschaftliche Aufgabe. Jedoch ist die Landwirtschaft gleichzeitig der Primärproduzent aller Nahrungsmittel. Dadurch entsteht eine Flächenkonkurrenz, da die landwirtschaftliche Nutzfläche nur begrenzt zur Verfügung steht und diese durch Industrie- und Siedlungsbau stetig abnimmt. Der Marktpreis von v.a. Rohöl und Weizen, durch Subventionen und Förderprogramme beeinflusst, steuert den Anbau und die Verwertung von Energie- und Nahrungs- bzw. Futterpflanzen. Die dadurch entstehende Kontroverse wird unter der „Tank oder Teller“ - Diskussion zusammengefasst.

Die vorliegende Dissertation soll ein praxisgerechtes Beispiel für ein Modell geben, welches einen Beitrag zur künftigen Tank und Teller Vision beifügt. Einer der nachhaltigsten Ansätze zur Umsetzung dieser Ziele ist die simultane Produktion von Nahrungsmitteln und Energieträgern. Beispiel eines solchen Produktionssystems ist der Obstbau. Dabei werden in Dauerkulturen an Bäumen über einen Zeitraum von 10-15 Jahren eines der hochwertigsten Nahrungsmittel, nämlich Obst, produziert. Gleichzeitig wird Biomasse in Form von Holz durch die pflanzliche Photosynthese gebildet. Ein solches Modell wird auch als Kaskadensystem bezeichnet, da statt einer Konkurrenz zwischen Nahrungs- und Energieversorgung hier eine Synergie entsteht.

Die Biomasse des Obstbaus setzt sich aus dem jährlich anfallenden Schnittholz und dem nach der Nutzungsperiode vorliegendem Rodungsholz zusammen. Diese nachwachsende Ressource aus Obstplantagen, welche nach ersten Schätzungen pro Hektar und Jahr etwa

1.000 Liter Heizöl ersetzen kann, ist für die Energiebereitstellung geeignet. In Deutschland werden knapp 48.000 ha Baumobstfläche bewirtschaftet, die als Potenzial mobilisiert werden könnten (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2012). Zur Verwertung von Obsth Holz als biogener Festbrennstoff sind bisher keine spezifischen Untersuchungen bekannt. Lediglich einzelne Hinweise zu dem Themenkomplex sind in der Fachliteratur zur Biomassenutzung zu finden (NITSCH ET AL., 2001; WOLFF, 2005; FELDWISCH, 2010).

Wie bei den meisten Innovationen ist die Etablierung in die Praxis sowie die technische Umsetzung komplex. Daher ist es Ziel der vorliegenden Dissertation, die Biomassepotenziale aus Obstplantagen zu beschreiben. Dies erfolgt sowohl quantitativ als auch qualitativ. Weiterhin werden die technischen Möglichkeiten zur Bereitstellung von Obsth Holz als biogener Festbrennstoff aufgezeigt, analysiert und optimiert, sowie Entwicklungsarbeit an erforderlicher Position betrieben.

2. Literatur

2.1 Biogene Festbrennstoffe

2.1.1 Definition

Biogene Festbrennstoffe sind rezente Brennstoffe, die durch ihre organische Herkunft gekennzeichnet sind und zum Zeitpunkt ihrer energetischen Nutzung in fester Form vorliegen (FNR, 2000). Sie stellen lediglich einen Teil der Biomasse dar. Eine Abgrenzung zwischen fossilen Energieträgern und biogenen Festbrennstoffen beginnt nach KALTSCHMITT (2009) beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung.

Wie in allen Biomassen liegt die Energie der biogenen Festbrennstoffe in chemisch gebundener Form vor. Diese Energieform entsteht direkt durch den Prozess der Photosynthese, bei dem Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) mit Hilfe der Strahlungsenergie der Sonne zu energiereichen organischen Verbindungen synthetisiert werden (LEWANDOWSKI, 2009). Diese organischen Verbindungen sind hauptsächlich Cellulose, Hemicellulose und Lignin (PORBATZKI, 2008). Demnach gehören die biogenen Festbrennstoffe zu den Primärprodukten.

Viele dieser Biobrennstoffe werden durch verschiedene Zerkleinerungs- und Trocknungsverfahren aufbereitet. Klassische Beispiele sind Scheitholz für Kaminöfen oder Hackschnitzel für Feuerungsanlagen. Eine aufwendige Verarbeitung durch Kompaktierung zu Holzbriketts oder –pellets ist ebenfalls möglich (HARTMANN UND WITT, 2009). Mit solchen Verarbeitungsschritten werden Produkte mit exakt definierten Eigenschaften in Hinblick auf geometrische Abmessungen, Energie- und Aschegehalt hergestellt. Die Energienutzung erfolgt oft durch eine Oxidation der Brennstoffe, meist zur Wärmebereitstellung oder Stromerzeugung.

Biogene Festbrennstoffe lassen sich nach ihrer Herkunft und nach dem Verholungsgrad systematisieren. Demnach werden sie in Rückstände und speziell angebaute Energiepflanzen unterteilt. Weiterhin kann zwischen holzartigen und halmgutartigen unterschieden werden. Energetisch nutzbare Rückstände sind beispielsweise das Holz aus Wein- und Obstplantagen

oder das Stroh aus dem Marktfruchtanbau. Als Energiepflanzen stehen zum einen halmgutartige Pflanzen wie Miscanthus und zum anderen holzartige Brennstoffe aus Weiden- oder Pappelanpflanzungen, sogenannten Kurzumtriebsplantagen, zur Verfügung. Abbildung 2-1 zeigt eine Systematik mit ausgewählten Beispielen energetisch nutzbarer biogener Festbrennstoffe.

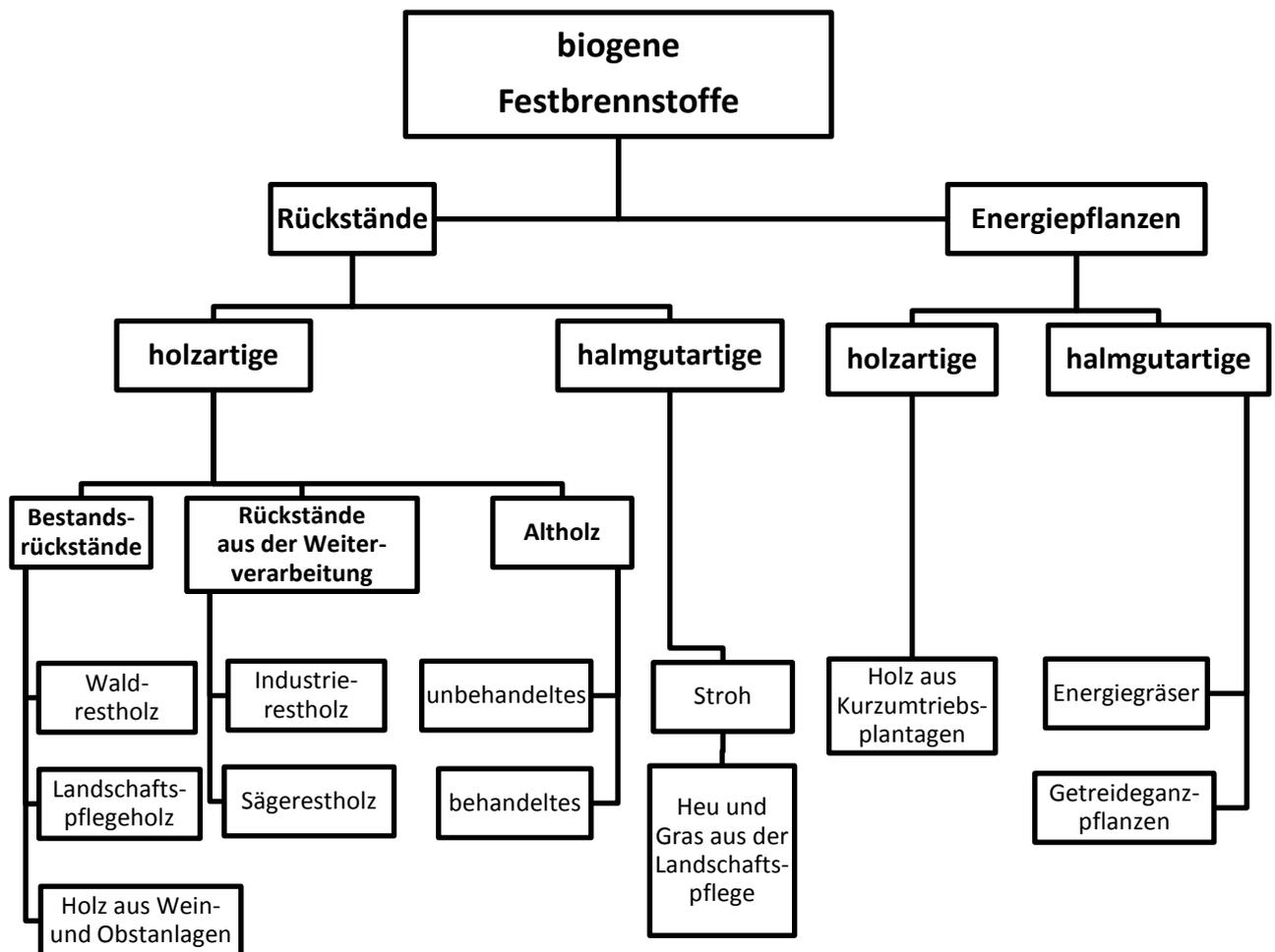


Abbildung 2-1: Systematik mit ausgewählten Beispielen energetisch nutzbarer biogener Festbrennstoffe (eigene Darstellung, nach FNR, 2000)

2.1.2 Bereitstellungsketten

Bereitstellungsketten sind eine Aneinanderreihung von einzelnen Prozessen. Jeder Prozess stellt einen abgeschlossenen Abschnitt in der gesamten Kette dar und besteht wiederum aus mehreren Einzelprozessen. Die Reihenfolge der Prozesse ist teilweise technisch bedingt.

Einige Abschnitte können in ihrer Abfolge den Rahmenbedingungen angepasst werden. Die Prozesse in den Ketten laufen oft räumlich getrennt voneinander ab. Die jeweiligen Entfernungen werden durch entsprechende Transporte überbrückt (HARTMANN, 2009b). Die einzelnen Prozesse stehen in abhängigen und unabhängigen Reihenfolgen zueinander, weswegen eine Betrachtung der gesamten Bereitstellungskette wichtig ist. Als Beispiel zu nennen wäre, dass der Trocknungsprozess von Biomassen vor oder nach der Zerkleinerung erfolgen kann.

Bereitstellungsketten für biogene Festbrennstoffe beschreiben den Weg von der Produktion bzw. dem Anfall der organischen Stoffe bis zu ihrer Nutzung oder Verwertung. Einige Ketten schließen darüber hinaus die entsprechenden Prozesse zur Umwandlung der Brennstoffe in ihre End- bzw. Nutzenergie ein (KALTSCHMITT, 2009). In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt jedoch auf die Bereitstellungsketten gelegt, bei denen die Umwandlung in Nutzenergie lediglich als Einsatzziel angesehen wird und entsprechenden Anforderungen daraus abgeleitet werden.

Die technische Gestaltung von Bereitstellungsketten ist in erster Linie abhängig von den festgelegten angebotsseitigen Rahmenbedingungen der Produktion und dem nachgefragten Verwendungszweck. Die Anforderungen und damit die gestellten Randbedingungen beider Seiten können teilweise erheblich voneinander abweichen. Weiterhin können verschiedene Nachfrager einem Angebot gegenüber stehen oder viele Angebote einem Nachfrager. Somit müssen Bereitstellungsketten in ihren Prozessen flexibel sein, um den Marktteilnehmern gerecht zu werden. Zur Verständigung zwischen den Teilnehmern werden oft Kenngrößen für die Verfahren und Qualitätsanforderungen (Normen) an deren Produkte definiert, wie z.B. Größenklassen für Holzhackschnitzel. Um die jeweiligen Rahmenbedingungen zu erfüllen, ist es nötig die Wirkung der technischen Vorgänge in den einzelnen Prozessabschnitten genau zu kennen. Übergreifend muss jedoch jeder Prozess in die gesamte Bereitstellungskette integriert und das gesamte Verfahren analysiert werden.

2.1.3 Qualitätsmerkmale

Die Qualitätsmerkmale biogener Festbrennstoffe werden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Zum einen in die chemisch-stofflichen Merkmale und zum anderen in die physikalisch-mechanischen. Die chemisch-stofflichen Qualitätsmerkmale beziehen sich im Wesentlichen

auf die Elementarzusammensetzung und die verbrennungstechnischen Eigenschaften, wie Wassergehalt, Heizwert und Aschegehalt. Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften sind häufig schon äußerlich abschätzbar. Zu ihnen gehören die geometrischen Eigenschaften und Abmessungen, die Korngrößenverteilung, Schütt- und Lagerdichte sowie bei kompaktierten Brennstoffen die Abriebfestigkeit (BÖHM, 2005; HARTMANN UND HERING, 2004). In der Tabelle 2-1 sind die qualitätsrelevanten Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren Auswirkungen auf die Bereitstellung und Nutzung aufgelistet.

Tabelle 2-1: Qualitätsrelevante Eigenschaften biogener Festbrennstoffe mit ihren Auswirkungen auf die Bereitstellung und Nutzung (verändert nach HARTMANN UND HERING, 2004)

Qualitätsmerkmal	Auswirkungen
<u>chemisch-stoffliche Eigenschaften</u>	
Elementgehalte	
Stickstoff (N)	NO _x -, HCN- und N ₂ O-Emissionen bei Verbrennung
Schwefel (S)	SO _x -Emissionen und Hochtemperaturkorrosion bei Verbrennung
Chlor (Cl)	Bildung von Salzsäure (HCl), halogenorganischen Verbindungen (Dioxine), Hochtemperaturkorrosion bei Verbrennung
Kalium (K)	Veränderung des Ascheerweichungsverhalten und Hochtemperaturkorrosion bei Verbrennung
Magnesium (Mg), Calcium (Ca)	Veränderung des Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen bei Verbrennung ->schließt Ascheverwertung aus
Schwermetalle	Katalytische Wirkungen für Dioxinbildung, Schwermetallemissionen bei Verbrennung, eingeschränkte Ascheverwertung
Verbrennungstechnische Eigenschaften	
Wassergehalt	Brennwert, Lagerfähigkeit, Selbstentzündung bei Lagerung, Verluste durch mikrobielle Aktivität, Verbrennungstemperatur
Brennwert	Anpassung von Verbrennungsanlagen auslegung
Aschegehalt	Staubemissionen, Entaschungssysteme bei Verbrennungsanlagen, Ascheverwertungsstrategie (Entsorgung)

Ascheerweichungspunkt	Erhöhte Schlackebildung und –ablagerungen, Betriebssicherheit und Wartungsbedarf der Verbrennungsanlage,
<u>physikalisch-mechanische Eigenschaften</u>	
Teilchengometrie, (Stückigkeit)	Aufbereitungsbedarf, Eignung für mechanische Systeme und Feuerungsanlagentypen
Größenverteilung / Feinanteil	Störungen in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildung, Trocknungsverlauf und Belüftungseigenschaften (mikrobielle Aktivität), Staubemissionen beim Um- und Auslagern
Brückenbildungsneigung	Rieselfähigkeit, Störungen bei Umschlagprozessen und bei Brennstoffzuführung in Verbrennungsanlagen
Schütt- bzw. Lagerdichte	Lager- und Transportaufwand, Leistungsbedarf der Förderelemente, Lager- und Vorratsauslegung
Rohdichte	Schütt- und Lagerdichte, Fördereigenschaften, Verbrennungseigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate usw.)
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubentwicklung, Entmischung, Fördersysteme)

Ein großer Einflussfaktor auf die Qualität von biogenen Festbrennstoffen ist die jeweilige Biomasseherkunft. Von verschiedenen geographischen Gebieten, teilweise sogar zwischen mehreren Erntejahren am gleichen Standort und Kultur sind erhebliche Qualitätsunterschiede in den Brennstoffeigenschaften möglich (RAMPEREZ, 2012). Diese Qualitätsschwankungen beziehen sich meist auf die chemisch-stofflichen Eigenschaften. Auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften nehmen die Verfahren bzw. Verfahrensketten, mit denen der Brennstoff aufbereitet und bereitgestellt wird, einen erheblichen Einfluss. Dieser Faktor wird häufig unterschätzt. Beispielsweise kann durch den Einsatz von Schreddern mit schlagenden Werkzeugen keine so hohe Materialqualität erreicht werden, wie mit Holzhäckslern, bei denen schneidenden Werkzeugen verwendet werden. Die eingesetzten Verfahren, sowie die Biomassequellen nehmen z.B. Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeiten, Lagerfähigkeit, Schadstoffemissionen und schließlich auch auf den zu erzielenden Erlös des Biobrennstoffs (HARTMANN UND HERING, 2004).

2.2 Erwerbsobstbau

2.1.1 Allgemeine Grundlagen

Definition

Unter dem Begriff Erwerbsobstbau wird der großflächige Anbau von Kern-, Stein- und Beerenobst in landwirtschaftlichen Betrieben mit einer Mindestgröße von 1.500 m² in geschlossenen Anlagen verstanden (ELLINGER, 2002). Oft wird auch der Begriff Marktobstbau verwendet. Nach der gegebenen Definition gehören auch Beerenobstbestände zum Erwerbsobstbau, also auch die Erdbeere. Da die Erdbeere botanisch jedoch eine Sammelnussfrucht darstellt und Nüsse, sowie Melonen nicht zu den klassischen Obstarten zählen, sind diese Früchte oft von den Betrachtungen ausgelassen. Ähnliches gilt für die Him- und Brombeere, welches Sammelsteinfrüchte sind. Daher wird bei der Verwendung des Begriffes Erwerbsobstbau im eigentlichen Sinne oft der Baumobstanbau mit Kern- und Steinobst gemeint. Auch in dieser Arbeit wird die eingeschränkte Definition des Erwerbsobstbaus angewandt und nur das Kern- und Steinobst betrachtet.

Anbauumfang

Die im deutschen Erwerbsobstbau angebauten Baumobstarten sind Apfel, Birne, Süß- und Sauerkirsche, Pflaume/Zwetschge und Mirabelle/Reneklode sowie mit sehr geringem Anbauumfang auch Aprikosen und Pfirsiche. Der Anbau dieser Kulturen erstreckt sich über hoch spezialisierte Regionen. Diese intensiven Anbaugebiete sind in Baden-Württemberg die Bodenseeregion, der Ortenaukreis und der mittlere Neckarraum. Weiterhin sind schwerpunktbildende Anbauregionen das südliche Rheinland, der Mainzer Raum, die Region an der Niederelbe und sächsischen Elbe sowie Potsdam-Mittelmark (DESTATIS, 2006).

Der Anbauumfang wurde in der letzten Baumobstanbauerhebung im Jahr 2007 ermittelt. Danach sind in Deutschland knapp 48.000 ha mit Baumobst bestockt. Diese Fläche wird von 11.500 Betrieben bewirtschaftet. Die in Deutschland mit Abstand wichtigste Kultur stellt der Apfel mit 66% der Anbaufläche dar. Danach folgen Süß- und Sauerkirsche mit zusammen knapp 19% der Fläche (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2012). Die deutschlandweit wichtigsten Sorten bei Tafeläpfeln sind die Sorten Elstar, Cox Orange, Jonagold, Gala, Boskoop, Braeburn,

Berlepsch und Jonagored. Diese acht Apfelsorten stellen mit ca. 75% Anbauumfang die Spitzengruppe bei den Apfelanlagen (LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NRW, 2004).

Pflanzsystem

Das Pflanzsystem der Apfelplantagen wandelte sich seit den 80er und 90er Jahren stark. Vor dieser Zeit waren Apfelanlagen durch geringe Pflanzdichten, starkwachsende Unterlagen und großkronige Bäume mit einer langen Standzeit von 50 und mehr Jahren gekennzeichnet. Der moderne Erwerbsobstbau baut Apfelbäume mit schwach wachsenden Unterlagen in Dichtpflanzungen an (SCHERR, 2002a). Dies wird auch durch die statistischen Erhebungen des Landesamts für Datenverarbeitung und Statistik NRW von 2004 deutlich. In der Zeit von 1987/88 bis 2002 verringerte sich die Anbaufläche von Äpfeln in NRW von 2.109 ha auf 1.877 ha. Im gleichen Zeitraum stieg die Anzahl der insgesamt angebauten Apfelbäume von 2,7 Mio. auf 4,5 Mio. Bäume (LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NRW, 2004). Diese Statistik zeigt, dass der Anteil der modernen Dichtpflanzungen mit kleinen Einzelbäumen deutlich zugenommen hat.

Diese vorherrschenden Pflanzsysteme werden als Spindel oder schlanke Spindel bezeichnet. Die Baumzahlen erreichen 3.000 und mehr Bäumen pro Hektar, die Lebensdauer einer Obstanlage liegt heute zwischen 12 und 15 Jahren (SCHERR, 2002a). Diese Plantagen gelangen in einen frühzeitigen Ertragsbeginn, oft schon ab dem dritten Standjahr. Weiterhin sind diese Anlagen durch hohe Fruchterträge und –qualitäten pro Flächeneinheit gekennzeichnet. Die fast ausschließlich verwendete Apfelunterlage in ganz Europa ist die vegetativ vermehrte M9 aus der sogenannten Malling Reihe (WEBER, 2002). Der Nachteil dieser schwach wachsenden Unterlage ist die schlechte Verankerung des Baumes im Boden, weshalb für diese Anlageform ein Unterstützungsgerüst in Form eines Einzelbaumpfahls oder eines Drahtrahmens erforderlich ist (KÖPCKE, 2012).

Für einzelne Baumpfähle eignen sich Nadelholzpfähle von mindestens 4 cm Durchmesser, welche im unteren Bereich mit Teeröl oder Holzschutzsalzen imprägniert werden (KÖPCKE, 2012). Die Kosten für einen Pfahl betragen zwischen 2,00 bis 2,50 €. Da die Imprägnierung mit Teeröl negative Folgen für die Umwelt haben kann, werden zum Teil andere Pfahlmaterialien benutzt. Beispielweise können Robinien- oder Akazienpfähle verwandt werden, die ohne eine Imprägnierung die Standzeit von 10-15 Jahren überdauern. Die

Kosten für diese Pfähle sind jedoch höher und liegen ca. bei 3,00 bis 4,50 € (SCHERR, 2002a; LEPSIS UND BLANKE, 2007).

Aus Kostengründen und der Vorzüglichkeit von Dichtpflanzungen bei Bewirtschaftung und Ernte nimmt das Pflanzsystem mit sogenannten Drahtrahmenunterstützungsgerüsten zu. Bei diesem System, mit einem Pflanzabstand der Obstbäume in der Reihe von 1,50 m und dichter, werden schwächere Einzelpfähle verwandt, die an dem Drahtrahmen stabilisiert werden. Diese schwächeren Einzelpfähle können aus Bambus bzw. Tonkin oder aber aus Robinien- oder Akazienholz bestehen. Die Zopfstärke (Stelle mit geringstem Durchmesser) kann unter drei Zentimeter betragen. Alle 8 bis 10 m werden stärkere Pfähle verwandt, an denen der Draht gespannt wird. In der Praxis werden verzinkte Eisendrähte oder Stahldraht eingesetzt. Je 100 m Spanndraht ist ein Drahtspanner erforderlich. Meistens werden ein oder zwei Drahtlitzen gezogen, an denen die schwächeren Pfähle und der Baum fixiert werden. An den Reihenden werden Erdverankerungen für die Drähte gesetzt, die das gesamte Gerüst stabilisieren. Die stärkeren Pfähle können direkt als Trägergerüst für ein mögliches Hagelschutznetz eingesetzt werden, müssen dann aber entsprechend lang und stabil sein. Als Material für diese 8-12 cm starken Pfähle eignen sich imprägniertes Nadelholz, Akazienholz oder Beton. Die Materialkosten pro Einzelbaum ohne Hagelschutznetz belaufen sich dabei auf 0,70 bis 2,50 € je nach Pflanzdichte. Soll das Stützgerüst direkt für die Aufnahme eines Hagelschutznetzes dienen, erhöhen sich die Kosten um 0,50 - 1,50 € (SCHERR, 2002a; KÖPCKE, 2012). Sowohl das System mit einzelnen Baumpfählen, als auch das Drahtrahmengerüst sind in der Praxis verbreitet.

2.2.2 Schnittholz

Schnittmaßnahmen

Die Gesamtheit aller Schnittmaßnahmen in einer Obstplantage wird unter dem Begriff der Kronenerziehung zusammengefasst (LINK, 2002). Neben dem Ziel bestimmte Baumformen oder Anlagesysteme, wie z.B. Halb-, Hochstamm oder Spindelanlage mit dem Schnitt zu erziehen, ist die wichtigste Pflegemaßnahme im Obstbau der Ertragsschnitt. Eine scharfe Trennung zwischen Ertrags- oder Formschnitt ist nicht gegeben.

Die Schnittmaßnahmen dienen hauptsächlich dazu, das Gleichgewicht zwischen vegetativem und generativem Wachstum beizubehalten bzw. herzustellen (BAAB UND LAFER, 2005). Der Wechsel von Jahren mit starkem vegetativem Wachstum gefolgt von einer übermäßigen Fruchtbildung und umgekehrt, wird als Alternanz bezeichnet. Der Erwerbsobstbauer verfolgt mit den Schnittmaßnahmen das Ziel, gleichmäßige und hohe Obsterträge von guter Fruchtqualität und –haltbarkeit zu erzeugen (LINK, 2002). Gleichzeitig werden die Bäume in ihrer Form beeinflusst. Damit werden die Plantagen in einen pflegeleichten, stabilen und damit wirtschaftlichen Zustand überführt, der für den Erwerbsobstbau charakteristisch ist.

Durch Wechselwirkungen zwischen vegetativen und generativen Sprossabschnitten der Obstgehölze entsteht ein Ordnungsprinzip innerhalb der Pflanze. Das vegetative beeinflusst das generative Wachstum und umgekehrt. Durch diesen Vorgang, der auch als korrelative Hemmung bezeichnet wird, ist die Blütenbildung auf bestimmte Bereiche in der Baumkrone beschränkt. Die höchste Blütendichte ist in mittelmäßig gehemmten Sprossabschnitten zu finden. Dies bedeutet, dass der Hauptfruchtansatz in bestimmten Sprossdicken und –längen gebildet wird. Diese Sprosssteile werden auch als „optimale Fruchtsprossstärke“ bezeichnet (DOLEGA UND LINK, 2002). Ziel der Kronenerziehung ist daher diese Bereiche zu fördern bzw. durch die Schnittmaßnahmen gezielt diese Zonen zu bilden.

Bei der praktischen Durchführung der Schnittmaßnahmen kann zwischen dem Auslichten (Wegschneiden) und dem Zurückschneiden (Anschneiden) unterschieden werden. Beim Auslichten werden ganze Äste, Zweige und Triebe entfernt, die ein- und mehrjährig sind. Damit wirkt sich das Auslichten weniger auf die korrelativen Beziehungen im Astsystem aus und regt weniger das Wachstum an, als das Zurückschneiden (LINK, 2002). Werden dagegen Äste, Zweige oder Triebe angeschnitten, wird die Spitzenknospe entfernt und die bestehende Apikaldominanz aufgehoben. Durch hormonelle Reaktionen werden basal liegende Knospen zum Austrieb stimuliert, das Wachstum wird angeregt (NULTSCH, 2001). Beim Anschneiden wird überwiegend einjähriges Holz entfernt.

Weiterhin werden Schnittmaßnahmen nach ihrem Zeitpunkt der Durchführung eingeteilt. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit des Sommer- und Winterschnitts. Der Sommerschnitt hemmt das Wachstum tendenziell, schafft gute Lichtbedingungen für die Fruchtausfärbung, verringert jedoch bei zu starkem Schnitt die Blütenknospen, was zur Ertragsminderung führt (LINK, 2002). Der meistverbreitete Winterschnitt fördert das Wachstum. Das gesamte

Kronenbild kann durch den entlaubten Zustand im Winter besser überblickt werden. Die im heutigen Erwerbsobstbau verwendeten schwachwachsenden Unterlagen induzieren sogenannte „ruhige Bäume“. Das Triebwachstum ist von der Physiologie der Bäume her geringer, sodass gezielt steil wachsende Äste und Zweige entnommen werden, waagrecht ausgerichtete, sogenannte Fruchttäste, bleiben bestehen (SCHULZ UND GROSSMANN, 2002). Im Bereich der Schnittwunden aus dem Winterschnitt und an anderen wuchsbegünstigten Sprosszonen bilden sich Neutriebe (Schosser), welche im Sommer vor ihrem Verholzen leicht abgerissen werden können (Sommerriess) (LINK, 2002). Der Winterschnitt in Zusammenhang mit dem Sommerriess ist im Erwerbsobstbau derzeit die gängige Praxis und wird für die weitere Verfahrensbeurteilung der Schnittholzsammlung als Standardverfahren angenommen.

Mit zunehmender Rationalisierung in der Landwirtschaft nimmt auch der Mechanisierungsgrad bei den Schnittmaßnahmen zu. Wogegen früher ausschließlich mit mechanischen Handscheren geschnitten wurde, werden heute weitestgehend pneumatische oder elektrisch angetriebene Schnittwerkzeuge verwendet (BAAB, 2011). Die bisher beschriebenen Schnittvarianten und –auswirkungen beziehen sich weitestgehend auf den manuellen, individuellen Schnitt, der für jeden Baum, Ast, Zweig oder Trieb abgestimmt ist. Dieser Schnitt wird auch als „selektiver Schnitt“ bezeichnet (LINK, 2002). Dagegen werden Verfahren des maschinellen Schnitts (Gesamtschnitt) immer bekannter. Dabei werden rotierende oder oszillierende Werkzeuge (Sägeblätter, Flügelmesser oder Mähbalken) an verstellbare Trägeregestelle angebaut, die an Plantagenschlepper montiert werden (KLEISINGER UND SINN, 2002; BAAB, 2011). Bei diesem Verfahren werden alle Zweige außerhalb der eingestellten Schnittebene entfernt. Diese Zweige sind fast ausnahmslos einjährige Triebe. Die Bäume werden geometrisch betrachtet zu Pyramidenstümpfen geschnitten (BAAB, 2011). Die Verzweigungsdichte im Baum nimmt durch den maschinellen Schnitt zu. Dies mindert die Fruchterträge zwar nicht, jedoch ergeben sich bei mehrjähriger Anwendung negative Einflüsse durch eine höhere Windanfälligkeit, sowie auf die Fruchtqualität bezüglich der Fruchtgröße und –ausfärbung. Den unerwünschten Effekten kann mit einer konsequenten Ausdünnung entgegengewirkt werden (BAAB, 2011). In der obstbaulichen Praxis wird daher oft eine Mischung aus maschinell und selektivem Schnitt durchgeführt. Dabei wird in zwei aufeinanderfolgenden Jahren im Spätwinter maschinell geschnitten und im dritten Folgejahr eine selektiv Schnittmaßnahme durchgeführt (LINK, 2002).

Klassische Schnittholzverwertung

Die entstehende Schnittholzmasse wird während der Schnittmaßnahmen in die Baumreihen der Obstplantage fallen gelassen. Nach dem Schnitt kann von einem flächigen Anfall des Schnittholzes ausgegangen werden (KROMER ET AL., 1982). Für jede weitere verfahrenstechnische Betrachtung ist es zunächst nötig das Astmaterial konzentriert in eine Mittenablage zwischen die Baumreihen zu bringen. Angelehnt aus der Grünfütterbergung wird das Schnittholz zu einem Schwad geformt. In anschließenden Verfahrensschritten kann das Holz definiert aus dem Schwad aufgenommen werden. Hinsichtlich der technischen Ausführung stehen Einkreisel- und Zweikreiselschwader zur Verfügung (KROMER ET AL., 1982). Diese sind mit waagrecht rotierenden Gummilappen oder Besenelementen an hydraulisch verstellbaren Auslegearmen ausgestattet (KLEISINGER UND SINN, 2002). Oft werden diese Geräte auch als „Reihenputzer“ bezeichnet, da sie das Schnittholz aus den Plantagenreihen „kehren“ ohne dabei die Baumstämme zu beschädigen (KROMER ET AL., 1982). Dieser Verfahrensschritt kann mit der klassischen Schnittholzverwertung, dem Mulchen, oder den neuen Schnittholz bergenden Verfahren kombiniert werden. Dazu wird an der Fronthydraulik des Plantagenschleppers der „Reihenputzer“ (Abbildung 2-2), in der Heckhydraulik je nach gewähltem Verfahren die entsprechenden Anbaugeräte montiert.



Abbildung 2-2: Reihenputzer zum Entfernen von Schnittholz aus der Baumreihe
(Bildquelle: OBSTWEIN-TECHNIK, 2012)

Heutiger Standard im Erwerbsobstbau ist es, das im Schwad befindliche Schnittholz zu zerkleinern und zur Humus- und Nährstoffversorgung in der Plantage zu belassen (KLEISINGER UND SINN, 2002). Die Zerkleinerung kann mit Sichel- oder Schlegelmulchgeräten durchgeführt werden. Diese werden in der Regel an die vorhandenen Plantagen- oder Ackerschlepper angebaut. Gleichzeitig werden mit den Mulchern die begrünten Fahrgassen in den Obstanlagen gepflegt. Aufgrund der robusteren Bauweise, dem breiteren Einsatzgebiet und der kompakteren Bauform werden heute meist Schlegelmulchgeräte eingesetzt. Ein weiterer großer Vorteil der Schlegelmulcher ist die gleichmäßige Zerkleinerung des Schnittholzes und die Breitablage des Materials (KROMER ET AL., 1982). Dadurch wird eine schnellere Stoffumsetzung der Biomasse gewährleistet.

Die Kosten der klassischen Schnittholzverwertung werden vom KTBL (2010) mit ca. 90 € pro Hektar und Jahr veranschlagt. Darin sind enthalten zwei Arbeitsstunden für einen Maschinenführer, die fixen und variablen Kosten für einen Plantagenschlepper und die fixen und variablen Kosten für einen Schlegelmulcher mit 2 m Arbeitsbreite. Darin nicht enthalten sind die Kosten für die Pflege der Grünstreifen.

Die zerkleinerte Biomasse, bestehend aus Holz-, Laub- und Grasmulch, kann in der Obstplantage ähnliche biologische Effekte erzeugen, wie der Schlagabraum im Forst. Verringerung der Bodenverdunstung, Herabsetzen des oberflächigen Wasserabflusses, Förderung der Bodenbelebung sowie zusätzlicher Humus- und Nährstoffeintrag sind die positiven Haupteffekte dieser Verfahrensweise (JÄGER ET AL., 1998).

Jedoch darf die Nährstoffwirkung des reinen Schnittholzes nicht überbewertet werden. Auch MOSER (1981) stellte in seinen Untersuchungen zu Energiegehalten der Reststoffe aus Intensivkulturen fest, dass das Schnittholz nur einen sehr geringen Düngerwert im Vergleich zum Mulchgras und Blattlaub besitzt (Abbildung 2-3).

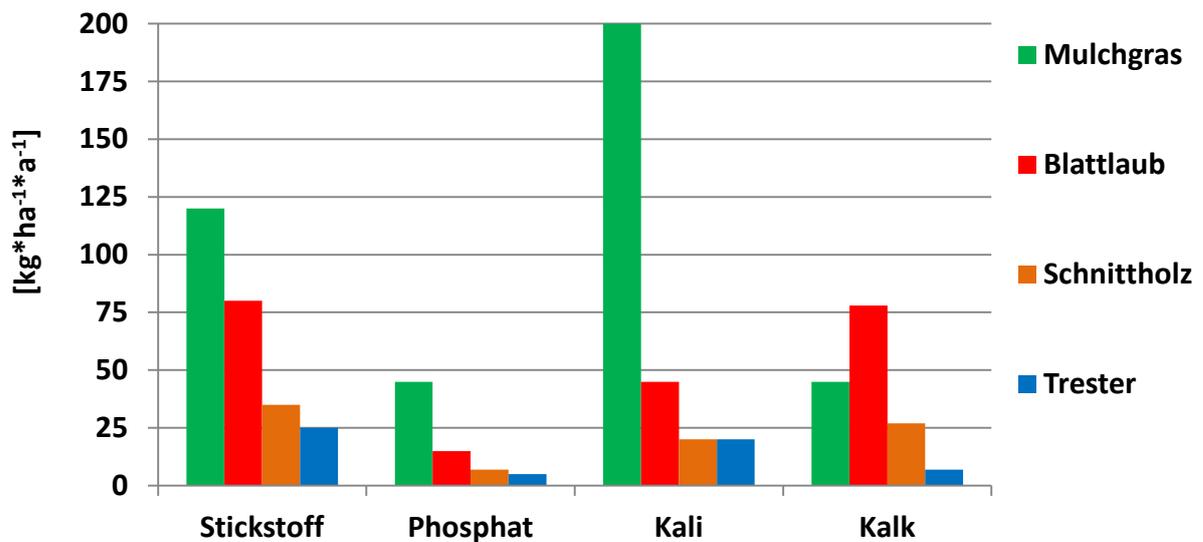


Abbildung 2-3: Düngergerhalte von Mulchgras, Blattlaub, Schnittholz und Trester bei der Baumobsterzeugung (verändert nach MOSER, 1981)

Auch wenn die Daten von Moser von 1981 auf damaligen Unterlagen, Sorten und Anbausystemen basieren, kann davon ausgegangen werden, dass in der heutigen Praxis die absoluten Nährstoffgehalte sich eventuell verschoben oder verändert haben, jedoch das Verhältnis im gleichen Rahmen bleibt. Daher kann angenommen werden, dass das Schnittholz auch heute nur einen sehr kleinen Beitrag zum Nährstoffhaushalt in einer Obstplantage beiträgt. Bei einer Entnahme des Schnittmaterials zur energetischen Verwertung kann ein Großteil der Hauptnährstoffe mit Ausnahme von Stickstoff über ein Ascherecycling auf die Fläche zurückgeführt werden. So können Nährstoffkreisläufe annähernd geschlossen werden (OBERNBERGER, 2009).

Weiterhin ist das Kohlenstoff- zu Stickstoff-Verhältnis (C/N-Verhältnis) von Holz mit 300:1 für eine schnelle Kompostierung und damit Stoffumsetzung sehr ungünstig (ALBURQUERQUE ET AL., 2006). In der Anfangsphase der Zersetzung kann sogar zunächst von einer Stickstofffestlegung ausgegangen werden. Die weiteren biologischen Effekte, wie z.B. die Verringerung der Erosionsgefahr oder die Förderung der Bodenaktivitäten, werden durch die begrünten Fahrgassen und durch den entstehenden Grasschnitt sichergestellt.

Ein weiter viel diskutiertes Thema bei der klassischen Schnittholzverwertung ist die Gefahr der Verbreitung zahlreicher, vor allem pilzlicher Schaderreger. Die in Frage kommenden Pilze

bilden auf dem Schnittholz Karposoma (Fruchtkörper), welche bei feucht-warmer Witterung Sporen entlassen. Diese führen an den Obstbäumen zu erneuten Infektionen an offenen Schnittflächen und Wunden (KROMER ET AL., 1982). Neben Schaderregern, wie z.B. den Mehлтаupilzen, ist die Verbreitung des sogenannten Obstbaumkrebs (*Nectria galligena*) durch das zeitnahe Entfernen des Schnittholzes nach den Schnittmaßnahmen eine wirkungsvolle Bekämpfungsstrategie. Besonders im biologischen Anbau stellt das Beseitigen von Inokulumquellen oftmals die einzige Möglichkeit dar, die Verbreitung von Schaderregern einzudämmen (BUSCH, 2006).

Schnittholzbergung

Neben dem phytosanitären Aspekt der Schnittholzbergung ist die energetische Betrachtung dieses Themas in den letzten Jahren vor dem Hintergrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien stark angewachsen. Neben dem Hauptprodukt Obst fällt ein biogener Festbrennstoff bei der Produktion an. Diese als Kaskadennutzung bezeichnete Nutzungsstrategie kann darüber hinaus einen Beitrag zum Betriebseinkommen darstellen oder den betrieblichen Energiebedarf teilweise oder ganz decken.

Ein wichtiger Faktor bei der Erschließung neuer Rohstoffpotenziale ist ein hoher Mechanisierungsgrad (FREY, 2012). Grundsätzlich setzt die Schnittholzbergung mit dem Ziel der Energiegewinnung eine Zerkleinerung und Trocknung des Materials voraus. Weiterhin muss das Material aus der Plantage geborgen werden, was eine Konzentration des Schnittmaterials in einem Schwad voraussetzt (KROMER ET AL., 1982). Da diese Technik aus der klassischen Schnittholzbergung bekannt und verbreitet ist, stellt dieser Verfahrensschritt kein Problem dar. Technisch partizipiert die Obstschnittholzbergetechnik von ähnlichen Themengebieten, wie z.B. der Schnittholzbergung aus Weinbergen oder Olivenbaumplantagen. In der Vergangenheit wurden einige technische Entwicklungen mit dem Ziel der Rohstoffbereitstellung aus diesen Plantagen getätigt. Zum einen wurden Schnittholz-Sammel-Häcksler und zum anderen Schnittholz-Ballenpressen konstruiert. Diese Geräte werden am Heck von Schmalspurschleppern angebaut und über die Zapfwelle angetrieben (FREY, 2012).

Bekannte Techniken sind beispielsweise ein Schnittholz-Mulchgerät der Firma Kuhn (Abbildung 2-4 oben), ein Rebholzhäcksler von der Maschinenbau GmbH Stoll, ein Mäh-Ladewagen vom holländischen Hersteller Perfect Van Wamel (Abbildung 2-4 Mitte) und eine Schnittholz-Ballenpresse des italienischen Herstellers Caeb International (Abbildung 2-4 unten). Weiterhin sind italienische und spanische Hersteller bekannt, welche für den regionalen Markt ähnliche Maschinen herstellen. Aus den 1980er Jahren, in denen das Themengebiet der Schnittholzbergung aufgrund der Ölkrisen betrachtet wurde, sind ebenfalls ähnliche technische Entwicklungen erforscht worden. Diese wurden zum Teil von den oben genannten Herstellern aufgegriffen und weiterentwickelt.

Trotz der langen Entwicklungsgeschichte der Schnittholzbergetechnik sind bis heute kaum Maschinen im praktischen Einsatz. Viele Maschinen werden bisher nur als Prototypen oder in Kleinstserien gefertigt. Weiterhin fehlt Fachwissen über die Arbeitsweise sowie Leistungsvermögen dieser Entwicklungen. Aus diesen Gründen liegen noch wenige Untersuchungen vor, die Aussage über den entstehenden biogenen Festbrennstoff und dessen Brennstoffeigenschaften liefern. Deswegen wurde für die vorliegende Dissertation folgende erste Arbeitshypothese



Abbildung 2-4:
Schnittholz-sammelgeräte der Firma Kuhn, Perfect und Caeb (Bildquellen: PUDE, 2010; PERFECT, 2011; CAEB 2011)

aufgestellt, mit der das Themenfeld der Schnittholzbergung aus Obstplantagen untersucht werden soll:

Die bisher ungenutzten Holzpotenziale aus dem jährlichen Ertragsschnitt von Obstplantagen können durch neue Schnittholzsammeltechnik als Energieträger bereitgestellt werden.

2.2.3 Rodungsholz

Obstbaubetriebe sind aus verschiedenen Gründen gezwungen in regelmäßigen Abständen ihre Obstplantagen zu erneuern bzw. zu roden. Aufgrund einer schnelleren und besseren Marktanpassung der angebauten Sorten auf die Nachfrage der Verbraucher und der eingangs erwähnten Veränderung der Pflanzsysteme liegt die Umtriebszeit einer modernen Apfelanlage bei 12-15, max. 18 Jahren. Noch in den 80er und 90er Jahren lag die Umtriebszeit bei 15-25 Jahren (SINN UND MOSER, 1982). Es existieren vereinzelt bis heute alte starkwachsende Anlagen, die bis zu 50 Jahre alt sind (NOGA, 2009). Weiterhin hören immer mehr Betriebe mit dem Obstanbau auf und hochspezialisierte Betriebe vergrößern sich. Besonders neu verfügbare Sorten mit besseren Eigenschaften veranlassen Obstbauern Plantagen auch vor einer Umtriebszeit von 12-15 Jahren zu roden. Aus den genannten Gründen kommt es häufig zu Neuanlagen von Obstplantagen.

Die heute verbreitet angebauten schwachwachsenden Anlagen sind durch einen frühzeitigen, hohen und gleichmäßigen Obstertrag gekennzeichnet. Durch den Ertragsschnitt, wie im Kapitel 2.2.2 beschrieben, und die schwachwachsenden Unterlagen wird in die Physiologie der Pflanzen eingegriffen. Dies führt dazu, dass Bäume früher in ihre Altersphase gelangen, als auf starkwachsenden Unterlagen. In der Altersphase sind überwiegend altes Fruchtholz und kleine Früchte zu finden. Sie wird auch als generative Phase mit der typischen Samenbildung bezeichnet. Die Abbildung 2-5 zeigt den Obstertrag in Abhängigkeit vom Alter und die Lebensphasen eines Apfelbaums im heute typischen Pflanzsystem. Allgemein wird der gesamte Alterungsprozess auch als „Vergreisung“ oder Seneszenz bezeichnet.

Der Obstanbauer kann mit den Schnittmaßnahmen in gewissem Ausmaß der Seneszenz vorbeugen bzw. entgegenwirken, in dem er einen Verjüngungsschnitt durchführt. Dabei

werden die Kronenäste der Bäume bis auf den Stamm zurückgenommen. Einzelne Zweige, sogenannte Zugäste, bleiben erhalten (SCHULZ UND GROSSMANN, 2002). Die Krone wird so erneuert. Dieses Prinzip beruht auf der Besonderheit von Pflanzen, dass der Prozess der Seneszenz im Unterschied zu Tieren oder Menschen teilweise umkehrbar ist (BUCHANAN-WOLLASTON, 1997). Jedoch gerade bei schwachwachsenden Unterlagen ist der Kohlenhydrathaushalt und somit auch der Wasseraustausch zwischen Wurzel und Krone eingeschränkt, sodass die Seneszenz kaum gebremst wird. Diese physiologischen Besonderheiten können weiterhin Einfluss auf brennstofftechnische Eigenschaften haben.

Ein weiterer Faktor bei der schnelleren Alterung der Plantagen ist ein zunehmender Krankheitsdruck durch die Intensivierung des Anbaus. Durch die höhere Baumanzahl pro Hektar und die jährlichen, in hoher Anzahl auftretenden Wunden, verursacht durch die Schnittmaßnahmen, kommt es zu einer schnelleren Verbreitung von Schaderregern, vor allem dem Obstbaukrebs (*Nectria galligena*) (LANGE ET AL., 2002).

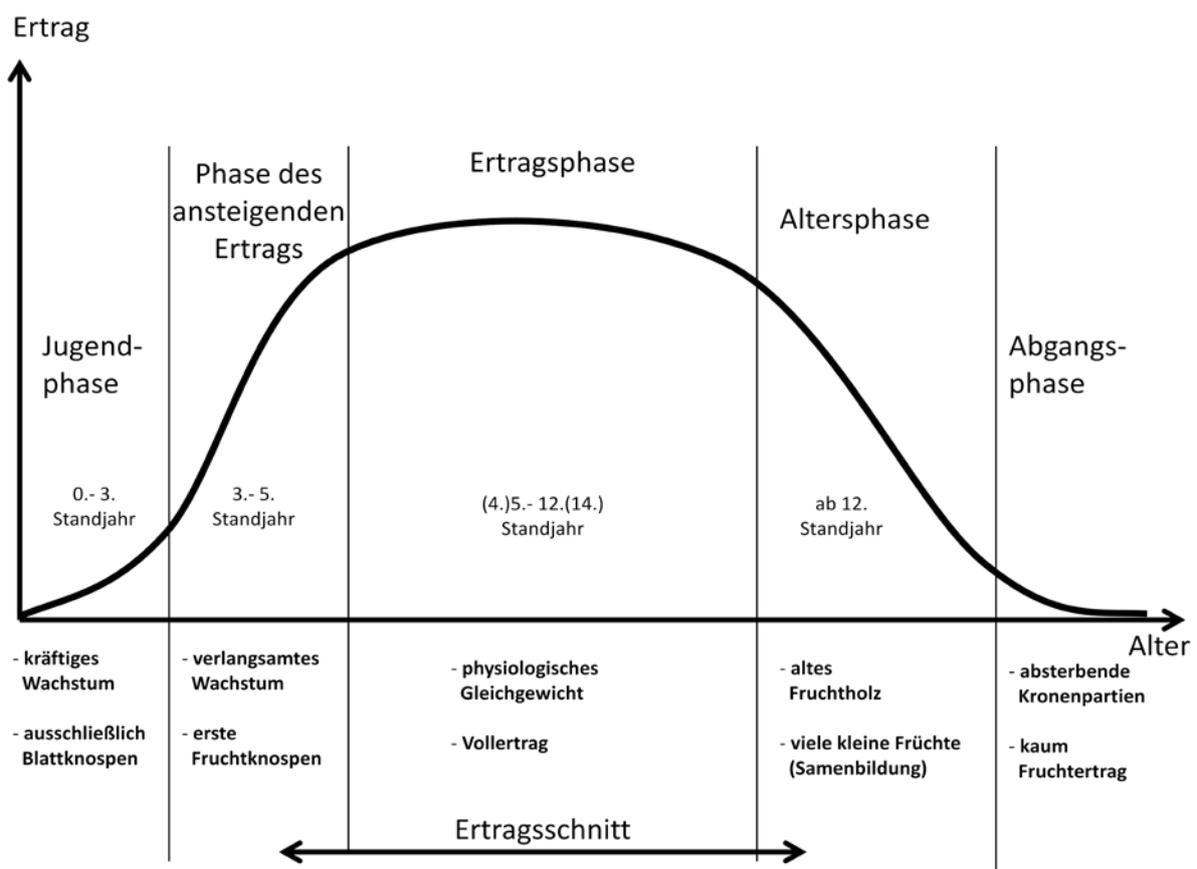


Abbildung 2-5: Lebensphasen eines Obstbaumes in einer klassischen Erwerbsanlage (eigene Darstellung, nach NOGA, 2009)

Aus den oben beschriebenen physiologischen Gründen und der Marktanpassung der Obstsorten ist die Rodung von Obstplantagen nach 12-15 Jahren erforderlich. Um eine Neuanpflanzung im Frühjahr zu realisieren, werden sämtliche Rodemaßnahmen im Spätwinter durchgeführt, wenn das Obst geerntet und das Laub abgefallen ist. Ist eine Herbstpflanzung in der Arbeitsspitze während oder kurz nach der Obsternte möglich, ist diese der Frühjahrespflanzung vorzuziehen. Ein besserer Bodenschluss, die Winterfeuchte und der frühere Wuchsbeginn sind die Vorteile der Herbstpflanzung (SCHERR, 2002a). Die Rodemaßnahmen müssen in diesem Fall direkt nach der Ernte erfolgen. Der Laubfall ist zu dieser Zeit meist noch nicht komplett erreicht, was einen negativen Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften hat. Beispielsweise sinkt mit dem Blattfall der Chlorgehalt erheblich. Eine sofortige Rodung von Obstplantagen unabhängig vom Zeitpunkt wird bei einigen meldepflichtigen Schaderregern nötig, um ihre Ausbreitung zu verhindern. Nach einer Rodemaßnahme, mit der Absicht eine neue Obstplantage zu etablieren, ist die kurze Aufeinanderfolge von Rodung und Pflanzung vorteilhaft. Die Bodenmüdigkeit, auch als Selbstunverträglichkeit bezeichnet, prägt sich in der Neuanpflanzung geringer aus, als bei einer kurzen bis mittleren Ruhephase des Bodens (NAEF ET AL., 2012).

Bodenmüdigkeit beschreibt ein bis heute ungelöstes Problem im Erwerbsobstbau und im Baumschulwesen. Bei diesem persistenten Phänomen treten Wuchs- und Ertragsdepressionen beim Nachbau derselben Pflanzenart bzw. von nah verwandten Arten aus der Pflanzenfamilie der Rosengewächse (*Rosaceae*) auf gleicher Fläche auf (KALIEß, 2008). Den Erwerbsanbau betreffende Obstgehölze sind vor allem Äpfel, Birnen, Kirschen und Pflaumen (BAUERNBLATT, 2011). Es existieren verschiedene Theorien bezüglich möglicher Auslöser der Bodenmüdigkeit. Zum einen werden bodenphysikalische und –chemische Faktoren, zum anderen Schadorganismen, wie z.B. Nematoden, für die Nachbauschwierigkeiten diskutiert (KALIEß, 2008). Andere Theorien gehen von mikrobiologischen Auslösern aus. Dies können unter anderen Bakterien und Actinomyzeten sein (NOGA, 2009). Derzeit geht die Fachliteratur von einem Ursachenkomplex aus, der jedoch bisher nicht belegt oder genauer beschrieben wurde (BAUERNBLATT, 2011; NAEF ET AL., 2012). Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Auswirkungen der Bodenmüdigkeit sind im Wesentlichen kulturtechnische Maßnahmen, eine Bodendesinfektion bzw. Bodenentseuchung und biologische Maßnahmen (KALIEß, 2008; NAEF ET AL., 2012). Zu den biologischen Maßnahmen zählen spezielle Mikroorganismen als

Antagonisten (KALIEß, 2008). Die Bodenentseuchung mit z.B. Chlorpikrin ist rechtlich nicht mehr durchführbar, eine Bodendesinfektion durch Dampfgare des Bodens technisch und wirtschaftlich nicht abzubilden (NOGA, 2009). Derzeit praxisrelevant sind vor allem die kulturtechnischen Maßnahmen. Dazu gehören der Landwechsel und ein Obstartenwechsel, was jedoch nur eingeschränkt möglich ist (KALIEß, 2008). Weiterhin sind Pflanzlochbehandlungen mit frischer Blumenerde, ein möglichst sauberes Entfernen des Wurzelstocks mit Feinwurzeln, Dichtpflanzungen und zeitnahe Pflanzungen nach der Rodung die effektivsten Gegenmaßnahmen (NOGA, 2009; NAEF ET AL., 2012).

Verfahren zur Obstbaumrodung

Vor jedem Rodeverfahren ist es zunächst nötig, die Obstplantage für die Rodung vorzubereiten. Dies bedeutet, dass alle Nichtholz-Bestandteile aus der Anlage entfernt werden müssen. Dies sind falls vorhanden Drahtgerüste, Erdanker, Beregnungseinrichtungen, Hagelschutznetze und Verbisschutz aus Kunststoff oder Draht. Je nach angewendeten Rodeverfahren können Bestandteile wie Hagelschutznetze oder Wasserleitungen von Beregnungseinrichtungen installiert bleiben. Die Rodemaßnahmen selbst werden durch verschiedene Verfahren realisiert. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren beschrieben:

Das einfachste jedoch gleichzeitig zeitaufwendigste Verfahren stellt eine **manuelle Rodung** dar. Dabei wird zunächst das Kronengerüst bis zu einem Durchmesser von ca. 4 cm mittels Astscheren abgeworfen (SCHERR, 1984). Dieses Astmaterial wird in der Regel mit Mulchern, wie bei der klassischen Schnittholzverwertung beschrieben, zerkleinert und in der Plantage gelassen. Stärkere Äste und der Stamm können zu Brennholz für Kleinf Feuerungsstätten aufgearbeitet werden. Dafür stehen Motorsägen, Äxte und Holzspaltmaschinen zur Verfügung. Der Stamm wird bis auf eine Höhe von 0,5-1,0 m über der Erde abgeschnitten. Der Reststamm zusammen mit der Wurzel wird anschließend mit am Schlepper angebauten Heckkraftheber, Frontlader, Seilwinde oder Kette im Direktzug aus dem Erdreich geborgen. Anschließend wird die Wurzel vom Stamm abgetrennt und entsorgt oder auf dem Feld verbrannt (KLEISINGER UND SINN, 2002).

Vorteil dieses Verfahren ist eine weitestgehende Eigenmechanisierung, ein mittlerer bis geringer Energieaufwand, eine teilweise Rohstoffnutzung als Brennholz und eine Möglichkeit zur Einzelreihenrodung bzw. der Rodung von kleinen Parzellen. Ein Nachteil dieses

Verfahrens ist der hohe Zeitaufwand bedingt durch den geringen Mechanisierungsgrad. Es sind viele einzelne Arbeitsschritte nötig, die teilweise erheblich Zeit beanspruchen. Zur Rodung von großen Flächen scheidet dieses Verfahren zumeist aus. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass viele (Fein-) Wurzeln im Boden verbleiben, da beim Herausziehen diese leicht abbrechen. Die zurückbleibenden Wurzeln fördern die Bodenmüdigkeit.

Eine Abwandlung dieses Verfahrens mit einem höheren Mechanisierungsgrad stellt der Einsatz von Holzhäckselmaschinen dar. Dabei wird der oberirdische Teil der Bäume kurz über dem Boden abgeschnitten und der gesamte Baum mit Krone einem Holzhäcksler zugeführt. Diese Scheiben-, Trommel- oder Spiralhacker besitzen feststehende Schneidwerkzeuge, mit denen ein definierter Hackschnitzel hergestellt wird (HARTMANN, 2009a). Größere Geräte besitzen aktive Einzüge, die den Baum zum Hackorgan befördern. Weiterhin sind einige Großgeräte mit einer Kranbeschickung ausgerüstet (HARTMANN, 2009a). Alle Geräte besitzen einen Auswurfmechanismus, mit dem die Hackschnitzel auf landwirtschaftliche Anhänger verladen werden können. Die Hackschnitzel werden als Brennstoff in Heizanlagen oder Kraftwerken genutzt. Teilweise werden die Hackschnitzel jedoch auf dem Acker belassen, da kein Absatz für dieses Produkt vorhanden ist. Die Wurzelstöcke werden anschließend mit Baggern, Rodezinken oder Wurzelstockfräsen aus dem Boden entfernt (KLEISINGER UND SINN, 2002). Werden Wurzelstockfräsen eingesetzt, verbleibt die Wurzelholzmasse zerkleinert im Boden. Bei den anderen beiden Varianten müssen die Wurzeln entsorgt oder verbrannt werden. Voraussetzung für die Verfahrensabwandlung ist, dass die Technik im Betrieb oder als Dienstleistung verfügbar ist. Der höhere Mechanisierungsgrad fordert jedoch mehr Energieinput als das manuelle Verfahren. Vorteile bieten vor allem der kürzere Arbeitszeitbedarf und die Ressourcennutzung der Hackschnitzel, falls Absatzwege oder betriebsinterne Verwendung sicher gestellt sind. Kosten für dieses Verfahren sind nicht zu beziffern, da die verschiedenen Verfahrensschritte sehr individuell gestaltet werden können.

Eine **vollmechanisierte Rodung** klassischer Obstplantagen ist seit ca. Ende der 1980er Jahren möglich. Diese Technik stammt aus der forstlichen Rekultivierung von Nadelholzbeständen nach ihrer Ernte oder nach Kalamitätsereignissen. Für dieses Verfahren werden Forstmulcher und Forstfräse an leistungsstarken Ackerschleppern ab 150 kW eingesetzt (Abbildung 2-6 und 2-7). Die Anbaugeräte sind in der Heckhydraulik von Traktoren montiert. Damit das zu zerkleinernde Material direkt vom Aggregat erfasst werden kann und der

Schlepper durch Baumteile nicht beschädigt wird, ist eine Rückfahreinrichtung am Fahrzeug notwendig (STEHR, 1990).

Der erste Schritt bei diesem Verfahren ist das Zerkleinern des oberirdischen Aufwuchses mittels Forstmulcher (STEHR, 1990). Dabei können Stämme bis zu einem Durchmesser von 40 cm verarbeitet werden (GYSEL, 2012). Die Bäume

werden mit vollständiger Krone angefahren, umgedrückt und vom Rotor des Forstmulchers erfasst (STEHR, 1990). Rotierende Spezialwerkzeuge auf dem Rotor zerkleinern mechanisch die organische Masse und legen diese als Deckschicht auf den Boden (AHWI, 2012). Zu beachten ist bei diesem Verfahrensschritt, dass der Boden befahrbar und nicht zu nass ist.

Ansonsten wird das zu zerkleinernde Holz durch die Krafteinwirkung des Schleppers und Rotors in den Boden gedrückt und nicht ausreichend zerkleinert. Weiterhin treten Bodenverdichtungen durch die schweren Maschinen auf (STEHR, 1990).

Mit dem Mulchen verbleiben Wurzelreste im Boden. Um diese zu entfernen, werden



Abbildung 2-6: Forstmulcher im Einsatz (Bildquelle: WEISSER, 2012)



Abbildung 2-7: Forstfräse im Einsatz (Bildquelle: STÜHMER, 2012)

Forstfräsen eingesetzt (STEHR, 1990). Diese können mit speziellen Hartmetallwerkzeugen den Boden bis zu einer maximalen Tiefe von 50 cm bearbeiten. Dabei werden Wurzeln und anderes organisches Material im Boden zerkleinert, ohne dass die Werkzeuge durch den Boden oder kleine Steine beschädigt werden (AHWI, 2012). Gleichzeitig findet eine Durchmischung des Bodens mit der Holzmasse statt. Auch bei diesem Verfahrensschritt sollte der Boden gut befahrbar sein.

Die Vorzüge des vollmechanisierten Verfahrens sind der geringe Arbeitszeitbedarf und die komplett geräumte Fläche ohne Entsorgungsaufwand der Biomasse, da diese auf der Fläche verbleibt. Daran knüpft auch der Hauptnachteil dieses Verfahrens an, da das Holz nicht für energetische Zwecke genutzt werden kann. Dieses wird durch die Zersetzung im Boden umgesetzt, so dass über einen längeren Zeitraum Nährstoffe nachgeliefert werden. Für die Stoffumsetzung ungünstig ist das zuvor beschriebene C/N-Verhältnis von 300:1. Besonders in der Anfangsphase der Zersetzung kann von einer Stickstofffixierung ausgegangen werden. Werden nach den Obstbäumen auf der Fläche Marktfrüchte, wie z.B. Weizen oder Mais, angebaut, steht der fixierte Stickstoff nicht zur Nährstoffversorgung der Pflanzen zur Verfügung. Weiterhin können die Holzstücke zu Verstopfungen in den Säaggregaten führen. Ebenfalls nehmen die Ablagegenauigkeit und der Saataufbau ab.

Neben dem verlorenen Energieträger Holz muss darüber hinaus erhebliche Energiemenge für den Prozess des Mulchens und Fräsens aufgewandt werden. Aus der Rekultivierung von Kurzumtriebsplantagen ist bekannt, dass für das Forstfräsen ca. 90 Liter Dieselkraftstoff pro Hektar aufgewandt werden müssen (WILWERDING, 2003). Der Kraftstoffverbrauch zum Mulchen der Obstbäume kann mit 30-50% der Bodenfräse kalkuliert werden (FIRUS, 1987). Insgesamt muss für die vollmechanisierte Rodung mit einem Energieaufwand von 1.200-1.350 kWh pro Hektar gerechnet werden. Dies entspricht einer CO₂-Emission von ca. 400 kg [Berechnungsgrundlage: Energiegehalt Diesel = 10,08 kWh*l⁻¹; CO₂-Emission von Diesel 0,12 kg*kWh⁻¹] (KTBL, 2009). Die Kosten für eine Rekultivierung von einer 14-16 jährigen Apfelplantage mittels vollmechanisiertem Verfahren liegen für das oberflächige Mulchen bei 850 – 1.150 € pro Hektar und für das Bearbeiten der Fläche mit einer Forstfräse bei 750 – 950 € pro Hektar. Werden andere Kulturen wie Birnen oder Kirschen gerodet, welche teilweise älter sind und größere Bäume aufweisen, steigt der Preis für die Mulcharbeiten auf bis zu 2.750 € pro Hektar. Die Kosten für das Fräsen bleiben gleich (ANONYMUS, 2012).

Ein weiterer Punkt ist die Verfügbarkeit dieser Rodetechnik. Diese war lediglich in den forststarken Regionen verbreitet und daher in den Obstanbaugebieten kaum verfügbar. Seit den Stürmen Wiebke und Kyrill in den Jahren 1990 und 2007 sind Forstmulcher und –fräsen verbreiteter, sodass heute davon ausgegangen werden kann, dass diese Technik verfügbar ist.

Ein bis heute viel eingesetztes Verfahren zur Rodung von Obstplantagen ist die **Brandrodung**. Dieses Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Verfahrensschritten. Im ersten werden die Bäume in der Obstplantage konzentriert und im zweiten Schritt offen abgebrannt. Dazu werden mittels Radlader, Schlepper mit Frontlader, Planiertrauben oder Bagger mit Rodezinken oder Sieblöffel die Bäume von ihrem Standplatz gelöst und zu einem Haufen zusammengeschoben. Vor allem beim einfachen Zusammenschieben der Bäume mittels Radlader, Planiertraube oder Frontladerschlepper verbleibt die gesamte Wurzelmasse im Boden. Weiterhin bleibt ein ca. 5-20 cm großes Stück Stamm oberirdisch stehen, da die Bäume in der Regel am Veredlungsknoten, dem Übergangsgewebe zwischen vegetativ vermehrter Unterlage und Edelreiser, abbrechen.



Abbildung 2-8: Offener Abbrand von Obstbäumen auf dem Feld (Bildquelle: PUDE, 2010)

Vorteil dieses Verfahrens ist der geringe Aufwand von Arbeitszeit, Maschinen- und Energieeinsatz und die schnelle Flächenverfügbarkeit. Hauptkritikpunkt an diesem Verfahren stellt die Rohstoffvernichtung und die Emissionsbelastung durch den Abbrand dar. Pro Hektar Obstbaumfläche werden ca. 7.500 Liter Heizöläquivalente vernichtet (SCHMID UND

PUDE, 2011). Nach §7 Landesimmissionsschutzgesetz (LImSchG) NRW ist das Verbrennen sowie Abbrennen von Gegenständen im Freien untersagt, soweit die Nachbarschaft oder die Allgemeinheit hierdurch gefährdet oder belästigt werden kann. Die Gemeinden, Städte oder Kreise können auf Antrag Ausnahmegenehmigungen erteilen, wenn lediglich kurzfristig mit Luftverunreinigungen zu rechnen ist (RECHT.NRW, 2012). Auch in anderen Bundesländern wird ähnlich verfahren. Jedoch gibt es Bestrebungen einiger Kreise, Städte und Gemeinden diese Abbrandgenehmigungen in Zukunft nicht mehr zu erteilen. Als Beispiel ist der Kreis Mainz in Rheinland-Pfalz zu nennen (PENSEL, 2012). Neben der Emissions- und Genehmigungsproblematik sind auch pflanzenbaulich die verbleibenden Wurzeln kritisch zu sehen. Neben der Förderung der Bodenmüdigkeit können die Holzreste Probleme bei der Grundbodenbearbeitung und der Pflanzung oder Saat bereiten.

Neues Rodeverfahren

Aus den vorangegangenen Ausführungen wird ersichtlich, dass das Roden von Obstplantagen in der heutigen Praxis viele Schwierigkeiten bereitet. Verfahren sind zwar verfügbar, haben jedoch viele Nachteile oder sind sehr aufwändig. Darüber hinaus wird ein Großteil der anfallenden holzartigen Biomasse vernichtet bzw. ungenutzt oder kaum genutzt zurückgelassen. Teilweise wird sogar von einem Entsorgungsproblem durch die großen anfallenden Massen gesprochen. Vor dem Hintergrund des heute stark diskutierten Klimawandels, den Klimaschutzzielen der Bundesregierung und der Fragen rund um Energieproduktion und –sicherheit, dürfen Energieressourcen nicht verschwendet werden. Besonders wenn auf der einen Seite holzartige Biomassen auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen mit dem Ziel der energetischen Nutzung angebaut werden, sollten Obstbäume, die als Koppelprodukt der Nahrungsmittelproduktion anfallen, nicht ungenutzt bleiben. Diese als Kaskadennutzung bezeichnete Nutzungsstrategie entschärft zusätzlich die „Tank oder Teller“ Diskussion, da neben dem hochwertigen Nahrungsmittel Obst simultan ein Energieträger produziert wird.

Aus diesen Gründen und den Erkenntnissen der bisherigen Rodeverfahren lassen sich Anforderungen an ein neues Rodeverfahren aufstellen:

- vollständige Nutzung des Rohstoffs Holz aus Obstplantagen
- hoher Mechanisierungsgrad und Schlagkraft bei der Bereitstellung dieses Rohstoffs
- weitgehende Entfernung der Wurzelmasse und der Stützpfähle aus dem Boden

- Aufbereitung des Rohstoffes zu einem qualitativ hochwertigen Festbrennstoff

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein Rodeverfahren entwickelt, mit dem alle klassisch angebauten Kernobstbäume in mechanisierten Schritten aufbereitet und als biogener Festbrennstoff bereitgestellt werden können.

Als Basis dieses Verfahrens dient ein Seitenrodepflug (siehe Abbildung 2-9). Diese Technik ist aus der Baumschulpraxis bekannt. Mit dieser Maschine werden die Obstbäume zusammen mit der Wurzel aus dem Boden geborgen. Anschließend werden die gerodeten Bäume auf eine Miete mittels bekannter Ladetechnik vorkonzentriert und gegebenenfalls zur Trocknung gelagert. Im letzten Verfahrensschritt werden die Bäume mit herkömmlicher Schredder- und Siebtechnik zu Holzhackschnitzeln verarbeitet, welche für Biomassefeuerungsanlagen zur Verfügung gestellt werden können (SCHMID UND PUDE, 2011).



Abbildung 2-9: links: Rodepflug RB 60 Klein-Altendorf (Stand 2012); rechts: Rodeflug bei der Rodung

Neben der generellen Einsatztauglichkeit der Maschine und den Anpassungen der Funktionselemente auf die speziellen Anforderungen sollen zusätzlich Parameter zu Qualität der Arbeitserledigung und der Holzmassenerträge erhoben werden. Ein weiteres Ziel ist es, eine Qualitätsbeurteilung des Rodeverfahrens und des gewonnenen Rohstoffs durchzuführen. Zur Bearbeitung des Themenkomplexes der Bereitstellung von Rodungsholz als biogener Festbrennstoff wurde folgende Arbeitshypothese aufgestellt:

Mit dem zu entwickelnden Baumroder „RB 60 Klein-Altendorf“ können in einem mechanisierten Arbeitsschritt Baum und Pfahl aller klassisch angebauten Kernobstbäume gerodet und zu einem biogenen Festbrennstoff weiterverarbeitet werden.

2.3 Trocknung und Lagerung

2.3.1 Allgemeine Grundlagen

Unter Trocknung wird im Allgemeinen der Entzug von Flüssigkeiten aus einem Stoff verstanden. Bei der Trocknung von Biomassen wird vor allem Wasser dem Trockengut entzogen. Somit wird der Wassergehalt der Biomasse verringert. Oft wird auch das Synonym des Feuchtegehaltes verwandt. Die beiden Begrifflichkeiten unterscheiden sich in ihrer Definition grundlegend. Der Wasseranteil in Biomassen kann nach WEINGARTMANN (1991) auf zwei Arten definiert werden.

1. Bezogen auf die Trockenmasse (TM)

$$u = \frac{G_W}{G_{TM}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

2. Bezogen auf die Frischmasse (FM)

$$w = \frac{G_W}{G_W + G_{TM}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

G_W = Masse des Wasseranteiles

G_{TM} = Masse der Trockensubstanz

$G_W + G_{TM}$ = Frischmasse; Gesamtmasse

Da in der Praxis üblicherweise die Definition bezogen auf die Frischmasse verwendet wird, soll auch in dieser Arbeit der Wassergehalt „w“ als Bezugsgröße angewandt werden. Der Wassergehalt „w“ entspricht dem Feuchtegehalt eines Materials, bezogen auf dessen Nassbasis (=F_N) (WEINGARTMANN, 1991).

Das Wasser wird dem Trockengut durch einen thermo-physikalischen Prozess entzogen. Dies wird meistens durch eine Aggregatzustandsänderung von der flüssigen in die gasförmige Phase realisiert. Weiterhin ist das Wasser in der organischen Masse durch Bindungskräfte gebunden. Mit sinkendem Wassergehalt nehmen die Bindungskräfte zu. Folgende Arten der Wasserbindung sind bei bestimmten Wassergehalten im Holz zu finden:

Tabelle 2-2: Art der Wasserbindung (verändert nach HARTMANN, 2009b)

Bildung	Wassergehalt	Merkmale
Kapillarsorption und Adhäsion	>25 %	feines ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfasern
Fasersättigungspunkt	19 % - 25 %	in den Zellwänden gebundenes Wasser, Holzschwind bei Wasserentzug
Kapillarsorption	13 % - 25%	kolloidal gebundenes Wasser, Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte
Elektrosorption	5,7 % - 13 %	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden
Chemosorption	0 % - 5,7 %	molekulare Anziehungskräfte

Für die Aggregatzustandsänderung und zur Überwindung der Bindungskräfte des Wassers in Biomassen zum Zweck der Trocknung muss Energie aufgebracht werden. Es wird nach Art der Energieherkunft in zwei Trocknungsverfahren unterschieden. Zum einen in die natürliche und zum anderen in die technische Trocknung (HARTMANN, 2009b).

Alle **technischen Trocknungen** sind durch eine erzwungene Durchströmung des Trockengutes gekennzeichnet. Es wird aktiv mit technischen Belüftungssystemen getrocknet, wozu elektrische Energie, bspw. für Gebläse, aufgewendet werden muss. Oft wird bei diesen Verfahren zusätzlich die Trocknungsluft erwärmt. Dies wird durch den Einsatz von Abwärme, fossilen oder regenerativen Energieträgern realisiert. Diese Verfahren werden auch als Warmlufttrocknungen bezeichnet. Dagegen sind Kaltlufttrocknungen anwendbar. Der technische Aufwand bei Planung, Bau und dem laufenden Betrieb solcher Trocknungsanlage ist verhältnismäßig hoch (WEINGARTMANN, 1991; HARTMANN, 2009b).

Als technische Trocknungsanlagen sind bekannt: Belüftungskühlungen, Belüftungstrocknungen, Warmlufttrocknungen und Heißlufttrocknungen. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Temperatur des zugeführten Luftstroms. Weiterhin kann nach Anlagen mit und ohne Gutförderung unterschieden werden. In Satzrocknern wird das Trockengut während der Trocknung nicht bewegt, sondern lediglich

durchlüftet. Verschiedene Größen solcher Anlagen sind möglich und können mit einer Lagerung des Materials kombiniert werden. Soll der Durchsatz erhöht werden, müssen Systeme mit Gutförderung eingesetzt werden. Diese Trocknungsmethoden stellen immer einen gesonderten Verfahrensschritt dar und sind durch höheren Aufwand mit Warmluftbereitstellung gekennzeichnet (HARTMANN, 2009b).

Das Prinzip der **natürlichen Trocknung** verzichtet auf komplexe technische Einrichtungen und den Einsatz von Energie aus Abwärme, fossilen oder regenerativen Energieträgern (BRUMMACK, 2008). Getrocknet wird durch natürliche Konvektionstrocknung, Bodentrocknung oder die Selbsterwärmung.

Bei der Konvektionstrocknung wird mit der natürlichen Luftströmung und dem Trocknungsvermögen der Luft dem Material das Wasser entzogen. Die Sonneneinstrahlung zusammen mit ausreichender Luftbewegung begünstigen den Prozess und die Feuchtigkeit wird vom Trocknungsgut aufgenommen und abgeführt. Voraussetzung für die Konvektionstrocknung ist die Durchströmbarkeit des Materials. In dicht gelagerte Biomassen mit hohen Schütthöhen funktioniert das Prinzip der freien Konvektion nur sehr eingeschränkt, weswegen vor allem grobstückige Materialien, wie z.B. Scheitholz, auf die Weise getrocknet werden. Bei der Bodentrocknung wird das Trockengut breitflächig auf dem Boden verteilt. Dort wird dieses durch die Trocknungsluft überströmt. Das Prinzip ist ebenfalls das der Konvektionstrocknung (WEINGARTMANN, 1991).

Sollen Schüttungen bspw. mit Hackschnitzel getrocknet werden, ist die biologische Selbsterwärmung das meistgebräuchlichste Verfahren der natürlichen Trocknung. In diesen Schüttungen entsteht durch den mikrobiellen Abbau von leicht flüchtigen Bestandteilen, wie z.B. Zuckern, Wärme. Nach dem Verbrauch dieser leicht abbaubaren Bestandteile werden auch Lignin, Cellulose und andere Inhaltstoffe des Trockenguts abgebaut. Verantwortlich für die Ab- und Umbauprozesse sind Pilze und Bakterien. Die von den Organismen erzeugte Wärme bewirkt thermodynamische Prozesse im Haufwerk. Diese Erwärmung der Luft im Material bewirkt ein Aufsteigen der Warmluft. Durch die gesteigerte Wasseraufnahmekapazität der erwärmten Luft wird dem Trockengut Feuchte entzogen und diese abtransportiert (BRUMMACK, 2008).

2.3.2 Verfahren zur Schnitt- und Rodungsholztrocknung

Der Wassergehalt von Hölzern ist in erster Linie abhängig von der Holzart und weniger von der Jahreszeit, in der es gewonnen wird. Weiterhin sind große Unterschiede zwischen inneren und äußeren Holzteilen aufzufinden (WEINGARTMANN, 1991). Schnitt- und Rodungsholz besitzt im frischen Zustand, d.h. kurz nach dem Ertragsschnitt bzw. nach einer Rodung, ähnlich wie andere Holzarten einen Wassergehalt zwischen 40 und 60%. Ziel der in dieser Arbeit untersuchten Verfahren zur Bereitstellung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen ist die Nutzung dieser Ressourcen als regenerativer Energieträger. Die einfachste und praxisgerechteste Variante den Energieträger Holz zu nutzen, ist eine thermische Nutzung. Dies kann mit Feuerungsanlagen umgesetzt werden.

Das Primärziel beim Betrieb von Biomassefeuerungsanlagen ist ein hoher Wirkungsgrad bei vollständigem Ausbrand des biogenen Festbrennstoffs unter Berücksichtigung der Schadstoffemissionen (NEFF, 2007). Wie in Tabelle 2-1 gezeigt, hat der Wassergehalt einen Einfluss auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften, wie z.B. auf den Brennwert oder die Verbrennungstemperatur. Mit steigendem Wassergehalt sinkt der Brennwert, die Brenngeschwindigkeit und Verbrennungstemperatur. Dies hat eine unvollständige Oxidation und erhöhte Emissionen zur Folge (WEINGARTMANN, 1991). Weiterhin sinkt mit höherem Wassergehalt die Lagerfähigkeit. Die Gefahr einer Selbstentzündung sowie die mikrobielle Aktivität steigen (HARTMANN UND HERING, 2004). Dies erklärt die Notwendigkeit einer Trocknung der biogenen Festbrennstoffe aus Obstplantagen.

Zur Umsetzung stehen wie zuvor beschrieben grundsätzlich die technische und natürliche Trocknung zur Verfügung. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist ein erhöhter zusätzlicher Energieinput zur Trocknung bei der Bereitstellung biogener Festbrennstoffe schwer abzubilden. Der apparative Aufwand von technischen Trocknungen ist in jedem Fall hoch. Als Fremdenergie für die Trocknung wäre bestenfalls anderweitig nicht nutzbare Abwärme akzeptabel. Aus diesen grundsätzlichen Überlegungen heraus kann auf eine weitere Betrachtung der technischen Trocknung verzichtet werden (BRUMMACK, 2008). Deswegen liegt der Schwerpunkt bei der Betrachtung von Trocknungsverfahren für holzartige Brennstoffe auf der natürlichen Trocknung.

Grundsätzlich sind die anwendbaren Trocknungsverfahren sehr stark von der Materialbeschaffenheit abhängig. Je nach angewandtem Verfahren zur Erschließung der Biomasse ist die Korngröße des Holzes sehr unterschiedlich. Grundsätzlich kann von folgenden Varianten des zu trocknenden Ausgangsmaterials ausgegangen werden: Ganzbäume; Baumteile, wie Stamm, Wurzel und Kronengerüst; grob zerkleinerte Baumteile (Schredderware in allen Größenklassen); geformte Holzballen (ähnlich wie Strohballen) und Holzhackschnitzel in allen Größenklassen. Die Übergänge zwischen den Größenklassen sind nicht scharf abgrenzbar.

Das einfachste Verfahren zur Trocknung stellt eine **Ganzbaumtrocknung** der Stämme mit Ästen und Wurzel dar. Ähnlich wie aus der Scheitholzbereitung bekannt, werden ganze Bäume oder größere Baumteile zu Stapeln am Feldrand aufgepoltert. Dort trocknet das Material mittels Konvektion. Dieses Verfahren stellt eine Kombination aus Zwischenlagerung bis zur Weiterverarbeitung und Trocknung dar. Sehr ähnlich werden auch Holzballen getrocknet und gelagert. Diese können ebenfalls am Feldrand oder auf Lagerplätzen gestapelt und durch die natürliche Konvektion getrocknet werden. Um eine Wiederbefeuchtung durch Niederschläge zu reduzieren, sind seit dem Jahr 2011 in Deutschland spezielle Abdeckungen auf Papierbasis verfügbar. Diese aus erneuerbaren Fasermaterialien hergestellten Lamine können nach ihrer Nutzung mit dem Holz zerkleinert und als Brennstoff verwendet werden. Durch die Abdeckung kann der Wassergehalt um bis zu 10% gegenüber einer unbedeckten Variante reduziert werden (WALKI, 2011).

Für die **Trocknung von grob zerkleinertem Material**, im Folgenden als Schredderware bezeichnet, und Hackschnitzeln sind viele Trocknungsverfahren bekannt. Ein simples Verfahren sind offene Schüttungen am Feldrand oder auf Lagerplätzen. Das Material trocknet durch den Prozess der Selbsterwärmung. Problem dieses Verfahrens ist die Wiederbefeuchtung durch Niederschläge. Dadurch kommt es zu starken mikrobiellen Aktivitäten und zu hohen Stoffumsatzraten. Weiterhin ist das Auftreten von Pilzen wie z.B. Moderfäule (*Ascomyceten, Deuteromyceten*), Brau- und Weißfäulepilze (*Basidiomyceten*), zu erwarten. Diese sind teilweise humanpathogen (IDLER ET AL., 2004). Eine Abwandlung dieses Verfahrens besteht in der Abdeckung der Miete mit semipermeablen oder dampfdurchlässigen Abdeckungen, wie z.B. Vlies. Durch diese Maßnahme wird die

Wiederbefeuchtung eingeschränkt, gleichzeitig kann der Wasserdampf entweichen. Ein technisch etwas aufwendigeres Verfahren ist die Trocknung der Schredderware oder Holzhackschnitzel in Mieten auf überdachten Lagerplätzen oder in Lagerhallen. Dabei ist zu beachten, dass der Wasserdampf entweichen und Luft zirkulieren kann. Generell sind in Schüttungen Bereiche vorhanden, in denen ein Luftaustausch durch feinkörniges Material eingeschränkt wird. Diese Bereiche verhindern ein Nachströmen der Luft von außen in das Haufwerk, weswegen es zu Feuchtenestern mit erhöhter mikrobieller Aktivität kommt. Ein einmaliges Umlagern der Miete kann dem entgegenwirken. Dennoch ist in jedem Fall mit Verlusten und Schimmelpilzbelastungen zu rechnen.

Ein neues Verfahren zur Trocknung und Lagerung von Hackschnitzel ist das **Dombelüftungsverfahren**. Dieses nutzt ebenfalls die biochemisch erzeugte Wärmeenergie von Hackschnitzelhaufwerken und die daraus resultierenden thermodynamischen Prozesse. Durch eine gezielte Steuerung der Luftströme durch das Einbringen von Zuluftkanälen und Abluftdomen, sowie einer isolierten Mietenabdeckung wird der Trocknungsprozess verbessert (BRUMMACK, 2008). Das Funktionsprinzip der Domtrocknung veranschaulicht folgende Abbildung.

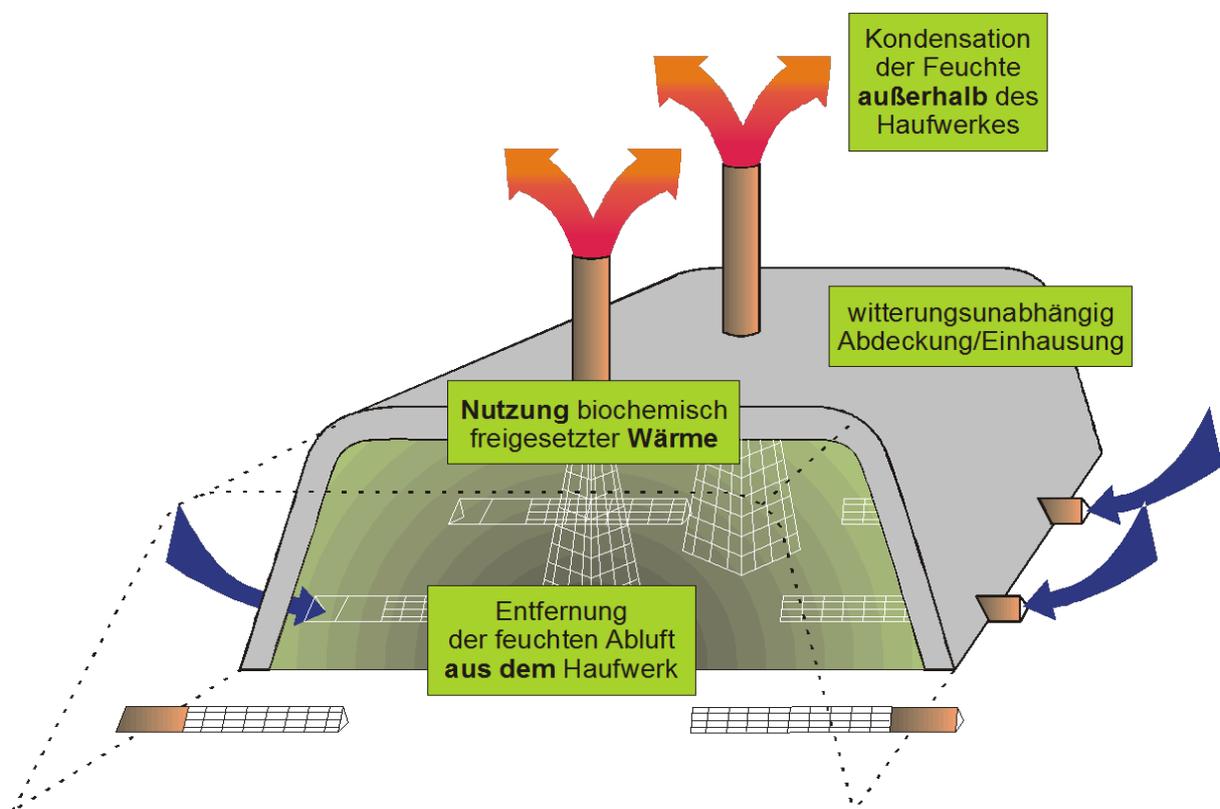


Abbildung 2-10: Prinzip der Dombelüftungstrocknung (MOLLEKOPF UND BRUMMACK, 2011)

Da der Erfolg aller beschriebenen Trocknungsverfahren stark von der Materialbeschaffenheit und Ausgangsgrößen wie Wassergehalt und Feinanteil abhängt, müssen die einzelnen Trocknungsverfahren auf ihre Eignung in der Bereitstellungskette für biogene Festbrennstoffe aus Obstplantagen geprüft werden. Aufgrund der verfahrenstechnischen Unsicherheiten und dem geringen Wissensstand im Bereich der Schnitt- und Rodungholzbereitstellung müssen die Trocknungsverfahren auf die Bereitstellungskette angepasst und integriert werden. Darüber hinaus soll der Einfluss der Trocknungsverfahren auf die Qualitätseigenschaften des Brennstoffs aus Obstgehölzen untersucht werden.

Zur Bearbeitung dieser Thematik kann folgende Arbeitshypothese aufgestellt werden:

Aufgrund verfahrenstechnischer Gegebenheiten der jeweiligen Bereitstellungskette sind die Trocknungsverfahren für die unterschiedlichen Obstholzpotenziale zu optimieren.

2.4 Brikettierung

2.4.1 Allgemeine Grundlagen

Die Brikettierung ist ein Veredelungsverfahren für Biomassen. Dabei wird unter hohem Druck zerkleinertes Rohmaterial komprimiert. Während dieses Vorgangs entsteht aus Reibung Wärme, die Bindungskräfte von Festkörperbrücken durch eine verklebende Wirkung von Inhaltsstoffen aktiviert. Diese Inhaltsstoffe sind vor allem Lignine (HARTMANN UND WITT, 2009). Diese aus phenolischen Makromolekülen zusammengesetzten Biopolymere sind in pflanzlichen Zellwänden eingebaut und bewirken die Verholzung der Zellen. Wird Lignin erwärmt, verflüssigt es sich und bindet die Biomassepartikel beim Abkühlen zusammen (NIEDZIOLKA UND SZYMANEK, 2010).

Darüber hinaus besitzen Eiweiße, Pektine, Wachse und Stärke eine verklebende Wirkung bei der Kompaktierung. Briketts werden weiterhin durch eine Vernetzung der Pflanzenfasern und durch die Anziehungskräfte zwischen Feststoffteilchen in Form von Wasserstoffbrückenbindungen zusammengehalten. Aus diesen Gründen ist die Zugabe von Bindemitteln bei der Brikettierung meist nicht notwendig (HARTMANN UND WITT, 2009).

Die Grundlagen der Brikettierung basieren auf denselben biochemischen und physikalischen Vorgängen wie die Pelletierung. Eine Abgrenzung zwischen Pellets und Briketts wird nach der europäischen Klassifizierungsnorm CEN/TS 14 961-3 (feste Biobrennstoffe – Holzbriketts für nichtindustrielle Verwendung) über den Durchmesser definiert. Danach sind Briketts gepresste Biobrennstoffe mit einem Durchmesser über 25 mm. Die möglichen Formen von Briketts sind ebenfalls in der CEN/TS 14 961-3 festgelegt. Demnach können Briketts würfelförmig, polyedrisch oder zylindrisch ausgeformt sein. Diese Formen werden mit dem Strangpress oder dem Presskammerverfahren hergestellt.

Eingesetzte Rohmaterialien sind hauptsächlich Holzreste aus der Holzverarbeitenden Industrie. Diese sind unter anderem Sägemehl, Späne und zerkleinerte Sägeresthölzer. Weiterhin können auch andere Biomassen, wie z.B. Miscanthus, Stroh, Schilf oder Torf, brikettiert werden. Darüber hinaus sind mit dem Brikettierverfahren auch Stoffe wie Papier, Kartonagen, Nicht-Eisen-Metalle (Aluminium, Kupfer, etc.), Kunststoffe und Textilien zu

kompaktieren. Haupteinsatzgebiet von Brikettierungen ist jedoch der Biomassektor (MÜTEK, 2012).

Die Brikettierung von Biomassen bietet dem Anwender Vorteile gegenüber der Vermarktung als Schüttgut. Der Brennstoff wird im Volumen und damit in seiner Energiedichte komprimiert. Dabei wird der Rohstoff etwa auf ein Viertel des Ausgangsvolumens verdichtet (SCHÖN UND HARTMANN, 2011). Dies hat logistische und lagertechnische Vorteile. Für die Lagerstabilität ist der geringe Wassergehalt und damit die geringe biologische Aktivität des Briketts von großem Vorteil. Durch die Verdichtung und die Bindungskräfte des Materials ist die Staubentwicklung bei Umschlagprozessen minimiert. Für den Einsatz des biogenen Festbrennstoffs in Biomassefeuerungsanlagen ist die höhere Brennstoffhomogenität durch die Normierung der Briketts von Vorteil. Die Möglichkeit der Verwendung von Zuschlagstoffen zur Veränderung der chemisch-stofflichen und verbrennungstechnischen Eigenschaften bei der Herstellung von Briketts ist ebenfalls positiv zu werten. Demgegenüber steht der Nachteil der höheren Produktionskosten und des Energieeinsatzes zur Herstellung der Presslinge (HARTMANN UND WITT, 2009).

Für die Pressverfahren ist ein homogenes Ausgangsmaterial der Biomasse wichtig. Der Wassergehalt sollte unter 15% liegen und das Material auf eine Partikelgröße unter 10 mm zerkleinert sein. So können Briketts mit einer hohen mechanischen Festigkeit erzeugt werden. Die mechanische Festigkeit ist nach DIN 15210-2 ein Maß für die Beständigkeit von gepressten Brennstoffen gegenüber Stoß und Abrieb infolge von Handhabungs- und Transportprozessen. Die mechanische Festigkeit wird meist durch den Wert der Abriebfestigkeit charakterisiert.



Abbildung 2-11:

Briketts beim Abbrand (Bildquelle:
HÖCKER POLYTECHNIK, 2012)

Beim Strangpressverfahren wird die Biomasse in einem zylindrischen Presskanal, in dem ein Kolben in horizontaler Ebene geführt wird, verdichtet. Der Kolben wird mechanisch durch einen mit einer Schwungmasse versehenen Kurbelantrieb oder hydraulisch angetrieben. Der erforderliche Gegendruck beim Pressvorgang wird durch das bereits verdichtete Material und die Reibungskräfte im zylindrischen Presskanal sichergestellt. Durch die Reibung entsteht sehr viel Wärme, so dass eine aktive Kühlung bei diesem Verfahren nötig ist. Durch das Pressverfahren entsteht ein Materialstrang aus Briketts, welcher im Rhythmus des Kolbenvortriebs aus dem Presskanal austritt. Die Form der Briketts wird durch die geometrische Ausformung des Presskanals bestimmt. Zum Strangpressverfahren gehören auch die Extruderpressen, in denen das Rohmaterial durch eine Schnecke verdichtet wird (HARTMANN UND WITT, 2009).

Beim Presskammerverfahren wird die Verdichtung diskontinuierlich ausgeführt. Die Biomasse wird zunächst mit einer Schnecke vorverdichtet und in eine Presskammer mit einer festen Form zugeführt. In dieser wird das Material meist hydraulisch gepresst. Nach Beendigung des Pressvorgangs löst die Presszange das Brikett und es wird aus der Kammer ausgeschoben. Beim Presskammerverfahren entsteht weniger Reibung, daher auch weniger Wärme, was einen geringeren Energiebedarf als beim Strangpressverfahren zur Folge hat. Nachteil ist jedoch, dass durch die niedrigeren Temperaturen die verklebenden Bindungskräfte schwächer aktiviert werden und die Abriebfestigkeit sinkt (HARTMANN UND WITT, 2009).

2.4.2 Einsatz von Briketts

Briketts aus verholzten Rohstoffen werden hauptsächlich in Kleinfeuerungsstätten, wie z.B. Kaminöfen eingesetzt. Dort werden sie anstatt Scheitholz verfeuert. Durch ihre längere Brenndauer, einfache Handhabung und leichte Beschaffung sowie Bevorratung sind Holzbriketts in Deutschland verbreitet. Der Verbrauch in Deutschland wurde für das Jahr 2009 auf ca. 350.000 Tonnen geschätzt (SCHÖN UND HARTMANN, 2011).

Wegen den unterschiedlichen holzartigen Rohstoffen, aber auch durch die verschiedenen Pressverfahren, sind Qualitätsschwankungen bei Briketts vorhanden. Grundsätzlich müssen sie den Anforderungen der Normen entsprechen. Die seit September 2011 in Kraft getretene europäische Norm „CEN/TS 14 961-3 - feste Biobrennstoffe – Holzbriketts für nicht

industrielle Verwendung“, ersetzt alle bisherigen nationalen Normen und ist daher bindend. Früher wurden Briketts nach der deutschen Norm „DIN 51 731 – Presslinge aus naturbelassenem Holz“ und der österreichische „ÖNORM M 7135 – Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts - Anforderungen und Prüfbestimmungen“ produziert. In der deutschen Norm wurde zwischen Briketts aus Holz oder Holz und Rinde nicht unterschieden. In der europäischen CEN/TS 14961-3 ist für reine Holzbriketts die Klasse A1 und für Holzbriketts mit Rinde die Klasse A2 vorgesehen. In der ÖNORM wird in Holz- und Rindenbriketts differenziert. An dieser Stelle sollen noch die alten nationalen Normen vergleichend mit aufgeführt werden, da in einigen Verordnungen, wie z.B. der Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) auf die alten Normen verwiesen wird.

Tabelle 2-3: Vergleich der Normen zur Brikettherstellung (DIN 51 731 (2010); ÖNORM M 7135 (2000); CEN/TS 14 961-3 (2010))

Kennwert	DIN 51 731	ÖNORM M 7135		CEN/TS 14 961-3		
		Holz	Rinde	Stammholz A1	Vollbäume A2	Wald- und Plantagenholz
Material (Klasse)	Holz/Rinde	Holz	Rinde	Stammholz A1	Vollbäume A2	Wald- und Plantagenholz
Wassergehalt [Massen-%]	< 12	< 10	< 18	< 15	< 15	< 15
Aschegehalt [Massen-%] wf	< 1,5	< 0,5	< 6,0	< 0,7	< 1,5	< 3,0
Heizwert [MJ*kg ⁻¹]	17,5 – 19,5 (waf)	> 18 (wf)	> 18 (wf)	> 15,5 (az)	> 15,3 (az)	> 14,9 (az)
Partikeldichte [g*cm ⁻³]	1,0 -1,4	> 1,0	> 1,1	> 1,0	> 1,0	> 0,9
Abriebfestig- keit [%]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

(wf: wasserfrei, waf: wasser- und aschefrei, az: im Anlieferungszustand, k.A.: keine Angaben)

Zu beachten sind bei den Normen die teilweise erheblich voneinander abweichenden Anforderungen. Weiterhin sind für die Abriebfestigkeit bisher keine Normzahlen

vorgegeben. In allen Normen sind über die angegebenen Daten hinaus Grenzwert für die Inhalte der Elementarteilchen Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni) und Zink (Zn) aufgeführt. Diese wurden zur Übersicht aus der Auflistung raus gelassen.

Zunehmendes Problem bei der Herstellung von Holzbriketts ist die Verfügbarkeit des Rohstoffes Holz. Mit erhöhter Brikettnachfrage durch die Verbraucher steigt der Rohstoffbedarf für den Herstellungsprozess. Gleichzeitig kann eine allgemeine und weltweite erhöhte Nachfrage nach Holz beobachtet werden (HOFFMANN, 2009). Erschwerend kommen die widersprüchlichen Forderungen der Regierungsprogramme „Waldstrategie 2020“, „Nationaler Aktionsplan für Erneuerbare Energien“ und der „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ dazu. Die Programme streben eine erhebliche Ausweitung der Holznutzung, insbesondere für energetische Zwecke bei gleichzeitiger und großflächiger Einschränkung bzw. Stilllegung der Waldnutzung für den Naturschutz an. So ist allein für Deutschland für das Jahr 2020 eine Holzversorgungslücke von 30 Mio. Festmetern zu erwarten (JÖNSSON, 2011).

Als Substitut für den Waldholzeinsatz in Briketts könnte Holz aus Obstplantagen dienen. Besonders das jährlich anfallende Schnittholz scheint für die Brikettierung geeignet zu sein. Der regelmäßige Anfall und die planbaren Mengen, sowie die sich entwickelnde Schnittholzbergetechnik sind Grundvoraussetzungen für einen solchen Veredelungsschritt. Probleme beim Einsatz des Schnittholzes könnten jedoch die Inhomogenität des Materials sowie brennstofftechnische Anforderungen der Norm darstellen. Die Qualitätsparameter der hergestellten Briketts müssen daher geprüft werden. Weiterhin ist es fraglich, ob der aufzuwendende Energieinput aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Versuche auf dem Themengebiet der Schnittholzverwertung zur Brikettherstellung sind bisher nicht bekannt. Deswegen soll in der vorliegenden Dissertation der grundsätzliche Einsatz von Obstsnittholz in der Brikettierung mit folgender Arbeitshypothese geprüft werden:

Durch ein innovatives Brikettierungsverfahren kann Obstsnittholz anwenderoptimiert kompaktiert werden.

3. Material und Methoden

3.1 Standortcharakterisierung

Die Versuche der vorliegenden Dissertation fanden im Außenlabor Agrar, Geodäsie, Ernährung (AGE) Campus Klein-Altendorf der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn statt. Der Campus liegt in Nordrhein-Westfalen auf der Hauptterrasse der niederrheinischen Bucht zwischen Eifelrand und Ville. Der Standort befindet sich in dem Obstbaugebiet der Städte Rheinbach und Meckenheim im Rhein-Sieg-Kreis.

Die Böden sind tiefgründige Lößböden mit 45-90 Bodenpunkten (ENGEL, 1989). Der Bodentyp ist eine basen- und nährstoffreiche Parabraunerde mit einem pH-Wert zwischen 6,4-7. Die Bodenart ist ein lehmiger Schluff. Die nutzbare Feldkapazität (nFk) liegt bei 141 mm (HEYN, 2010). Die Jahresniederschlagsmenge beträgt im langjährigen Mittel 605 mm bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,2°C. Milde Winter und gemäßigte Sommer sind typisch für das mittelhessische Klima, sodass die monatlichen Niederschläge relativ gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt sind. Eine Spätfrostgefahr ist im Frühjahr gegeben (ENGEL, 1989).

Für den Standort charakteristisch sind neben dem Obstbau auch der Marktfruchtanbau von Zuckerrüben und Getreide. Weiterhin sind in diesem Gebiet große Baumschulen angesiedelt.

3.2 Schnittholz

Um die quantitativen und qualitativen Brennstoffeigenschaften des jährlich anfallenden Schnittholzes aus dem Erwerbsobstbau zu bestimmen, kamen am Campus Klein-Altendorf im Rahmen der vorliegenden Dissertation zwei Schnittholzsammeltechniken zum Einsatz. Zunächst werden die beiden Verfahren zur Schnittholzbergung beschrieben.

Daran anschließend werden die Untersuchungen zum quantitativen Anfall des Schnittholzes und dessen Brennstoffeigenschaften vorgestellt. Zum Schluss werden die Arbeitsqualitätsfaktoren der Schnittholzsammeltechnik bestimmt und deren Analyse charakterisiert.

3.2.1 Verfahren zur Schnittholzsammlung

Die eingesetzte Schnittholzsammeltechnik war zum einen das Schnittholz-Mulchgerät TRP 120 RT H der Firma Kuhn (Abbildung 3-1) und zum anderen der Mäh-Lade Wagen MLC der Firma Perfect Van Wamel (Abbildung 3-4). Beide Maschinen nehmen das Schnittholz aus einem konzentrierten Schwad auf, zerkleinern das Material und sammeln es in einem Vorratsbehälter. Dennoch unterscheiden sich die beiden Geräte in ihrer Arbeitsweise erheblich, weswegen zunächst die Technik ausführlich beschrieben wird. Vor dem Verfahrensschritt der Schnittholzbergung muss dieses nach dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Verfahren mit Schwadern (Reihenputzern) vorkonzentriert werden.

Schnittholz-Mulchgerät der Firma Kuhn

Das Schnittholz-Mulchgerät TRP 120 RT H der Firma Kuhn ist zum Häckseln und Bergen von Schnittholz aus dem Wein- und Obstbau konzipiert. Dieser besitzt eine Aufsammeleinrichtung, ein Zerkleinerungsorgan und eine Bunkervorrichtung. Die Arbeitsbreite des Gerätes ist mit 1,20 m bei



Abbildung 3-1:

Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H
(Bildquelle: PUDE, 2010)

einer Gesamtbreite von 1,65 m vom Hersteller angegeben. Es wird an die Dreipunkthydraulik eines Schmalspurschleppers angebaut. Der Leistungsbedarf liegt bei mindestens 59 kW (80 PS) und bei maximal 66 kW (90 PS). Das Gewicht des Schnittholzsammlers beträgt ca. eine Tonne (KUHN, 2009).

Die Aufsammleinrichtung ist in Form einer Pick-up (1) (Abbildung 3-2) ausgeführt, die mit einem drehzahlverstellbaren Hydraulikmotor betrieben wird. Die Aufsammleinrichtung wird wiederum über ein Keilriemengetriebe zwischen dem Ölmotor und der Pick-up angetrieben. Die Pick-up Einrichtung ist eine Welle mit aufgesetzten Zinken (1), die das Schnittholz aus dem Schwad aufnimmt und zum Zerkleinerungsorgan zuführt. Vor der Pick-up sind vier weitere starre Aufnahmezinken (2) verbaut, die das Bergen des Schnittholz erleichtern.

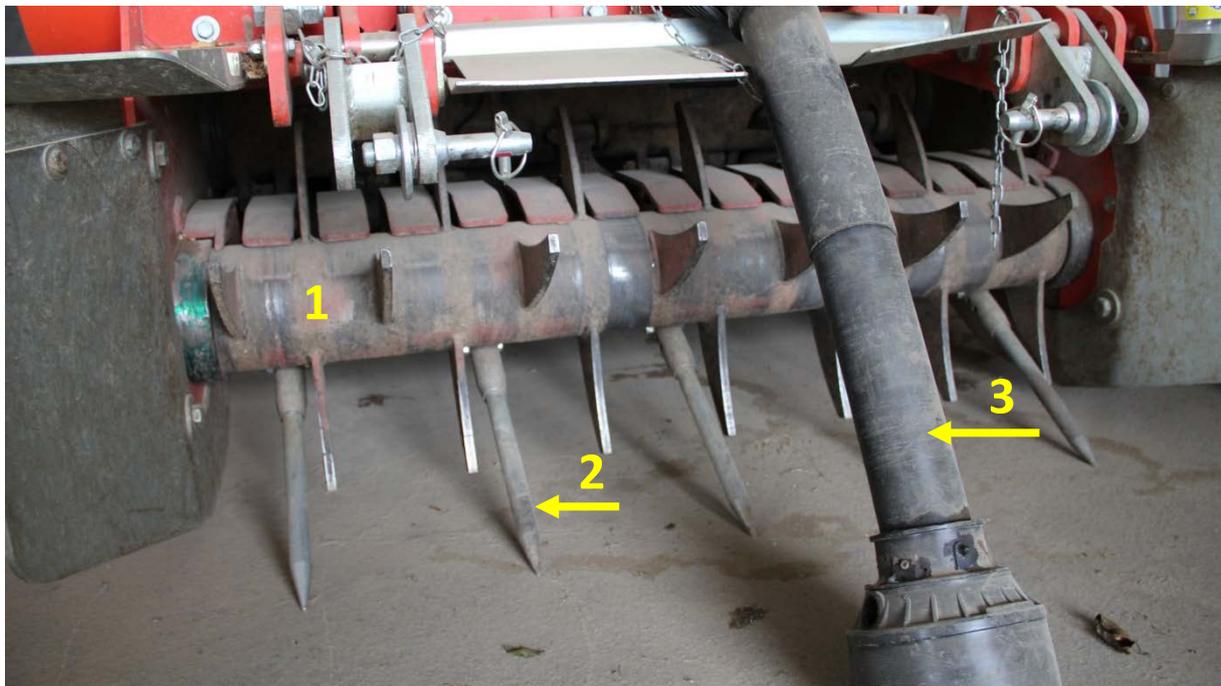


Abbildung 3-2: Pick-up vom Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H;
1: Pick-up; 2: Aufnahmezinken; 3: Gelenkwelle

Das Zerkleinerungsorgan ist eine Rotorwelle mit 16 Schlägelmessern, wie sie bei Mulchgeräten eingesetzt werden. Weiterhin sind 3 Gegenschniden montiert. Es handelt sich daher um eine schlagende Zerkleinerung. Der Rotor wird von der Zapfwelle des Schleppers angetrieben. Die Drehbewegung des Nebenantriebs wird über eine Gelenkwelle (3) auf ein Verteilergetriebe (Winkelgetriebe) übertragen. Aus dem Verteilergetriebe verläuft

eine Welle auf das an der Seite befindliche Keilriemengetriebe, das mit dem Zerkleinerungsorgan verbunden ist. Die Rotordrehzahl beträgt 2.600 Umdrehungen pro Minute ($U \cdot \text{min}^{-1}$) bei einer Zapfwellendrehzahl von $540 U \cdot \text{min}^{-1}$. Über die Zapfwellendrehzahl, die in Abhängigkeit zur Motordrehzahl steht, kann die Rotordrehzahl und damit die Zerkleinerungsintensität eingestellt werden. Durch die Drehbewegung des Rotors wird ein Luftstrom erzeugt, der die Biomasse über einen Kanal zur Auffangvorrichtung befördert.

Die Bunkereinheit, die das Schnittholz nach dem Zerkleinern aufnimmt, ist ein in vertikaler Richtung verstellbarer rechteckiger Stahlrahmen (4) (Abbildung 3-3) mit vier Haken (5) an den Ecken. In diese wird ein Nylonsack (BigBag) (6) eingehängt. Ist der Nylonsack gefüllt, wird dieser mit der Hydraulik auf den Boden abgesenkt, aus den Haken ausgehängt und kann dann abtransportiert werden.

Da das frische Schnittholz schlecht in den BigBags trocknen kann und eine schnelle Verpilzung des Materials einsetzen würde, wurde die Bunkereinheit auf ein Großkistensystem am Campus Klein-Altendorf umgebaut. Die Großkisten bestehen aus einer Palette und einem Holzrahmen. Diese Kisten werden im Obstbau zur Lagerung von Obst eingesetzt.



Abbildung 3-3: Bunkervorrichtung vom Schnittholzsammler Kuhn TRP 120 RT H (Bildquelle: TERRA, 2012); 4: Stahlrahmen; 5: Haken; 6: BigBag

Mäh-Lade Wagen MLC der Firma Perfect Van Wamel

Der Mäh-Lade Wagen der niederländischen Firma Perfect Van Wamel ist eine Kombination aus einem Schlegelmulcher und einem gezogenen Sammelbunker (Abbildung 3-4). Das Gerät ist zum Aufsammeln und Zerkleinern von Gras, Blätter und Ästen bis zu einem Durchmesser von 8 cm konstruiert. Somit sind die Anwendungsmöglichkeiten der Maschine sehr vielseitig. Der Einsatzbereich ist darüber hinaus erweiterbar, da der Schlegelmulcher eine selbstständige Einheit darstellt (VAN WAMEL, 2012). Somit kann dieser separat, bspw. für die Grünpflege, eingesetzt werden. Der Sammelbunker kann hydraulisch auf landwirtschaftliche Anhänger entleert werden. Der Mäh-Lade Wagen ist in zwei Bauformen verfügbar: Die erste besitzt eine Arbeitsbreite von 150 cm und einer Bunkerkapazität von 3 m³ bei einer Gesamtbreite von 170 cm. Die zweite Bauform besitzt eine Arbeitsbreite von 180 cm, eine Bunkerkapazität von 3,5 m³ und eine Gesamtbreite von 200 cm. Die folgende Abbildung zeigt den Mäh-Lade Wagen mit den wichtigsten Bauteilen.



Abbildung 3-4:
Perfect Mäh-Lade Wagen;
7: hydraulische
Schwenkdeichsel

Der Perfect Mäh-Lade Wagen besitzt einen Hauptrahmen mit einer hydraulisch verstellbaren Schwenkdeichsel (7). Durch die Verstellbarkeit der Zugdeichsel kann das Gerät spurversetzt zum Zugfahrzeug gezogen werden. Zum Antrieb eignen sich Schmalspur- oder größere Rasentraktoren mit einer Leistung ab 40 kW (55 PS) (VAN WAMEL, 2012). Für die größere Bauform sollten mindestens 52 kW (70 PS) zur Verfügung stehen. Weiterhin muss der Schlepper über einen Nebenantrieb, in Form einer Heckzapfwelle, und über zwei doppelwirkende Hydrauliksteuerkreisläufe verfügen. Die Drehzahl an der Gelenkwelle sollte

auf $540 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ eingestellt werden. Im Arbeitsbetrieb muss mit der vollen Motordrehzahl gefahren werden (VAN WAMEL, 2012).

Der Hauptrahmen besitzt eine Einzelradaufhängung in Form von zwei Pendelachsen mit je zwei Rädern. Der Sammelbunker ist mittig über den Achsen auf dem Hauptrahmen angeordnet. Dieser kann über das Heck des Fahrzeugs nach hinten hydraulisch entleert werden. Die Überladehöhe beträgt 195 cm (VAN WAMEL, 2012). Der Bunker ist mit einem Lochblech (8) versehen, um beim Befüllen des Bunkers den Luftstrom, erzeugt durch den Schlegelrotor des Mulchers, entweichen zu lassen. Dabei wird ein maximaler Verbleib des Erntematerials im Bunker sichergestellt. Zum Entleeren des Bunkers ist die Lochblechabdeckung an zwei Scharnieren, in Fahrtrichtung vorn, montiert, sodass das Material frei entweichen kann.



Abbildung 3-5: Perfect Mäh-Lade Wagen beim Entladevorgang;
8: Lochblech

Der Mulcher ist am Hauptrahmen pendelnd aufgehängt. Dadurch kann dieser mit wenig Aufwand von der Baugruppe getrennt und als einzelne Maschine eingesetzt werden. Die Schnitthöhe des Mulchers kann durch zwei Hydraulikzylinder in der Mäh-Lade Wagen-Kombination verstellt werden. Mit diesen wird der Mulcher beim Transport ausgehoben.

Der Rotor ((9) in Abbildung 3-6) des Mulchers ist mit Schlegeln (10) bestückt. Es können leichte (0,8 kg) und schwere (2,2 kg) Schlegel montiert werden. Die leichten eignen sich besonders für Grünschnitt, die schwereren Universalschlägel für holzartiges und festeres Material (VAN WAMEL, 2012). Der Schlegelrotor wird über folgenden Kraftstrangweg angetrieben: Der Nebenantrieb des Schleppers erzeugt die Kraft in Form einer Drehbewegung. Über die Gelenkwelle wird die Kraft auf ein Verteilergetriebe (Winkelgetriebe) übertragen. Aus dem Verteilergetriebe verläuft eine Welle auf das an der Seite befindliche Keilriemengetriebe, welches mit einer Nachspannautomatik ausgerüstet ist.

Dieser für Mulcher typischer Kraftstrang verhindert bei Überlastung, bspw. durch zu harte Materialien, eine Zerstörung des Nebenantriebes und des Verteilergetriebes. Bei einer Überlastung rutscht der Keilriemen durch bzw. reißt, bevor eine Zerstörung der Getriebe auftritt.



Abbildung 3-6: Schlegelrotor mit 2,2 kg Universalschlägeln des Perfect Mäh-Lade Wagen;
9: Rotorwelle; 10: Schlegel

Die Schlägel auf dem Rotor erzeugen, bedingt durch ihre

Löffelform und die hohe Drehungszahl an der Welle von ca. $2.100 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$, einen starken Luftstrom. Durch diesen wird das Material vom Boden angesogen. Anschließend nehmen die Schlägel das Material mit, wobei es zerkleinert wird. Sollen mit dem Gerät Astmaterialien aus Obst- oder Weinbau gesammelt werden, können Holzaufnahmezinken vor der Rückverfestigungswalze des Mulchers montiert werden. Somit können auch kleinere und festliegende Äste aufgenommen werden. Der Luftstrom sorgt weiterhin für die Beförderung des zerkleinerten Gutstromes in den Sammelbunker. Zwischen dem Mulchaggregat und dem Sammelbunker befindet sich ein Metallkanal in Breite des Rotors. Durch diesen wird das zerkleinerte Material mit dem Luftstrom befördert. Das Material tritt genau oberhalb des Rotors aus dem Mulcher in den Gutkanal ein. Durch den Luftstrom werden ebenfalls Blätter, loses Gras und Moos, sowie kleine Steine mit aufgenommen.

Durch die kompakte Bauform und die hydraulische Seitenverstellung der Zugdeichsel ist das Gerät sehr wendig und kann in Obst-, Wein- und Grünanlagen eingesetzt werden.

3.2.2 Schnittholz mengen

In diesem Versuch wurden die anfallenden Schnittholz mengen aus dem jährlichen Winterschnitt in verschiedenen Apfelkulturen über die Jahre 2010 bis 2012 dokumentiert. Das Schnittholz wurde mit dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Schnittholzsammelverfahren der Firma Kuhn aufgesammelt und das Frischgewicht erfasst.

In Vorbereitung der Versuche wurden nach obstbaulicher Fachpraxis die Apfelplantagen im Zuge des Ertragsschnitts im Winter bzw. Frühjahr geschnitten. Das flächig anfallende Schnittholz wurde anschließend mit dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Verfahren mittels „Reihenputzer“ in eine definierte Mittenablage in einen Schwad gebracht. Aus diesem konnte mit dem Kuhn Schnittholzsammler die Holzmasse aufgenommen, zerkleinert und gebunkert werden. Die Sammlung fand im Zeitraum zwischen Mitte und Ende März in den jeweiligen Versuchsjahren statt.

Es standen in den Jahren 2010 bis 2012 verschiedene Apfelplantagen am Campus Klein-Altendorf zur Verfügung. Diese sind durch verschiedene Apfelsorten und Standzeiten gekennzeichnet. Alle Apfelsorten waren auf der Unterlage M9 veredelt. Die Tabelle 3-1 gibt Auskunft über die Versuchsjahre, Apfelsorten, deren Pflanzjahr und Alter zum Zeitpunkt der Schnittholzsammlung.

Tabelle 3-1: Versuchsjahre, Apfelsorten, deren Pflanzjahr und Alter zum Zeitpunkt des Schnittholzammelversuchs

Versuchsjahr	Sorte	Pflanzjahr	Alter der Plantage im Versuchsjahr
2010	Jonagold	1998	12
2011	Jonagold	1998	13
2012	Jonagored	1998	14
2012	Sortenmix Elstar, Gala, Braeburn	2007	5

Der Reihen- und Pflanzabstand aller Versuchspartellen lag bei einheitlichen 3,5 m x 1,0 m. Jede Variante wurde in sechs Wiederholungen mit je einer Pflanzreihe pro Wiederholung beprobt, wobei die Reihenlänge zwischen 70 m im Sortenmix und 200 m bei den anderen Sorten schwankte. Die anfallende Schnittholzmasse wurde in einen BigBag gefüllt und mit einer Zugwaage (HFB 600K200 der Firma Kern) auf 200 g genau gewogen. Anschließend wurde aus den vorhandenen Daten der Frischmasseertrag pro Hektar errechnet. Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen aus den Frischmassen die Trockenmasseerträge errechnet werden. Dazu ist es notwendig den Wassergehalt zu bestimmen.

Der **Wassergehalt** wurde in Anlehnung an die DIN EN 14 774-2 für feste Biobrennstoffe-Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – vereinfachtes Verfahren durchgeführt. Darin ist der Wassergehalt als der prozentuale Massenverlust einer Biobrennstoff-Probe definiert, der nach Erreichen der Massenkonstanz nach der Trocknung bei einer Temperatur von 105°C erhalten bleibt.

Zur Bestimmung des Wassergehaltes werden aus den einzelnen Varianten jeweils in drei Wiederholungen repräsentative Mischproben von je mindestens 300 g gezogen. Die einzelnen Proben werden auf 0,1 g gewogen, was der Frischmasse (*FM*) entspricht. Anschließend werden sie auf ein Trockenblech geben und auf diesem gleichmäßig verteilt. Dabei ist darauf zu achten, dass etwa 1 g der Probe auf 1 cm² aufgebracht wird. Die Proben auf den Trocknungsblechen werden in einen Trockenschrank gestellt, der auf 105 (+/- 2)°C eingestellt wird. In diesem werden die Proben bis zu ihrer Massenkonstanz mindestens 24 h getrocknet. Nach dem Erreichen der Massenkonstanz wird die Probe ohne Trockenblech rückgewogen und somit die Trockenmasse (*TM*) bestimmt. Der Wassergehalt (*w*) wird mit folgender Gleichung berechnet und als Massenanteil in Prozent der Frischmasse angegeben.

Formel 3-1: Berechnung des Wassergehaltes (*w*) nach DIN EN 14 774-2

$$w = \frac{FM - TM}{FM} * 100 [\%]$$

Dabei ist: *w* = Wassergehalt [%],

FM = Frischmasse [g],

TM = Trockenmasse [g].

Der Trockenmassegehalt ist das Ergebnis aus der Subtraktion von 100 und dem Wassergehalt. Aus dem Trockenmassegehalt und der ermittelten Frischmasse wurde der Trockenmasseertrag pro Hektar errechnet.

3.2.3 Brennstoffeigenschaften

Um Aussagen über die Brennstoffeignung und –qualität des in Kapitel 3.2.2 gesammelten Schnittholzes treffen zu können, wurde das Schnittholz auf Aschegehalt, Brennwert und die elementare Zusammensetzung untersucht.

Für die Brennstoffanalysen mussten die Proben aufbereitet werden. Dies wurde nach DIN CEN/TS 14 780 für feste Biobrennstoffe - **Verfahren zur Probenherstellung** durchgeführt. Das Probenmaterial wird dazu mittels einer Schneidmühle auf eine Partikelgröße von ≤ 1 mm zerkleinert. Dazu wurde eine Schneidmühle der Firma Retsch verwendet, die zur Herstellung von Laborproben geeignet ist. Vor dem Zerkleinern wird ein Bodensieb zwischen Schneidorgan und Sammelbehälter eingefügt, welches einen Sieblochdurchmesser von 1 mm besitzt. Die Probenaufbereitung findet für jede Variante und Wiederholung separat statt. Zwischen den einzelnen Varianten und Wiederholungen wird die Schneidmühle gereinigt. Danach werden die zerkleinerten Proben im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Anschließend können die Asche-, Brennwert-, und Elementaranalysen durchgeführt werden.

Der **Aschegehalt** wurde in Anlehnung an die DIN EN 14 775 für feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes ermittelt. Darin ist die Asche als der anorganische Rückstand einer Biobrennstoffprobe definiert, der nach einer Verbrennung unter festgelegten Bedingungen verbleibt. Der Aschegehalt wird auf wasserfreier Bezugsbasis als prozentualer Massenanteil des anorganischen Rückstandes berechnet.

Zur Analyse werden Porzellantiegel auf 0,0001 g genau ausgewogen und das Leergewicht notiert. Anschließend wird mindestens 1 g getrocknetes Probenmaterial in den Tiegel gefüllt, ebenfalls auf 0,0001 g genau gewogen und das Gewicht dokumentiert. Die Tiegel werden anschließend in einen kalten Muffelofen (Nabertherm LT 24/11) gestellt und unter kontrollierten Bedingungen verbrannt. Dazu wird die Ofentemperatur über eine Dauer von 30 Minuten gleichmäßig auf 250°C erhitzt und anschließend diese Temperatur über 60 Minuten aufrechterhalten. Dabei entweichen die flüchtigen Stoffe vor der Verbrennung aus den Proben. Danach wird die Ofentemperatur innerhalb von 30 Minuten gleichmäßig auf 550°C erhöht. Diese Temperatur ist weitere 120 Minuten beizubehalten.

Nach dem Verbrennungsvorgang werden die Tiegel mit dem verbliebenen anorganischen Rückstand aus dem Muffelofen genommen und auf einer hitzebeständigen Metallplatte 5-10 Minuten abgekühlt. Daraufhin werden die Tiegel mit der Asche in einen Exsikkator überführt und der Raumtemperatur angeglichen. Nach dem Erreichen der Raumtemperatur können Tiegel und Inhalt mit einer Messgenauigkeit von $d = 0,0001$ g zurückgewogen und die Masse

notiert werden. Der Aschegehalt wird als Massenanteil in Prozent auf wasserfreier Bezugsbasis mit folgender Formel berechnet:

Formel 3-2: Berechnung des Aschegehaltes (A_d) nach DIN EN 14 775

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 [\%]$$

Dabei ist:

A_d = Aschegehalt auf Trockenbasis [%],

m_1 = die Masse des leeren Tiegels [g],

m_2 = die Masse von Tiegel inklusiv der zu prüfenden Probe [g],

m_3 = die Masse von Tiegel und Asche [g].

Für jede Variante wurden mindestens drei Wiederholungen angelegt und der Mittelwert aus diesen als Aschgehalt angegeben, sowie statistisch ausgewertet.

Der **Brennwert** wurde in Anlehnung an die DIN EN 14 918 für feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes ermittelt. Zunächst muss dazu der Unterschied zwischen Heizwert und Brennwert erläutert werden:

Unter dem Heizwert wird die Wärmemenge verstanden, die bei der kompletten Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird (HARTMANN, 2009c). Dagegen ist der Brennwert (H_o) als die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmeenergie definiert, die verfügbar wird, wenn die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes zusätzlich nutzbar gemacht wird (HARTMANN, 2009c).

Bei jeder Verbrennung wird Wasserdampf gebildet, welcher aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff des Brennstoffs und dem Sauerstoff aus der Verbrennungsluft entsteht. Weiterhin wird aus dem gebundenen und freien Wasser aus dem Brennstoff Wasserdampf freigesetzt. Um dieses Wasser zu verdampfen wird Energie benötigt. Wird bei der Verbrennung der Wasserdampf im Rauchgas zurückgekühlt, kondensiert dieser und die Verdampfungsenergie wird wieder frei. Diese Technik nutzen Brennwertthermen oder auch Bombenkalorimeter. Der Heizwert beschreibt dagegen, dass die Verdampfungsenergie im

Wasserdampf mit dem Rauchgas aus dem System entweicht und nicht genutzt werden kann. Aus den Ausführungen ist ersichtlich, dass sich somit der Brennwert vom Heizwert genau um die Verdampfungsenergie unterscheidet.

Der Brennwert wurde in der vorliegenden Arbeit mit dem Kalorimetersystem C200 der Firma IKA ermittelt. Dazu wurden die Proben, wie bereits erklärt, auf ≤ 1 mm zerkleinert und auf ihre Massenkonzentration getrocknet. Vor den jeweiligen Messungen wurden 0,4-0,5 g der Probensubstanz zu einer Tablette gepresst (siehe Abbildung 3-7). Jede Probentablette wurde auf 0,0001 g genau gewogen und in ein Verbrennungstütchen gegeben. Dieses Verbrennungstütchen hat einen geeichten Brennwert und wird ebenfalls auf $d = 0,0001$ g gewogen.



Abbildung 3-7:
Gepresste Probensubstanz zur
Brennwertbestimmung in Ver-
brennungstütchen

Anschließend wird das Aufschlussgefäß des Kalorimeters wie folgt vorbereitet: Ein Baumwollfaden wird als Schlaufe am Zünddraht des Aufschlussgefäßes befestigt. Das Verbrennungstütchen wird eng um die Tablette gefaltet und zusammen mit dem Ende des Baumwollfadens in einen Glastiegel gedrückt. Der Tiegel wird mit Probe in einen Halter im Aufschlussgefäß gehängt. Dann wird das Gefäß zugeschraubt und mit reinem Sauerstoff (99,95% O₂) unter einem Druck von 3 MPa gefüllt. Anschließend wird das Aufschlussgefäß in das Kalorimeter gegeben. Weiterhin muss Wasser mit exakt 20°C in das C200 eingefüllt werden und die Einwaage, der Energiegehalt des Baumwollfadens und des Verbrennungstütchens eingegeben werden.

Alle Messungen erfolgten nach der Isoperibol-Methode. Dabei wird die Brennstoffprobe in einem Aufschlussgefäß unter konstanten Bedingungen verbrannt. Das Gefäß ist von einem Wassermantel umgeben. Im Gerät wird die Temperaturänderung gemessen, die der bei der Verbrennung freigesetzten Wärmeenergie entspricht. Der spezifische Brennwert (H_o) wird vom System mit folgender Formel berechnet (IKA, 2010):

Formel 3-3: Berechnung des spezifischen Brennwertes aus der Temperaturerhöhung in einem Kalorimetersystem (IKA, 2010)

$$H_o = \frac{(C * D_T - Q_{Fremd1} - Q_{Fremd2})}{m} [J * g^{-1}]$$

Dabei ist:

H_o = spezifischer Brennwert der Brennstoffprobe [$J * g^{-1}$],

m = Gewicht der Brennstoffprobe [g],

C = Wärmekapazität (C-Wert) des Kalorimetersystems [$J * K^{-1}$],

D_T = Temperaturerhöhung des Wassers im Innenkessel [K],

Q_{Fremd1} = Korrekturwert der Wärmeenergie aus dem Baumwollfaden [$J * g^{-1}$],

Q_{Fremd2} = Korrekturwert der Wärmeenergie aus dem Verbrennungstütchen [$J * g^{-1}$].

Die Brennwertanalysen wurden in mindestens drei Wiederholungen pro Variante durchgeführt. Das Kalorimetersystem gibt den Brennwert in $J * g^{-1}$ aus. Der Brennwert wurde als Mittelwert der Wiederholungen angegeben.

Die **Analysen zur elementaren Zusammensetzung des Schnittholzes** wurden vom Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Forschungsbereich Pflanzenernährung der Universität Bonn durchgeführt. Das Schnittholz wurde aus der Variante „Sortenmix 2012“ auf die elementare Zusammensetzung hin untersucht.

Dazu wurde das auf 1 mm zerkleinerte Material zunächst mit einem Druckaufschluss in die Bestandteile zerlegt. Dabei werden 0,5 g des Probenmaterials in einem Teflontiegel eingewogen und mit 4 ml Salpetersäure (HNO_3) (65%ig) versetzt. Anschließend wurden die Proben in einen Aufschlussautoklaven der Firma Loftfield bei 180°C für 6 Stunden aufgeschlossen. Die Proben werden nach dem Aufschluss in einen 25 ml Messkolben überführt, mit destilliertem Wasser aufgefüllt und mit einem aschefreien Rundfilter (MN640) in eine PE-Flasche filtriert. Das Filtrat wird dann je nach Element analysiert.

Die Proben wurden auf die Elemente Kupfer (Cu), Zink (Zn), Magnesium (Mg) und Eisen (Fe) in einem Atomabsorptionsspektrometer (1100B) der Firma Perkin Elmer untersucht. Die Messungen von Kalium (K) und Calcium (Ca) erfolgten am Flammenphotometer (Elex 6361,

Firma Eppendorf). Die Chloranalyse (Cl) fand in einem Ionenchromatographen (IC 20, Firma Dionex) statt.

Die Analyse der Hauptelemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) erfolgte aus der auf 1 mm zerkleinerten und auf die Massenkonzentration getrockneten Ausgangssubstanz. Diese Elemente können anhand des Prinzips der „dynamischen Spontanverbrennung“ nachgewiesen und quantifiziert werden. Dies erfolgte an dem Elementaranalysator EuroEA 3000 Serie der Firma EuroVector.

3.2.4 Arbeitsqualitätsfaktoren der Schnittholzammeltechnik

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert ist bisher nur sehr wenig über die Schnittholzammeltechnik bekannt. Die entwickelte Technik gibt es bisher nur als Prototypen oder in Kleinserien. Für die Versuche standen die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Maschinen, der Kuhn-Schnittholzsammler und der Perfect Mäh-Lade Wagen, zur Verfügung.

Das wichtigste bei den Verfahren der Schnittholzammlung ist, dass das gesammelte Schnittholz in Verbrennungsanlagen eingesetzt werden kann. Dazu muss das Holz in einer Korngröße zur Verfügung gestellt werden, welche durch die automatischen Brennstoffzuführungen vorgegeben wird. Daraus kann die erste Zielgröße, die Längenverteilung des gesammelten Schnittholzes, abgeleitet werden. Um diese **Längenverteilung** zu erfassen, wurden im Jahr 2012 auf dem Versuchsfeld mit dem Sortenmix aus Elstar, Gala und Braeburn mit beiden Schnittholzsammlern jeweils 3 Reihen geerntet. Aus den drei Reihen wurde eine Mischprobe pro Sammeltechnik mit einem Volumen von ca. 10 Litern gezogen und jedes Holzstück auf einen halben Zentimeter genau ausgemessen. Dabei wurden die Holzstücke in folgende vier Größenklassen unterteilt: <5 cm, 5-10 cm; 10-20 cm und >20 cm. Weiterhin wurden in den Varianten im Jahr 2012 aus dem Holz alle **Nicht-Holzbestandteile** (vor allem Gras, Moos und Blätter) aussortiert und einer eigenen Klasse zugeordnet. Darüber hinaus wurde in den beiden Varianten die gesamte Volumenprobe vor der Auswertung auf ein Sieb gegeben und der Feinanteil unter 1 mm ausgesiebt und ebenfalls als eigene Klasse gewertet. Alle Klassen wurden anschließend bis zur Massenkonzentration bei 105°C getrocknet und danach auf 1 g genau gewogen. Mit den Nicht-Holzbestandteilen wird ein weiterer wichtiger Qualitätsfaktor der Arbeitserledigung erfasst. Nicht-Holzbestandteile führen zu Problemen bei der Brennstofflagerung und

Verbrennung. Besonders Gras, Moos und Blätter verrotten sehr schnell, besitzen einen hohen Wassergehalt und weisen hohe Chlorgehalte auf. Deswegen ist das Erfassen dieses Bestandteils von Bedeutung. Alle Größenklassen wurden als Anteil an der gesamten Schnittholzmasse für beide Geräte dargestellt.

Einfluss auf die Längenverteilung der gesammelten Biomasse kann, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, über die **Drehzahlvariation des Zapfwellenantriebs** und damit auf der Drehzahl des Schlegelrotors genommen werden. Da bei dem Perfect Mäh-Lade Wagen jedoch immer mit höchstmöglicher Umdrehungszahl gefahren werden muss, um den Gutstrom aufrecht zu erhalten, scheidet diese Variationsmöglichkeit bei diesem Gerät aus. Bei dem Kuhn-Gerät ist dies jedoch möglich und wurde daher 2009 am Campus Klein-Altendorf untersucht. Diese Daten wurden aus dem unveröffentlichten Versuchsbericht für die vorliegende Arbeit neu aufbereitet und mit in die Betrachtung einbezogen.

Als weitere Zielgröße der Qualität der Arbeitserledigung können die **Verluste bei der Aufnahme des Schnittholzes** aus dem Schwad analysiert werden. Dazu wurden alle in den Reihen liegendegebliebenen Äste nach der Schnittholzsammlung im Jahr 2012 aufgenommen und mengenmäßig bestimmt. Das Gewicht der Biomasseverluste beider Maschinen wurde jeweils in den drei Wiederholungen erfasst ($d=200$ g) und als prozentualer Massenanteil der gesammelten Frischmasse berechnet. Aus den Wiederholungen wurden für beide Maschinen je die Mittelwerte gebildet.

3.3 Rodungsholz

In diesem Abschnitt werden die eingesetzte Technik und verwendeten Methoden zu den Untersuchungen zum Themenfeld Rodungsholz dargestellt.

Zunächst wird ein Versuch beschrieben, der die pflanzenbaulichen Auswirkungen des vollmechanisierten Rodeverfahrens analysiert. Daran anschließend wird das in der vorliegenden Dissertation entwickelte Rodeverfahren „RB 60 Klein-Altendorf“ vorgestellt und die Quantifizierung der entstehenden Rodungsholzmengen erläutert. Weiterhin wird die Weiterverarbeitungskette der Obsth Holzbiomasse zu einem biogenen Festbrennstoff beschrieben und Kenngrößen definiert. Auch in diesem Kapitel werden die entstehenden Biomassen hinsichtlich ihrer Brennstoffeigenschaften untersucht. Im letzten Punkt dieses Kapitels wird die Methode zur Bewertung des neu entwickelten Verfahrens im Hinblick auf die Qualität der Arbeitserledigung vorgestellt.

3.3.1 Einfluss von Holzrückständen auf Folgekulturen

Um den Einfluss des Holzeintrags in den Ackerboden nach dem Verfahren der forstlichen Rekultivierung von Obstplantagen auf das Wachstum von Kulturpflanzen zu analysieren wurde ein Versuch zwischen November 2011 und Juli 2012 angelegt. Mittels eines Bioindikatorentest soll der Einfluss des Holzes auf das Wachstum von Pflanzen beschrieben werden. Kressekeimteste eignen sich nach den Untersuchungen von LEPSIS und BLANKE (2007) zur „Ökotoxikologischen Wirkung von Teerölimprägnierten Holzpfehlen“ als Indikator für Pflanzenverträglichkeitsprüfungen. Dazu wurden am 23.11.2011 folgende drei Mischungen aus Ackerboden und einer Mischprobe aus geschreddertem Apfelholz angesetzt:

- 100% Boden (Kontrolle / 0%-Variante)
- 75% Boden, 25% Holz (25%-Variante)
- 50% Boden, 50% Holz (50%-Variante)

Von jeder dieser drei Varianten wurden vier Wiederholungen in Kunststoffbehältern angelegt. Die Bodenmischungen wurden in einer Klimakammer bei 24°C unter einer Lichtquelle gelagert und regelmäßig befeuchtet, um biologische Prozesse auch in den Wintermonaten zu gewährleisten.

In der 1., 3., 8., 16. und 33. Woche nach Herstellung der Mischungen wurden aus jeder Variante und Wiederholung je ein Kunststoffschälchen mit ca. 200 ml Boden gefüllt. Der Boden wurde leicht angedrückt und mit 40 ml Wasser versetzt. Anschließend wurde in jede Schale 100 Kressesamen als Bioindikator eingesät. Eine über die Schalen gespannte Frischhaltefolie diente als Dampfsperre, damit die Erde nicht austrocknen konnte. Die Varianten wurden nach jeder Ansaat einmal durchmischt, um eine Entmischung von Boden und Holz zu vermeiden. Anschließend wurde die ausgesäte Kresse zusammen mit den Varianten wieder in die Klimakammer gestellt. Die Keimrate wurde nach 5-6 Tagen bonitiert. Zwischen den jeweiligen Aussaatterminen wurden die Erd-Hackschnitzelmischungen feucht gehalten.



Abbildung 3-8: Lagerung der Boden-Holz-Mischungen in einer Klimakammer (Bildquelle: MARKELI UND SCHRÖDER, 2012)



Abbildung 3-9: Kressesamen nach der Keimung unter Frischhaltefolie (Bildquelle: MARKELI UND SCHRÖDER, 2012)

3.3.2 Rodeverfahren RB 60 Klein-Altendorf

Als Basis für das neu entwickelte Rodeverfahren „RB 60 Klein-Altendorf“, im Folgenden nur noch als Rodeverfahren RB 60 bezeichnet, dient ein aus der Baumschultechnik bekannter **Seitenrodepflug**. Das neue Rodeverfahren ist für Obstplantagen auf schwachwachsenden

Unterlagen entwickelt. Dabei werden die Obstbäume zusammen mit der Wurzel aus dem Boden geborgen. Im ersten Verfahrensschritt wird der Obstbaum mit einem Rodeschar unterschritten und der Erdanhang vom Wurzelwerk mit Hilfe einer Rütteleinrichtung getrennt. Im selben Verfahrensschritt wird der Baum mit Wurzel reihensenkrecht abgelegt.

Der Rodepflug (Abbildung 3-10) wurde von der Firma Dröppelmann Agrartechnik aus Geldern geliefert.

Dieser besteht aus einem Haupttrahmen (1) an dem die einzelnen Bauteile montiert sind. Er besitzt eine Dreipunktaufhängung (2) der Kategorie 2, mit der der Rodepflug an die Dreipunkthydraulik eines Acker-

schleppers angebaut wird. Der Rahmen erlaubt eine seitliche Versetzung des Unterschneidemessers (3) um 50 cm. Für den Straßentransport kann der gesamte Pflug hinter den Schlepper zurückgeschoben werden, um den Transport zu erleichtern. Seitlich, in Fahrtrichtung rechts, ist an den Haupttrahmen das Unterschneidemesser angebracht. Es besitzt eine U-Form. Hinter dem

Messer befindet sich ein **Siebrost** (Abbildung 3-11), der über die Zapfwelle des Schleppers vertikal oszillierend angetrieben wird. Der Kraftstrang verläuft vom Zapfwellengetriebe über ein Winkelgetriebe im Ölbad auf einen Exzenterantrieb. Dieser treibt den Siebrost direkt an und ist mit einem Vibrationsausgleich in Form einer Schwungmasse

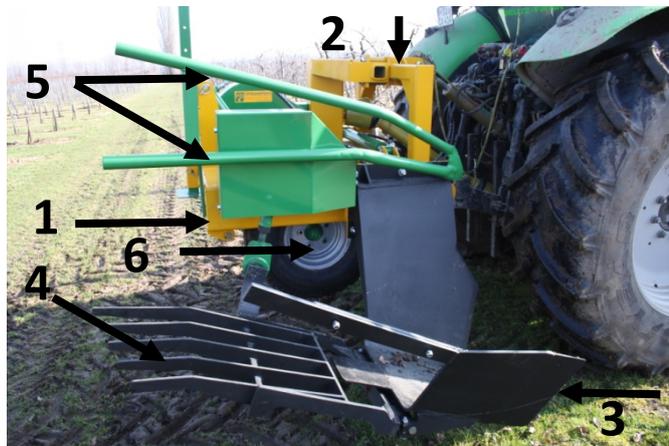


Abbildung 3-10: Rodepflug RB 60 in der ersten Bauform;

- 1: Haupttrahmen; 2: Dreipunktaufhängung;
- 3: Unterschneidemesser; 4: Siebrost;
- 5: Leiteinrichtung; 6: Schnitttiefeinstellung



Abbildung 3-11: Siebrost des Rodepflugs in der ersten Bauform (Bildquelle: DRÖPPELMANN, 2010)

ausgestattet. Der Siebrost wurde vom Hersteller auf die besonderen Anforderungen der Obstbaumrodung angepasst. Die Siebfläche wurde vergrößert und die Rundstahlrohre durch Flachstahl ersetzt, um den gewünschte Effekt der Erdabsiebung zu maximieren (Abbildung 3-10). Weiterhin wurden vom Hersteller zwei Rohre (Leiteinrichtung) (5) am Rahmen angebracht, um die aus dem Erdreich geborgenen Bäume in ihrer Fallrichtung zu leiten. Der Leistungsbedarf liegt bei mindestens 65 kW (88 PS).

Am Hauptrahmen ist weiterhin ein Laufrad (Schnitttiefeinstellung) (6) angebracht, welches durch einen Hydraulikzylinder in vertikaler Achse verstellt werden kann. Die maximale Schnitttiefe beträgt ca. 55 cm. Um die Zugkräfte des durch den Boden pflügenden Schares abzufangen, ist ein Gegenschar in Fahrrichtung links am Rahmen angebracht. Dieses kann zusätzlich noch nach außen verstellt werden, um die Gegenkraft zu erhöhen.

Um die **generelle Einsatztauglichkeit** des Rodepflugs zur Obstbaumrodung zu testen, wurden drei Praxisflächen gerodet. Davor mussten die Flächen, wie bei den herkömmlichen Rodeverfahren auch, vorbereitet werden. Es wurden alle Drahtgerüste, Erdanker, Hagelschutznetze und deren Pfosten aus der Anlage entfernt. Als Praxisflächen stand eine ca. 1 ha große Fläche am Campus Klein-Altendorf, welche mit Apfelbäumen auf der Unterlage M9 (0,79 ha) und ein kleiner Teil mit Birnenbäumen auf Quitte C (0,23 ha) bestockt war, zur Verfügung. Die Flächenangaben beziehen sich dabei immer auf die gesamte Fläche, also inklusive der Fahr- und Wendeflächen um die Obstplantagen. Die Plantage war mit folgenden Apfelsorten bepflanzt: Elstar, Braeburn, Cox Orange, Pinova und Topaz. Die Apfelfläche wird in Anlehnung an den Versuchsfeldführer der Lehr- und Forschungsstation Campus Klein-Altendorf im Folgenden mit H2 bezeichnet und stand zum Rodezeitpunkt im Februar 2011 am Ende des 11. Standjahres. Die Birnenplantage wird mit H1 bezeichnet, befand sich im 24. Standjahr und war mit der Sorte Alexander Lucas auf der Unterlage Quitte C bepflanzt. Als weitere Testfläche stand eine Apfelplantage auf M9, welche im Folgenden mit Dick 10 bezeichnet wird, mit einer Größe von 3,87 ha zur Verfügung. Diese wurde im Februar und März 2011 nach dem 14. Standjahr gerodet. Dort waren die Apfelsorten Elstar, Boskoop, Jonagored und Golden Delicious etabliert. Alle Versuchsflächen waren im Pflanzverband 3,5 x 1 m gepflanzt. Während der Versuchsrodungen wurde der Rodepflug technisch verbessert. Es wurde am Siebrost gearbeitet, um die Erdabsiebung zu maximieren. Weiterhin wurde die Leiteinrichtung am

Rodepflug um konzipiert, damit die losen Obstbäume senkrecht zur Pflanzreihe, im Folgenden nur noch als reihensenkrecht bezeichnet, abgelegt werden konnten. Die technischen Zeichnungen wurden, nach dem vom Campus Klein-Altendorf und dem Autor der vorliegenden Dissertation entwickelten Baumuster des Rodepflugs „RB 60 Klein-Altendorf“, vom Institut für Landtechnik der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, wissenschaftliche Werkstatt von Herrn W. Berchtold mit der Software AutoCAD erstellt.

3.3.3 Weiterverarbeitungskette der Obstbäume

Die Obstbäume aus den in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Versuchen können in einer Verarbeitungskette zu einem biogenen Festbrennstoff aufgearbeitet werden. Nachdem im Folgenden beschriebenen Verfahren (**Poltern, Schreddern und Sieben**) wurden auch alle weiteren Biomassen aus den Rodeversuchen aufgearbeitet. Dazu wurden zunächst die auf den Feldern flächig liegenden Obstbäume mit einem Radlader und einer angebauten Reisiggabel mit vier Zinken und Oberzange am Feldrand aufgepoltert. Die Obstbäume können dort vortrocknen. Durch das Poltern, Trocknen und durch Niederschläge wird noch anhaftender Erdeanhang am Wurzelwerk minimiert. Nach einer variablen Lagerzeit von 2-9 Monaten wurden die Obstbäume durch einen Dienstleister zu einem Brennstoff in folgenden drei Verfahrensschritten aufbereitet:

1. Zerkleinerung der Obstbäume mit einem langsam laufenden Schredder (Doppstadt DW 2560)
2. Siebung des groben Materials mit einem Sternsieb auf die Körnung 0-15 mm (Doppstadt SM 620)
3. Aufbereitung des groben Materials mit einem schnelllaufenden Schredder mit einem Korbeinsatz von 100 mm (Doppstadt AK 430)

Durch den ersten Aufbereitungsschritt wird das Obstholz grob zerkleinert und verbliebener Oberboden an der Wurzel vom Holz getrennt. Dieser wird durch die Siebung mittels Sternsieb größtenteils abgetrennt und separiert. Das grobe, reine Holzmaterial wird anschließend durch den Schnellläufer zum Brennstoff für Holzhackschnitzelheizungen aufbereitet. Da diese Feuerungsanlagen meist automatisch beschickt werden, muss das Material möglichst einheitlich sein. Deswegen wird in dem Schredder ein sogenannter Korb

eingesetzt, der eine Maschenweite von 100 x 100 mm besitzt. Die Holzstücke werden solange im Zerkleinerungsorgan gehalten, bis sie durch die Maschenweite hindurch passen. Vereinzelt Überlängen treten trotzdem auf und verbleiben im Schreddergut. Die Obstbäume können so zu einem Brennstoff der Vergleichsgröße im Hackgutbereich G100 aufbereitet werden (PRANGENBERG, 2011). Der entstehende Brennstoff wurde entweder mit landwirtschaftlichen Transportanhängern zu geeigneten Lagerstätten abtransportiert oder am Feldrand in einer Miete auf einer 2,5 mm starken Folie zwischengelagert.

Eine Aufbereitung mit einem Holzhacker ist durch die mineralischen Bestandteile, vor allem Erde und Steine, nicht möglich, da die Messer stark verschleifen. Mit dieser Technik könnten aufgrund der Arbeitsweise des gezogenen, definierten Schnittes höhere Hackgutqualitäten und feinere Körnungen erreicht werden. Jedoch ist der Einsatz dieser Technik aufgrund der oben genannten Bedingungen nicht möglich.



Abbildung 3-12: Weiterverarbeitungskette der gerodeten Obstbäume; oben links: gerodete Birnenbäume, oben rechts: Zerkleinerung mit langsam laufenden Schredder, unten: Siebung und Feinzerkleinerung

Es wurde eine weitere Verarbeitungskette des gerodeten Obstholzes geprüft. Dazu wurde versucht die gerodeten Obstbäume aus der Dick 10 Fläche mit dem **BioBaler BW 55** der 60

kanadischen Firma Anderson, in Deutschland durch die Firma Jenz (Petershagen) vertreten, aufzunehmen, zu zerkleinern und in Rundballen zu pressen.

Der **BioBaler** ist eine Rundballenpresse für verholzte Biomassen. Diese Maschine nimmt das Holz mit einem Mulchaggregat auf und zerkleinert es grob. Das Holz wird mit einem reißenden Schnitt zerkleinert. Durch Förderwalzen wird das Holzmaterial in eine Presskammer geführt, in der das Holz zu Rundballen, wie sie aus der Strohernte bekannt sind, gepresst wird. Diese Ballen haben einen Durchmesser von ca. 120 cm und werden mit Garn, wie bei Strohballen, abgebunden. Der BioBaler ist für die Freihaltung von Stromtrassen und das Anlegen von Rückegassen, sowie das Ernten von Kurzumtriebsplantagen konzipiert. Die Maschine wird an die Unterlenker eines Schleppers mit einer Leistung von mindestens 130 kW (176 PS) angebaut. Eine hydraulisch verstellbare Schwenkdeichsel ermöglicht ein spurversetztes Fahren von Schlepper und Erntegerät. Weiterhin kann die Deichsel zum einen durch die Unterlenker und zum anderen durch einen Hydraulikzylinder in vertikaler Richtung verstellt werden, sodass die Schnitttiefe des Mulchers einstellbar ist. Angetrieben wird das Gerät über die Zapfwelle des Schleppers, wobei die Kraft zunächst in einem Schwenkgetriebe umgeleitet und anschließend in einem Verteilergetriebe an Mulcher und Presskammer aufgeteilt wird. Die Arbeitsbreite wird vom Hersteller mit 2,25 m und einem Gewicht von 6 t angegeben (JENZ, 2011; VON GLISCZYNSKI, 2011).



Abbildung 3-13: Aufnahme der gerodeten Obstbäume mit dem BioBaler BW 55

3.3.4 Rodungsholzmengen

Die anfallenden Mengen an Rodungsholz wurden auf zwei Arten bestimmt. Zum einen wurden die entstehenden Frischmassen aus den in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Praxisversuchen dokumentiert. Zum anderen wurden von verschiedenen Obstarten und –sorten einzelne Bäume inklusive der Wurzel entnommen und gewogen.

Die **Rodungsholzmengen aus den Praxisversuchen** in der Plantage H2 und H1 wurden nach der Weiterverarbeitung zu Hackschnitzeln auf den landwirtschaftlichen Transportanhängern gewogen. Eine Trennung der Parzellen H2 und H1 erfolgte nicht. Die Wiegung wurde mit einer Fuhrwerkswaage am Campus Klein-Altendorf durchgeführt. Diese besitzt einen Wägebereich von 400–20.000 kg bei einer Messgenauigkeit von $d = 10$ kg. Nachdem die Holzbiomasse in ein Lager geschüttet wurde, konnte in diesem als Referenz das Gesamtvolumen bestimmt werden. Dazu wurden die Raummaße zentimetergenau gemessen und über die geometrische Form das Volumen berechnet. Weiterhin wurde in drei Wiederholungen das Schüttgewicht von je genau einem Kubikmeter geschreddertem Holz ermittelt.

Die Holzhackschnitzel auf der Fläche Dick 10 wurden nach der Weiterverarbeitung nicht abtransportiert, sondern am Feldrand auf einer Miete gelagert. Deswegen wurde auf dieser Fläche lediglich das Gesamtvolumen über die Abmessungen der Miete bestimmt. Darüber hinaus wurde die Schüttdichte, wie oben beschrieben, in dreifacher Wiederholung gemessen.

Der **Wassergehalt** wurde vom Rodungsholz aus den **Praxisversuchen** von H2/H1 und Dick 10 im direkten Anschluss der Aufbereitungsschritte ermittelt. Aus den Frischmassen und dem Trockenmassegehalt wurde der Trockenmasseertrag pro Hektar errechnet.

Um eventuelle Unterschiede in den Biomassen zwischen den angebauten Apfelsorten feststellen zu können, wurden auf den Flächen H2 und Dick 10 **Einzelbaumwiegungen** in 5facher bzw. 10facher Wiederholung durchgeführt. Tabelle 3-2 gibt Auskunft über Versuchsfläche, Sorte, Wiederholungsanzahl und Standjahr.

Tabelle 3-2: Übersicht über Versuchsflächen, Sorten, Wiederholungsanzahl und Standjahr zur Bestimmung der Rodungsholzmasse

Versuchsfläche	Sorte	Wiederholungsanzahl	Standjahr
H2	Elstar	5	11
H2	Pinova	5	11
H2	Topaz	5	11
Dick 10	Gala	10	14
Dick 10	Golden Delicious	5	14
Dick 10	Jonagored	5	14
Dick 10	Boskoop	10	14
Dick 10	Elstar	5	14

Die Wiederholungsanzahl bei den Sorten Gala und Boskoop wurden aufgrund der starken Inhomogenität der Bäume vergrößert. Jeder Baum wurde direkt nach der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Rodung und in entsprechender Wiederholung aus der Plantage zufallsverteilt entnommen. Im Anschluss wurden die Wurzeln von dem noch anhaftenden Oberboden mittels Wasserstrahl gereinigt. Nach einer Abtrocknungszeit von ca. 24 Stunden wurden die Bäume einzeln mittels Zugwaage (HFB 600K200 der Firma Kern) auf 200 g genau gewogen.

Aus den **Einzelbaumversuchen** zur Bestimmung der Rodungsholzmasse wurden ebenfalls Proben zur Wassergehaltsbestimmung gezogen. Diese wurden als einfache Mischprobe aus jeder Apfelsorte getrennt entnommen und nach der beschriebenen Methode analysiert. Anschließend wurde auch daraus der Trockenmasseertrag pro Hektar für jede Sorte getrennt errechnet.

3.3.5 Brennstoffeigenschaften

Ähnlich wie beim Schnittholz wurde auch das Rodungsholz auf die Brennstoffeigenschaften hin untersucht. Der Wassergehalt, Aschegehalt, Brennwert und die Elementaranalyse wurde

ebenfalls gemäß der jeweiligen DIN-Normen nach den in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Methoden durchgeführt.

Weiterhin wurde das Holz hinsichtlich des Aschegehalts und des Brennwertes nach den bereits beschriebenen Methoden auf den Flächen H2/H1 und Dick 10 untersucht. Jede Analyse fand in dreifacher Wiederholung statt.

Um die Rodungsholzmengen und deren Brennstoffeigenschaften differenzierter zu betrachten wurden weitere Versuche durchgeführt. Dazu wurden Obstbäume in die Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig aufgeteilt, deren Massenanteile berechnet sowie Wasser-, Asche-, Energiegehalt und die Elementarzusammensetzung bestimmt.

Für die Analysen der **Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig** wurden 20 Apfelbäumen der Sorte Jonagored auf der Unterlage M9 mit dem Rodeverfahren RB 60 gerodet. Dies fand in Klein-Altendorf am 27. März 2012 statt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Apfelplantage im 14. Standjahr. Vor der Aufteilung wurden die Wurzeln vom restlichen Erdanhang mit Wasser befreit und trocknen gelassen. Die Zerlegung der Bäume in die Segmente wurde wie folgt vorgenommen: Die Wurzel wurde genau mittig im Veredlungsknoten vom Stamm getrennt. Als Reisig wurden alle Äste definiert, die einen Durchmesser unter 4 cm besaßen. Der verbleibende Teil ist als Schaft definiert. Die Aufteilung der Bäume in Wurzel, Schaft und Reisig sowie die Frisch- und Trockenmassebestimmung fand am 07. Mai 2012 statt. Jeweils die Baumsegmente von zwei Bäumen wurden zu einer Wiederholung zusammengefasst, sodass die Analysen in 10facher Wiederholung für jede der Varianten Wurzel, Schaft und Reisig stattfanden. Nach der Frischmassebestimmung wurden die Baumteile mit einem Scheibenradhacker der Firma Schliesing (Modell 350 Mx) zerkleinert und getrennt aufgefangen. Für die Aschegehalts- und Brennwertanalysen wurde das Material mit der Retsch Mühle weiter auf 1 mm zerkleinert. Die Frischmassen der einzelnen Baumsegmente wurden auf 10 g genau bestimmt. Die anderen Analysen wurden nach den beschriebenen Methoden durchgeführt.

Um detaillierter die Brennstoffeigenschaften des **Veredlungsknoten** und die Unterschiede zwischen der Rinde und dem reinen Holz herauszuarbeiten wurde eine weitere Untersuchung durchgeführt. Dazu wurden an sechs Bäumen der Sorte Jonagored auf der Unterlage M9 im 14. Standjahr Baumscheiben mit einer Stärke von ca. 5 cm an vier Stellen entnommen. Eine Baumscheibe wurde zwischen Wurzelansatz und Veredlungsknoten aus

dem Stamm gesägt. Eine weitere genau mittig aus dem Veredelungsknoten und zwei weitere aus dem Schaft in 40 cm und 130 cm über dem Boden. Die Baumscheiben wurden danach mit einem Schälmesser entrindet und die Rinde vom Holz separiert. Anschließend wurden die Holz- und Rindenstücke der vier Varianten zunächst grob und dann mit der Retsch Probenmühle fein zerkleinert. Danach wurde der Wasser-, Asche- und Energiegehalt nach den beschriebenen Methoden in jeweils drei Wiederholungen pro Variante durchgeführt. Eine Analyse der elementaren Zusammensetzung fand ebenfalls nach der bekannten Methodik statt.

Um eventuelle **Arten- und Sortenunterschiede** hinsichtlich der Brennstoffeigenschaften bei Obstbäumen herauszuarbeiten wurden an vier Apfelsorten und einer Birnensorte die Aschegehalte und Brennwerte der gesamten Bäume analysiert. Die Apfelsorten waren Elstar, Gala, Boskoop und Cox, die Birnensorte Alexander Lucas. Für die Untersuchungen wurden jeweils fünf Bäume pro Sorte mit dem Rodeverfahren RB 60 gerodet. Die Wurzeln wurden durch Abspülen vom Oberboden befreit und trocknen gelassen. Nach zwei Wochen Lagerdauer wurden die Bäume erst grob mit der Holzhäckselmaschine und anschließend fein auf ≤ 1 mm in der Retsch Probenmühle zerkleinert. Anschließend wurden die fünf Varianten auf ihre Massenkonzentration getrocknet und in jeweils drei Wiederholungen der Aschegehalt und Brennwert in Anlehnung an die DIN-Methoden ermittelt.

3.3.6 Arbeitsqualitätsfaktoren RB 60

Aus den in Kapitel 2.2.3 aufgestellten Anforderungen an ein Rodeverfahren für Obstplantagen können Qualitätsfaktoren abgeleitet werden. Weiterhin können Qualitätsparameter aus den Anforderungen der Weiterverarbeitungskette und der Brennstoffnutzer definiert werden.

Zunächst ist es wichtig, dass das neue Rodeverfahren generell die Einsatztauglichkeit nachweist. Neben den Bäumen sollen auch in der Anlageform der Einzelbaumunterstützung die Baumpfähle ganz mit dem Baum geborgen werden, ohne dass diese beschädigt werden. Im Folgenden werden Beschädigungen, Abschnitte und Abbrüche an den Baumpfählen als „**Pfahlabbrüche**“ zusammengefasst. Die Unterstützungspfähle können bei gutem Zustand wiederverwandt werden, was bei anderen Rodeverfahren kaum möglich ist. Um dies zu untersuchen wurden in vier Rodungsversuchen an jeweils 100 Pfählen kontrolliert, ob diese

abgeschnitten, angebrochen oder durchgebrochen wurden. Diese Versuche fanden in den Flächen H2 und Dick 10, weiterhin in einer Praxisfläche im Betrieb von Frau Pude-Nolden und in Klein-Altendorf in der Parzelle B2 statt.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der noch verbleibende **Erdanhang am Wurzelwerk** der Bäume nach der Rodung. Dieser sollte so gering wie möglich sein, da in der Verarbeitungskette die Erde Probleme bei der Zerkleinerung bereitet. Um den Erdanhang an den Wurzeln zu quantifizieren und die Wirkung der Siebflächenverbesserung zu untersuchen, wurden in den Parzellen H2, Dick 10 und B2 jeweils fünf Einzelbäume zufallsverteilt über die ganze Fläche entnommen. Die Beprobung fand einen Tag nach der Rodung in den Jahren 2011 in H2 und Dick 10 und in 2012 in der Parzelle B2 statt. Dazu wurden die Bäume aus den Plantagen vorsichtig entnommen und behutsam zum Feldrand getragen. Dort wurde der Baum und Erdanhang auf 200 g genau mit der Zugwaage gewogen. Anschließend wurde die Erde an den Probenbäumen mit Wasser abgewaschen und 24 Stunden offen trocknen gelassen. Zum Schluss wurden die Bäume zurückgewogen. Anschließend wurde der Erdanhang in Relation zum Baumgewicht ohne Erdanhang gesetzt.

Um die Werte der Einzelbaumuntersuchungen zum Erdanhang am Wurzelwerk in der Praxisversuchsfläche zu kontrollieren, wurden zusätzlich die Masse bzw. das Volumen und Schüttdichte der bei der Weiterverarbeitung ausgesiebten Feinfraktion absolut ermittelt. Diese Feinfraktion besteht zu einem Großteil aus dem Oberboden, der an den Baumwurzeln anhaftete. Dazu wurde die Sieberde von Parzelle H2 auf landwirtschaftliche Anhänger verladen und genauso wie die Hackschnitzel gewogen. Die Sieberde von Dick 10 wurde über das Volumen und die Schüttdichte bestimmt. Die gesamte Erdmasse wurde anschließend in das Verhältnis zur Biomasseausbeute gesetzt. Auf der Fläche B2 wurde der Erdanteil nur in den Einzelbaum- und Rodeversuchen untersucht.

Als weiterer Arbeitsqualitätsfaktor wurde der Einfluss des **Wirkkomplexes aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Umdrehungszahl** des Zapfwellenantriebs beim Roden auf den Erdanhang, Wurzelabbruch und die Ablagegenauigkeit untersucht. Diese beiden Faktoren nehmen Einfluss auf den Erdanhang am Wurzelwerk, die Wurzelmasse, die beim Roden durch die exzentrische Bewegung der Siebfläche abgebrochen sowie auf dem Feld verbleibt, und die Ablagegenauigkeit beim Austritt der Bäume aus dem Rodepflug. Dazu wurden im Frühjahr 2012 zwei Versuchsreihen durchgeführt. Zum einen stand eine Fläche

(J2) mit Äpfeln, die im Herbst 1993 auf der Unterlage M9 gepflanzt wurde, und zum anderen eine junge Apfelanlage (L), die im Herbst 2006 auf M9 angelegt wurde, zur Verfügung. Die Parzelle J2 stand demnach im 19. Standjahr und war mit den Apfelsorten Golden Delicious, Gloster und Jonagored im Pflanzverband 3,5 x 1 m bestockt. Die Anlage L befand sich dagegen im 6. Standjahr und war mit den Sorten Boskoop, Gala, Elstar und Cox im Verband 3,0 x 0,75 m bepflanzt. Die Technik des Rodepflugs war bei beiden Versuchen dieselbe, d.h., dass keine Veränderungen an der Siebfläche und an den Leiteinrichtungen vorgenommen wurden. Variiert wurden die Vorfahrtsgeschwindigkeit zwischen 0,7 und 1,5 km*h⁻¹ und die Zapfwellendrehzahl zwischen 300 und 420 U*min.⁻¹. Für die Zielgrößen Erdanhang, Wurzelabbruch und Ablagegenauigkeit wurden je ein Boniturwert zwischen 0 (Zielgröße nicht erreicht) und 3 (Zielgröße voll erreicht) vergeben. Dabei ist die Zielgröße beim Resterdang und Wurzelabbruch voll erreicht, wenn dieser sehr gering ausfiel. Die Ablagegenauigkeit wurde mit 3 bewertet, wenn der Baum nach dem Roden im 90° Winkel zur ursprünglichen Pflanzreihe reihensenkrecht in Fahrtrichtung nach rechts abgelegt wurde. Die in der visuellen Bonitur ermittelten Werte wurden anschließend mit einem Multiplikator verrechnet. Dieser wurde für den Resterdang (*Re*) mit 3, für den Wurzelabbruch (*Wa*) mit 2 und für die Ablagegenauigkeit (*Ag*) mit 1 festgelegt. Der Arbeitsqualitätsfaktor (*Aqf*) wurde anhand der Formel 3-4 berechnet. Pro Variante wurden jeweils 20 Bäume bonitiert.

Formel 3-4: Berechnung des Arbeitsqualitätsfaktors aus den Boniturwerten vom Resterdang, Wurzelabbruch und der Ablagegenauigkeit

$$Aqf = Re * 3 + Wa * 2 + Ag * 1$$

Dabei ist:

Aqf = Arbeitsqualitätsfaktor,

Re = Resterdang,

Wa = Wurzelabbruch,

Ag = Ablagegenauigkeit.

Die Ergebnisse wurden in einem Boxplotdiagramm dargestellt. Ein Boxplot besteht immer aus einem Rechteck (Box) und zwei Linien (Antenne), die das Rechteck verlängern.

Die Boxen entsprechen jeweils dem zweiten und dritten Quartil der aufgenommenen Boniturwerte. Abgegrenzt wird eine Box durch das untere (erste) und obere (vierte) Quartil. Jedes Quartil umfasst 25% aller Messwerte. Weiterhin befindet sich in der Box der Median als schwarzer Querstrich, der das gesamte Diagramm (Box mit Antenne) in zwei Hälften teilt, in denen jeweils 50% der Werte liegen. Durch die Lage des Median wird die Schiefe der Verteilung der Daten gekennzeichnet. Mit der Antenne werden die Werte dargestellt, die außerhalb der Boxen liegen. Eine Antenne besteht immer aus zwei Whiskern. Jeder Whisker besitzt eine maximale Länge des 1,5-fachen Interquartilabstands. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als Extremwerte in Form eines Punktes über bzw. unter dem Whisker dargestellt. Durch die Größe der Boxen und der Länge der Antennen wird die Streuung der bonitierten Werte abgebildet. Für den vorliegenden Fall heißt dies, welchen Einfluss der Wirkkomplex aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Zapfwellendrehzahl auf die Homogenität des Arbeitsqualitätsfaktors aus Ablagegenauigkeit, Wurzelabbruch und Erdabsiebung an den Obstbäumen besitzt. Ziel ist es, die Maschineneinstellung mit einem hohen Qualitätsfaktor bei gleichzeitig geringer Streubreite der Boniturwerte zu finden.

3.4 Trocknung

In diesem Kapitel wird die Methodik der Trocknungsversuche der Biomassen aus Obstplantagen beschrieben. Dazu wird neben der Trocknung von Obstholz auch die Trocknung von Bäumen aus Kurzumtriebsplantagen betrachtet, um die Methodik an einem weiteren Agrarholz vergleichen zu können.

3.4.1 Ganzbaumtrocknung

Die Ganzbaumtrocknung, ist wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, eines der einfachsten Trocknungsverfahren für Biomassen. Zur Ganzbaumtrocknung wurden Versuche mit Holz aus Obst- und Kurzumtriebsplantagen durchgeführt. Zum einen wurde das Rodungsholz auf der Fläche H2 im Rahmen der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Weiterverarbeitungskette mittels Radlader und Reisiggabel am Feldrand gepoltert. Dieser Polter blieb bis zur Zerkleinerung liegen und trocknete durch die natürliche Konvektion. Zwischen aufpoltern (21.02.2011) und zerkleinern (20.04.2011) lagen 59 Tage. Es wurde der Wassergehalt in Anlehnung an die DIN 14774-2 beim Aufpoltern und kurz vor dem Zerkleinern bestimmt. Dies erfolgte durch eine Mischprobe ohne Sortentrennung und über den gesamten Polter.

Nach derselben Methode wurde auch die Fläche Dick 10 untersucht. Dort wurde am 28.02.2011 das Holz aufgepoltert und am 29.11.2011 zerkleinert. Daraus ergibt sich eine Trocknungszeit von 274 Tagen.

Um den Trocknungsverlauf genauer bei der Ganzbaumtrocknung zu verfolgen, wurden Pappel- und Weidenruten aus einer Kurzumtriebsplantage in Klein-Altendorf nach einer Standzeit von drei Jahren geschnitten und diese nach Baumarten getrennt am Feldrand aufgepoltert. Die Wassergehaltsmessungen begannen am 07.12.2010 und wurden monatlich in je drei Wiederholungen pro Baumart durchgeführt. Da im Frühjahr 2011 die bereits vor vier Monate geernteten und gelagerten Ruten neu austrieben, wurde ab dem 07.04.2011 die Wassergehaltsbestimmung wöchentlich bis Ende Juni 2011 durchgeführt. Durch den Blattaustrieb sind Transpirationsvorgänge und damit ein erhöhter Wasserverlust aus dem Holz zu erwarten. Die Gesamttrocknungszeit der Pappel- und Weidenruten lag bei 202 Tagen.

3.4.2 Ballentrocknung

Das Trocknungsverhalten von Ballen aus Holzbiomasse, die mit dem BioBaler BW 55 geerntet wurden, konnte nur an Feldgehölzballen aus Weiden und Pappeln getestet werden. Biomasseballen konnten technisch bedingt aus Obstholz nicht hergestellt werden. Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit im Forschungsbereich für Nachwachsende Rohstoffe, betreut durch den Autor der vorliegenden Dissertation, durchgeführt. Es wurden mit dem BioBaler eine Kurzumtriebsplantage in Klein-Altendorf und eine in Petershagen bei der Firma Jenz, dem Vertriebspartner des BioBalers, geerntet. Die Wassergehaltsanalysen wurden für beide Standorte ab dem Erntetermin ca. alle zwei Monate durchgeführt. Tabelle 3-3 gibt Auskunft über die Probenentnahme aus den Biomasseballen:

Tabelle 3-3 Daten der Probenentnahmen zur Wassergehaltsanalyse von Feldgehölzballen, die mit dem BioBaler der Firma Jenz geerntet wurden (VON GLISCZYNSKI, 2011).

Petershagen	Klein-Altendorf
08. Dezember 2010	
28. Februar 2011	24. Februar 2011
11. Mai 2011	11. Juni 2011
29. Juni 2011	01. Juli 2011

Zwischen dem Probeentnahmeterrmin und der Wassergehaltsbestimmung wurden die Proben luftdicht verpackt und kühl gelagert. Die Analyse wurde in Anlehnung an die DIN 14774-2 in drei Wiederholungen aus jeweils drei verschiedenen Pressballen durchgeführt.

3.4.3 Hackschnitzeltrocknung

Die Trocknung von Hackschnitzeln wurde anhand zweier Varianten getestet. In der einen wurde das Rodungsholz aus der Parzelle H2 in einer überdachten Lagerhalle und in der anderen von der Fläche Dick 10 in einer Feldmiete mit einem Vlies untersucht. Das Material

wurde mit der bekannten Aufbereitungskette durch Schreddern zerkleinert. Der Begriff Hackschnitzel wird in diesem Kapitel als Synonym für diese Schredderware benutzt, da sie eine ähnliche Größenverteilung wie ein G100 Hackschnitzel besitzt.

Das Obstholz aus der Parzelle H2 wurde nach einer knapp zwei monatigen Stamm Trocknung am 20.04.2011 zerkleinert und in eine Lagerhalle geschüttet. Die Lagerhalle ist an drei Wandseiten mit Holzbohlen auf ca. 3,5 m ausgekleidet. Die vordere Front ist offen. Zwischen der Holzbohlenoberkante und der Überdachung ist ca. 1,5 m Abstand, sodass die Luft zirkulieren kann. Die Schüttung in der Halle war ca. 4 m hoch. Der Wassergehalt wurde bei Einlagerung (20.04.2011) und am Ende der Versuchsreihe am 16.07.2012 mittels Trockenschrank in Anlehnung an die DIN-Norm in jeweils drei Wiederholungen bestimmt.

Zwischen diesen beiden Messungen wurden der Wassergehalt und die Temperatur im Haufwerk mit dem Humimeter BLL der Firma Schaller ermittelt. Das Humimeter BLL dient zur stichprobenartigen Wassergehaltsbestimmung in Holzhackschnitzelschüttungen. Weiterhin erfasst das Gerät die Temperatur in der Hackgutschüttung. Die Einzelteile des Humimeters bestehen aus dem Messgerät mit Display und vier Bedienknöpfen, einer ca. ein Meter langen Einstechlanze und dem am Ende der Lanze befindlichen Messkopf. Am Messgerät wird vor der Messung eine Griffstange montiert. Mit dieser Griffstange wird die Lanze in die Schüttung eingesteckt, sodass die Messtiefe bei ca. 0,9 – 1 m liegt. Bevor eine Messung durchgeführt wird, muss das Messgerät der Hackguttemperatur angeglichen werden (+/- 3K). Dazu sollte das Humimeter BLL ca. eine halbe Stunde vor der Messung an der Schüttung gelagert werden. Weiterhin ist die richtige Kennlinie einzustellen. Für die vorliegende Untersuchung wurde die Kennlinie „Grobhackgut“ (Hackgut Grob, 10-50% Wassergehalt, ab Größenklasse P45 bzw. G50 mit wenig Feinanteil) gewählt. Diese stimmte bei Voruntersuchungen, in denen der Wassergehalt des betreffenden Materials im Trockenschrank geprüft wurde, bis auf +/- 0-3% Abweichung überein. Das Messgerät ist auf normal komprimiertes Hackgut kalibriert. Normal komprimiertes Hackgut ist in der Norm CEN/TS 15103 (Bestimmung der Schüttdichte) definiert und stimmt mit der Schredderware überein. Die Messungen wurden erst ab dem 07.02.2012 mit dem Humimeter begonnen. Danach wurde mindestens einmal pro Monat bis zum Versuchsende gemessen. Dabei wurden die Messpunkte und Wiederholungen nach folgendem Schema beprobt.

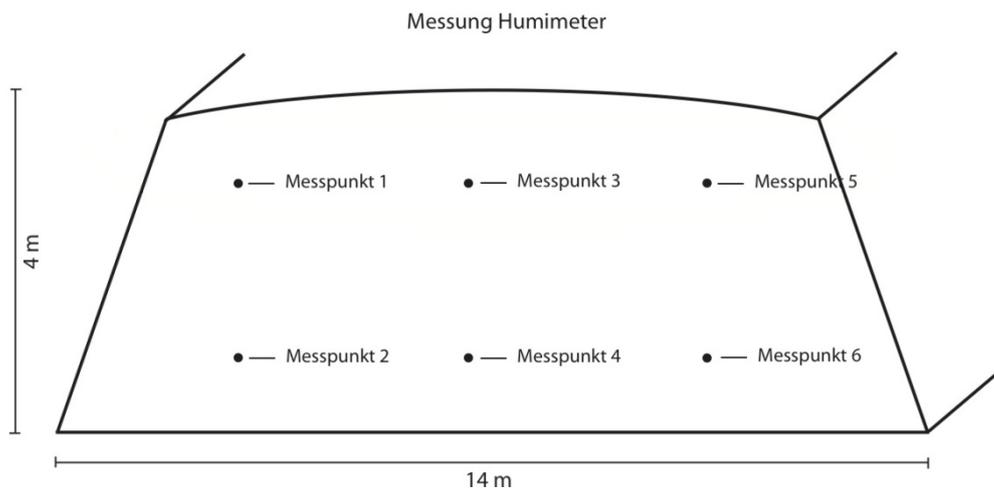


Abbildung 3-14: Messpunktverteilung an der Frontseite; Miete Lagerhalle (Bildquelle: WINZER, 2012)

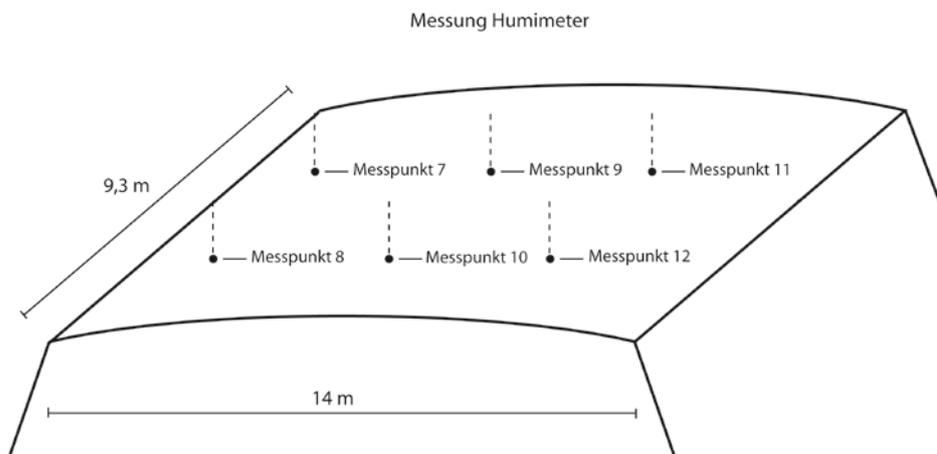


Abbildung 3-15: Messpunktverteilung an der Oberseite; Miete Lagerhalle (Bildquelle: WINZER, 2012)

Die Feldmiete an der Fläche Dick 10 wurde am 29.11.2011 nach einer Lagerdauer am Stamm von ca. 9 Monaten geschreddert. Die Miete wurde auf einer 2 mm starken Deponiefolie aufgeschüttet. Anschließend wurde die Miete mit einem Strohschutzvlies abgedeckt. Dieses hat die Eigenschaft, dass Niederschläge vom Haufwerk abgehalten werden, jedoch Wasserdampf aus der Miete entweichen kann. Bei dieser Miete wurde ebenfalls der Wassergehalt bei Einlagerung und am Versuchsende (16.07.2012) nach DIN Norm bestimmt. In der Zwischenzeit wurde mindestens einmal im Monat der Wassergehalt mit dem

Humimeter BLL ermittelt. An der Feldmiete wurden zwei Messstellen auf der Längsseite eingerichtet. Diese wurden nach ca. 1/3 und die andere nach ca. 2/3 der Mietenlänge aufgeteilt. Jede Messstelle wurde mit drei Messpunkten ausgerüstet, deren Lage aus folgender Zeichnung zu entnehmen ist.

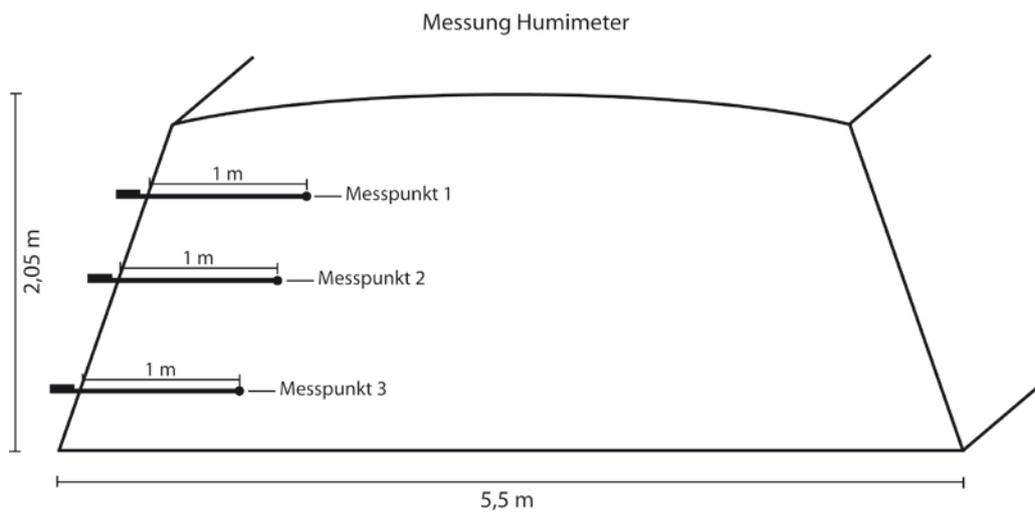


Abbildung 3-16: Messpunktverteilung für Humimetermessung; Feldmiete Dick 10
(Bildquelle: WINZER, 2012)

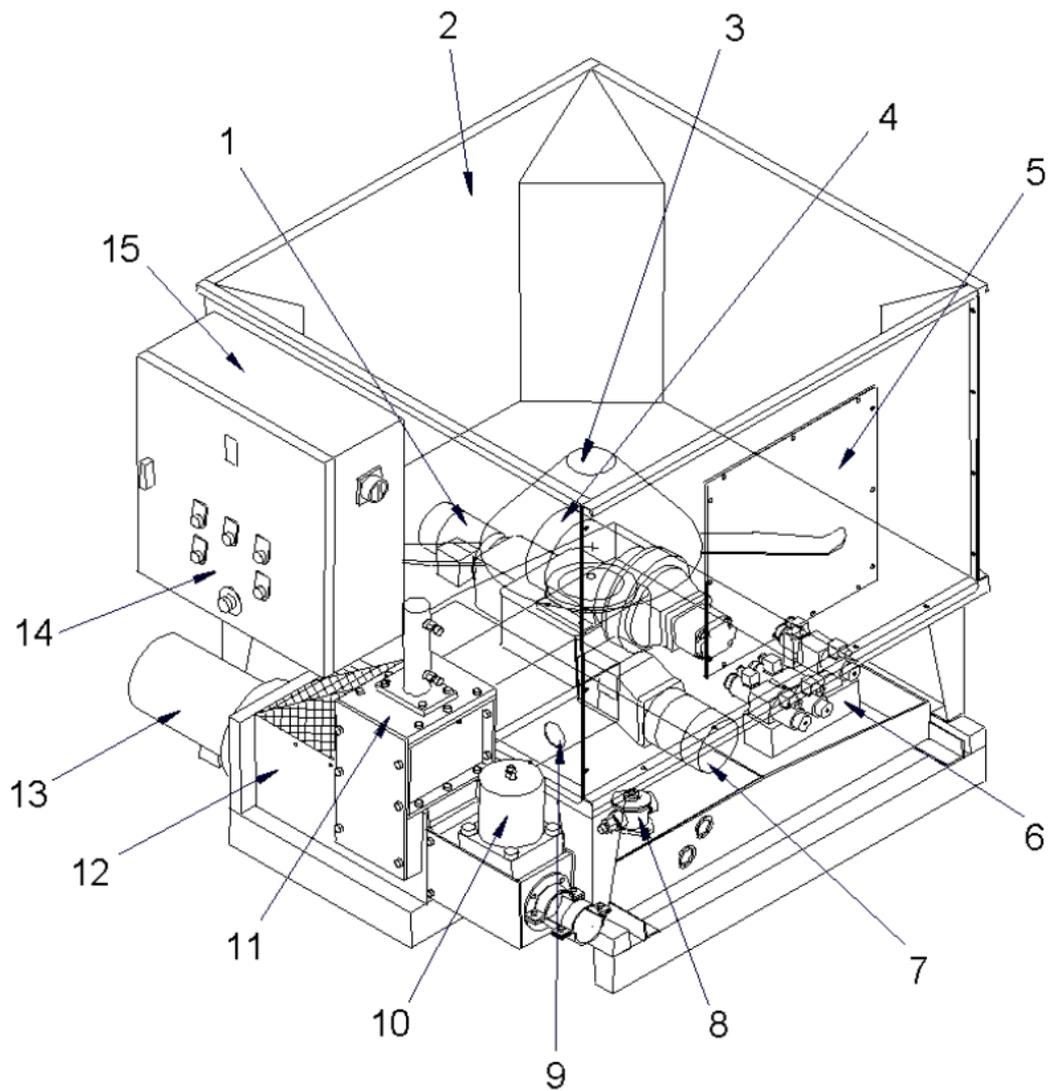
3.5 Brikettierung

3.5.1 Maschinenbeschreibung

Für die Versuche zum Themengebiet Brikettierung stand eine Brikettierpresse der Firma Höcker Polytechnik Typ BrikStar C (Abbildung 3-17) am Campus Klein-Altendorf zur Verfügung. Diese hydraulische Brikettierpresse arbeitet grundsätzlich nach dem Strangpressverfahren, jedoch wird der Verdichtungseffekt nicht durch einen zylindrischen Pressstrang, sondern durch einen Klemmzylinder (10), der den Pressstrang öffnet und schließt, erzielt. Durch den Druck in den Presszylindern gegen den in der Presszange erzeugten Reibungswiderstand des Materials wird ein Verdichtungseffekt realisiert. Durch diesen und die entstehende Reibungswärme behalten die Briketts ihre vorgegebene Form. Die Brikettierpresse ist ausschließlich für das Pressen von Briketts aus cellulosehaltigem Material geeignet. Die mit der Maschine hergestellten Briketts enthalten keine zusätzlichen Bindemittel und haben einen Durchmesser von 65 mm bei einer Länge von 30 bis 50 mm. Der Brikettierprozess läuft automatisch ab (HÖCKER POLYTECHNIK, 2009).

Das zulässige Eingangsmaterial in die Brikettierpresse muss cellulosehaltig sein und in Form von Sägemehl, Hobel-/Frässpänen, Hackschnitzeln, Kurzstroh oder Papier-/Kartonagenstücken vorliegen. Die maximale Korngröße beträgt 15 mm. Der Staubanteil darf den Wert von 20% nicht überschreiten. Die Dichte des Eingangsmaterials sollte zwischen 70 und $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ liegen, die zulässige Materialfeuchte zwischen 8 und 18%. Das Material muss frei von Klebemitteln und Lacken sein (HÖCKER POLYTECHNIK, 2009).

Der folgende Plan gibt eine Übersicht über die Grundelemente der für die Versuche verwendeten Brikettierpresse.



1	Getriebemotor für Rührwerk
2	Spänebehälter
3	Rührwerk
4	Pumpeneinheit mit Elektromotor
5	Revisionsklappe
6	Steuerblock mit Hydraulikventil
7	Getriebemotor für Dosierschnecke
8	Ölfilter
9	Manometer
10	Klemmzylinder
11	Stopfereinheit mit Stopfzylinder
12	Presseinheit
13	Hauptzylinder
14	Steuer- und Bedientafel
15	Schaltschrank

Abbildung 3-17:

Grundelemente der Brikettier-
presse BrikStar C der Firma
Höcker Polytechnik (Bildquelle:
HÖCKER POLYTECHNIK, 2009)

Die Brikettierpresse arbeitet in regelmäßigen, automatischen Zyklen. Jeder dieser Zyklen wird durch die Elektronik im Schaltschrank gesteuert und ausgewertet. Der Presszyklus ist die Aufeinanderfolge der Bewegungen einzelner Hydraulikzylinder, welche durch am Pressrahmen angebrachte Endschalter gesteuert werden. Ein Presszyklus läuft nach folgendem Schema ab:

- Hauptzylinder (13) fährt in vordere Position Richtung Klemmzylinder (10)
- Stopfzylinder (11) in Stopfeinheit öffnet die Füllkammer
- Hauptzylinder (13) fährt in hintere Position. Gleichzeitig setzt sich die Dosierschnecke (7), während der Rückwärtsbewegung des Hauptzylinders (13), in Betrieb
- Stopfzylinder (11) schließt die Füllkammer
- Klemmzylinder (10) klemmt die Briketts mit dem Maximaldruck und hält sie in der Zange fest
- Hauptzylinder verfährt in vordere Position und schiebt die gepressten Briketts aus der Zange

Die Elektronik misst während des Pressvorgangs kontinuierlich die Stromaufnahme des Hydraulikmotors. Da der Pressdruck in direkter Proportion zur Stromaufnahme des Hydraulikmotors steht, kann diese als Steuergröße verwendet werden. Ist der voreingestellte Pressdruck erreicht, öffnet der Klemmzylinder (10) die Zange und die Briketts werden um jeweils einen Pressling nach vorn verschoben. Das jeweils zuletzt gepresste Brikett bildet die Zwischenwand für das Pressen einer neuen Dosierung des Eingangsmaterials. Weiterhin ist die veränderbare Laufzeit der Dosierschnecke (7) Bestandteil des automatischen Presszyklus und wird durch die Elektronik gesteuert und überwacht. Durch die Proportionalität der Stromaufnahme des Hydraulikmotors und des Druck im Hydraulikkreislauf der Presseinheit (12), bestehend aus Klemmzylinder (10), Stopfzylinder (11) und Hauptzylinder (13), kann mit Hilfe eines einstellbaren Stromrelais Einfluss auf die Brikethärte und –länge genommen werden. Solch ein Relais (PS1) ist in der Brikettierung im Schaltschrank (14) verbaut (HÖCKER POLYTECHNIK, 2009).

Steuerung der Briketthärte:

In der Vorwärtsbewegung des Hauptzylinders (13) öffnet der Klemmzylinder (10) in dem Moment, in dem das PS1-Relais den definierten Abschaltstromwert des Hydraulikmotors misst. Die Steuerung schaltet zu diesem Zeitpunkt das Hydraulikventil des Klemmzylinders (10) und löst die Zange. Das Brikett wird freigegeben. Durch vier DIP-Schalter auf der PS1-Leiterplatine können verschiedene Drücke bis zum Öffnen des Klemmzylinders (10) und damit die Briketthärte eingestellt werden. Um den Druck im Klemmzylinder zu erhöhen muss der Druck im Hydraulikkreislauf erhöht werden. Demzufolge muss die Hydraulikpumpe mehr Leistung bringen, also mehr Strom verbrauchen. Das PS1-Relais misst den jeweils anstehenden Strom, der in direkter Abhängigkeit zum hydraulischen Druck steht. Ist der Grenzwert erreicht, gibt der Kontakt ein Signal an die Steuerung und öffnet den Klemmzylinder (10). Die Grundeinstellung liegt bei 12 MPa. Der Druck kann in 1 MPa Schritten von 8 bis 15 MPa verstellt werden.

Steuerung der Brikettlänge:

Die Brikettlänge wird über die eingeschobene Materialmenge in die Stopfereinheit (11) geregelt. Durch Auswertung der Druckverhältnisse in der Presseinheit (12) des jeweils vorrangegangenen Presszyklus, ebenfalls wieder durch die Stromaufnahme des Motors mit dem PS1-Relais gemessen, wird die Laufzeit der Dosierschnecke (7) und damit die eingeschobene Materialmenge verändert. Werden in der Presseinheit (12) nicht die erforderlichen Druckniveaus erreicht, also der Abschaltstromwert nicht erreicht, wird die Schneckenlaufzeit beim folgenden Materialeinschub um 0,2 Sekunden verlängert. Wird das Druckniveau überschritten, also mehr Strom verbraucht als der Grenzwert vorgibt, wird die Schneckenlaufzeit um 0,2 Sekunden verkürzt. Dieser Vorgang wiederholt sich im jeden Presszyklus, sodass die Brikettlänge auch bei inhomogenen Eingangsmaterialien bzw. wechselnder Materialkonsistenz geregelt wird. Mit Hilfe von zwei DIP-Schaltern am PS1 kann die Brikettlänge verändert werden. Die ideale Brikettlänge beträgt 40 mm (Grundeinstellung). Durch die DIP-Schalter kann die Brikettlänge in drei Stufen erhöht werden. Ein definierter Wert der Längenerhöhung kann nicht angegeben werden.

Abkühlstrecken

Für die Brikettierung steht eine Abkühlstrecke vom Hersteller zur Verfügung. Diese kühlt das Brikett nach dem Pressvorgang durch Konvektion mit der Außenluft. Da bei dem Brikettierungsprozess ein Reibungswiderstand erzeugt wird, entsteht Wärme. Durch diese Erwärmung dehnt sich das Brikettmaterial, vor allem auch das Wasser im Material, aus. Nach dem der Brikett die Brikettierung verlässt, dehnt er sich materialabhängig aus. Weiterhin kühlt der Brikett außerhalb der Maschine recht schnell ab und es entstehen Schrumpfrisse und Bröckelverluste. Um die Brikettqualität zu erhöhen, also einen festen Brikett mit wenigen Bröckelverlusten zu erzeugen, kann eine Abkühlstrecke montiert werden. Diese hält den Brikett nach dem Verlassen des Klemmzylinders (10) in seiner Form, während dieser abkühlt. Demzufolge werden die Quellungs- und darauffolgende Schrumpfbewegungen minimiert und die Brikettqualität erhöht. Der Effekt ist vermutlich stark vom Eingangsmaterial und dem Wassergehalt abhängig.

Die Abkühlstrecke ist weiterhin mit acht Gewindeschrauben mit Spannfedern entlang des Abkühlweges ausgestattet. Jeweils zwei liegen sich gegenüber mit denen der Durchgangsquerschnitt und damit der Nachpressdruck in der Abkühlstrecke eingestellt wird. Sind diese gelöst, ist der Nachpressdruck gering. Der Durchgangsquerschnitt sollte entlang der gesamten Abkühlstrecke gleich sein. Durch etappenweises Anziehen der Schrauben kann der Nachpressdruck während der Brikettierung angepasst werden. Bei Wassergehalten über 15% darf die Abkühlstrecke nicht montiert werden, da die Quellungskräfte der Briketts die Abkühlstrecke beschädigen. Bei unbekanntem Materialien oder undefinierten bzw. ungleichmäßigen Rohstoffen zur Brikettierung sollte ohne Abkühlstrecke brikettiert werden.



Abbildung 3-18: Standardabkühlstrecke an Brikettierung BrikStar C

3.5.2 Vorversuche

In den Vorversuchen zum Themenbereich Brikettierung wurde geklärt, ob das Obstholz mit der vorhandenen und in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Technik zu brikettieren ist. Weiterhin wurden erste Eigenschaften der Briketts erfasst.

Für die Vorversuche musste das mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Schnittholzsammler der Firma Kuhn gesammelte Obstholz aufbereitet werden, damit es den zulässigen Eingangsmaterialien zur Brikettierung entspricht. Dazu wurde das Schnittholz im ersten Schritt mit dem Scheibenradhacker der Firma Schliesing (Modell 350 Mx) zerkleinert. Anschließend wurden im zweiten Schritt die Holzhackschnitzel mit einer Trommelsiebanlage ausgesiebt. Zum Einsatz kam eine kompakte und in Kleinserie gefertigte Siebanlage von

Siebmax. Diese kann das Material in zwei Fraktionen trennen. Dazu wird das Material mit einem Förderband in die Siebtrommel eingetragen. Die Siebtrommel dreht sich und besitzt einen Lochdurchmesser



(Rundloch) von 12 mm. Durch ein spiralförmig

Abbildung 3-19: Trommelsieb, Typ Siebmax

eingeschweißtes Blech wird das Siebmaterial in 2,5 Umdrehungen durch die Siebtrommel geführt. Dabei fallen alle Teilchen mit einer Kantenlänge kleiner 12 mm durch das Sieb und werden mit einem Förderband unterhalb der Trommel ausgetragen. Das grobe Material wird bis an das Ende der Trommel geführt und dort ebenfalls per Förderband ausgetragen.

Das feine Material wird für die Brikettierung eingesetzt. Die Aufarbeitungsschritte des Zerkleinern und Sieben wurden vor allen Brikettierversuchen vergleichbar durchgeführt.

Bevor das Material in den Spänebehälter der Brikettierung eingefüllt wird, wurde der Wassergehalt mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Humimeter BLL ermittelt. Weiterhin

wurde die Standardabkühlstrecke abgebaut. Danach fand eine Probekriettierung des Obstschnittholz statt. Nach einigen hergestellten Briketts wurde die Abkühlstrecke wieder montiert und eine zweite Briettierserie angefertigt. Am darauffolgenden Tag wurde eine weitere dritte Serie mit angebauter Abkühlstrecke briettiert.

Nach der Herstellung der Briketts wurden diese zu den Parametern geometrische Abmessungen, Gewicht, Partikeldichte und die Trockenmasse untersucht. Die Bestimmung des Durchmessers und der Länge der Briketts erfolgte in drei Wiederholungen an jeweils 10 Presslingen jeder Serie mittels Schieblehre millimetergenau, nachdem die Briketts auf Raumtemperatur abgekühlt waren. Das Gewicht wurde mit einer Waage auf 1 g genau bestimmt.

Zur Partikeldichtebestimmung musste weiterhin das Volumen der Presslinge ermittelt werden. Aufgrund der rauen Oberfläche erschien die Volumenbestimmung über die geometrische Form der Briketts zu ungenau, weswegen das Volumen über die Wasserverdrängung (hydrostatische Methode) des Presslings bestimmt wurde. Dazu wird das Briett in einem bis zum Überlauf mit Wasser gefüllten Glaszylinder eingetaucht und das übertretende Wasser in einem Messbecher aufgefangen. Der Messbecher besitzt eine Auflösung von 20 ml, sodass das Volumen auf 20 ml genau gemessen werden konnte. Zur Herabsetzung der Oberflächenspannung wurde das Wasser mit einem Tensid versetzt. Falls der Pressling nicht selbstständig abtauchte, wurde dieser mit einem dünnen Draht, dessen Masse vernachlässigbar ist, untergetaucht. In einer Arbeit von RABIER ET AL. (2006) zur „Particle density determination of pellets and briquettes“ wurde die hydrostatische Methode, wie sie hier angewendet wurde, als Standardlabormethode vorgeschlagen. Die Volumenbestimmung erfolgte an jeweils 10 Briketts pro Serie. Aus dem Gewicht (m) und dem Volumen (V) wurde die Rohdichte (ρ) nach folgender Formel berechnet:

Formel 3-5: Berechnung der Partikeldichte (ρ) eines Briketts

$$\rho = \frac{m}{V} [g * cm^{-3}]$$

Dabei ist:

m = Masse [g],

V = Volumen [cm³].

Die Trockenmasse wurde in Anlehnung der beschriebenen DIN-Methode (DIN 14 774-2) mit dem Trockenschrank an weiteren 10 Briketts pro Serie bestimmt. Jeweils die restlichen 10 Briketts einer Serie wurden als Rückstellproben aufbewahrt.

3.5.3 Veränderung des Pressdrucks

Wie in Abschnitt 3.4.1 erklärt, kann der Pressdruck der Brikettierpresse verändert werden. Mit einer Steigerung des Pressdruckes nimmt die Rohdichte in gewissen Grenzen zu. Um dies zu untersuchen wurde der Pressdruck um 2 MPa auf 14 MPa erhöht. Mit der neuen Maschineneinstellung wurden zwei weitere Brikettierserien angefertigt und die Rohdichte nach dem in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Verfahren an jeweils 10 Presslingen pro Serie bestimmt. Die weiteren Maschineneinstellungen, die Abkühlstrecke und das Eingangsmaterial wurden dabei nicht verändert. Zur Kontrolle wurde zusätzlich vor der Dichtebestimmung die Ausdehnung der Briketts in ihrem Durchmesser an den 10 Proben durchgeführt. Weitere 10 Briketts pro Serie wurden als Rückstellproben aufbewahrt.

3.5.4 Energiebedarf für Brikettierung

Um den Energieaufwand für den Prozessschritt der Brikettierung zu quantifizieren wurde eine Leistungsmessung durchgeführt. Da die Maschine ihre Leistung über das Drehstromnetz bezieht, kann mit einem Energiemessgerät die Energieaufnahme gemessen werden. Für die Versuche stand ein Messgerät der Firma Fluke, bereitgestellt vom Institut für Landmaschinenteknik und Regenerative Energie der Fachhochschule Köln, zur Verfügung. Das Gerät „Power Logger 1735“ der Firma Fluke ist ein Messgerät für Spannungs-, Strom- und Netzuntersuchungen. Für den vorliegenden Versuch wurde der Energieverbrauch der Brikettierung am Drehstromnetz aufgezeichnet.

Für die Untersuchung ist es notwendig an den drei einzelnen Phasen (L1, L2 und L3) der Zuleitung der Brikettierung die Stromstärke und die Spannung zu messen. Um die Phasen zu vereinzeln, wird ein Phasensplitter zwischen die stromversorgende Steckdose und den Verbraucher geschaltet. In diesem sind die einzelnen Phasenkabel aufgelöst und für die Spannungsmessung Prüfbuchsen angebracht. In die Prüfbuchsen werden von dem Logger die Spannungsmessstecker eingesteckt. Die Stromstärke wird von Messzangen des

Prüfgerätes aufgezeichnet. Diese Zangen werden um die jeweilige Phase geklemmt. Werden die Phasen mit Strom beaufschlagt, induzieren diese ein magnetisches Feld, welches mit der entsprechenden Intensität aufgenommen und in einen Spannungswert umgewandelt wird. Das Messgerät misst in einem Zeitintervall von 0,5 Sekunden die beiden Messwerte Spannung (U) und Stromstärke (I). Zusätzlich wird die Frequenz des Stromnetzes aufgezeichnet. Die Wirkleistung (P) ist das Produkt aus der Spannung (U) und der Stromstärke (I). In mehrphasigen Stromnetzen, wie ein Starkstromanschluss es ist, muss bei der Berechnung der Leistung der Unterschied zwischen dem aufgenommenen Strom und der Netzspannung berücksichtigt werden. Dies wird durch die Phasenverschiebung als Winkel φ charakterisiert. Aus dieser Phasenverschiebung resultiert die Blindleistung. Aus den Ausführungen ergibt sich folgende Formel für die Leistung eines Drehstrommotors:

Formel 3-6: Berechnung der Wirkleistung im Drehstromnetz (HELU, 2012)

$$P = U * I * \cos \varphi [W]$$

Dabei ist:

P = Wirkleistung [W],

U = Spannung [V],

I = Stromstärke [A],

$\cos \varphi$ = Phasenverschiebung.

Um aus der Leistung den Energieverbrauch zu berechnen, muss die Leistung (P) über die Zeit integriert werden.

Mit dem Energiemessgerät wurden in drei Wiederholungen für jeweils ca. 10 Minuten die oben beschriebenen Werte an der Zuleitung der Brikettierung aufgenommen. Dabei wurden die Maschineneinstellungen, die Abkühlstrecke und das Eingangsmaterial aus dem in Kapitel 3.5.3 beschriebenen Versuch nicht verändert. Die Auswertung und Visualisierung der Messwerte fand mit der Analysesoftware Power Log 2.9.2 des Messgeräteherstellers statt.

3.5.5 Temperaturverlauf an Abkühlstrecke

Um die Auswirkungen der Abkühlstrecke genauer zu erforschen, wurden die Temperaturen an der Abkühlstrecke und am Presskanal der Brikettierung aufgenommen. Dazu wurden die Oberflächentemperaturen des Metalls und der Briketts am Presskanal und der Abkühlstrecke an fünf verschiedenen Stellen über einen Zeitraum von 70 Minuten erfasst. Der erste Messpunkt (M1) befand sich zwischen Stopfereinheit (11) und Klemmzylinder (10), der zweite (M2) am Ende des Presskanals, wo der Brikett in die Abkühlstrecke übergeht. An dieser Stelle wurde auch die Oberflächentemperatur der Briketts gemessen (BT1). An der Abkühlstrecke befanden sich drei weitere Messpunkte. Diese lagen 40 (M3), 70 (M4) und 100 cm (M5) hinter dem Übergangspunkt von Presskanal und Abkühlstrecke. Am Ende der Abkühlstrecke wurde beim Austritt der Briketts ein weiteres Mal die Oberflächentemperatur des Briketts erfasst (BT2).

Auch bei diesem Versuch wurden die Maschineneinstellungen, die Abkühlstrecke und das Eingangsmaterial aus dem in Kapitel 2.4.3 und 2.4.4 beschriebenen Versuch nicht verändert. Die Temperaturmessung fand mit einem Infrarot-Thermometer TP6 der Firma TroTec statt. Von dem Thermometer können die Werte direkt abgelesen und notiert werden. In den ersten 10 Minuten des Versuchs wurden alle 2 Minuten die Temperaturen an den oben beschriebenen Messstellen ermittelt. Von der 10.-20. Minute in 5 Minuten Intervallen und ab der 20. bis zur 70. im 10 Minuten Takt.

Durch die Erkenntnisse aus diesem Versuch wurde an einer Optimierung der Abkühlstrecke gearbeitet. Dazu wurde eine neue, aktive Abkühlstrecke durch die Werkstatt des Campus Klein-Altendorf gefertigt.

3.5.6 Brikettierqualität in Abhängigkeit der Bauform der Abkühlstrecke

Um die Frage erstmals zu klären, ob das Schnittholz aus dem Obstbau für die Brikettierung geeignet und wie hoch die Qualität dieser Briketts ist, wurde ein umfassender Versuch durchgeführt. Dabei kamen drei verschiedenen Ausgangsmaterialien und die verschiedenen Varianten mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke zum Einsatz. Die Brikettierung wurde

mit den bekannten Maschineneinstellungen betrieben. Anschließend wurden die hergestellten Briketts auf Qualitätseigenschaften untersucht.

Als Ausgangsmaterial wurde das bekannte Schnittholz aus dem Obstbau eingesetzt. Zum Vergleich wurde weiterhin aus Afrika stammendes Buschholz von verschiedenen *Acacia*-Arten und *Paulownia*-Holz verwendet, um die Effekte variierender Abkühlvarianten zu verdeutlichen. Akazien sind vor allem in tropischen und subtropischen Gebieten beheimatet und haben eine große Artenvielfalt. Es ist sehr witterungsbeständig und lagerstabil, weswegen es sich gut für Gartenmöbel, Terrassen oder Baumpfähle verwenden lässt. *Paulownia*, oder auch Blauglockenbaum genannt, ist eine in Europa bisher wenig bekannte sehr schnellwüchsige Pflanzengattung. Diese aus Ostasien stammende Pflanze wird als Zierbaum in Hausgärten oder als Baum zur Wert-, Industrie- oder Energieholzproduktion angepflanzt. Diese Ausgangsmaterialien wurden gewählt, da auch bei diesen das Interesse besteht sie zu kompaktieren und damit ihre Transportwürdigkeit für eine energetische Nutzung zu erhöhen. Alle Ausgangsmaterialien wurden nach den in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Methoden zerkleinert und gesiebt.

Anschließend wurden für die drei Materialien Siebkennlinien in Anlehnung der DIN 15 149-1-Feste Biobrennstoffe-Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erstellt. Dazu wurden die Proben durch horizontal angeordnete Rüttelsiebe gesiebt, wobei die Probenpartikel mechanisch in abnehmende Größenklassen sortiert werden. Die Siebe besitzen Rundlöcher. Es wurden 9 verschiedene Siebe mit folgenden Lochdurchmessern verwendet: 10,0; 8,0; 6,3; 5,0; 4,0; 3,15; 2,0; 1,0 und 0,63 mm. Der Feinanteil unter 0,63 mm wurde in einer Schüssel aufgefangen und als eigene Größenklasse gewogen. Auf jedes Sieb wurden jeweils fünf PVC-Kugeln gegeben, die das Probenmaterial auf dem Sieb während der Prüfung in Bewegung hielten. Damit wird der Aussiebeffekt maximiert. Jedes Sieb wurde mit den Kugeln leer gewogen und das Gewicht notiert. Danach wurden alle Siebe und Auffangschale übereinander gestapelt und in die Vibrations-Siebmaschine (Analysette 3 Pro) der Firma Fritsch gegeben. Auf das oberste Sieb wurde die Probe eingefüllt und mit einem Deckel verschlossen. Das Gerät schüttelt die Siebe in zweidimensionaler Richtung bei einer einzustellenden Frequenz. Es wurde pro Variante in jeweils acht Wiederholungen mit jeweils einem Probenvolumen von ca. einem Liter bei einer Amplitude von 1,8 mm gesiebt.

Anschließend wurde das Material auf den Sieben gewogen und das Gewicht für jede Größenfraktion notiert. Aus den Daten wurden Siebkennlinien für jedes Material erstellt.

Mit jedem Ausgangsmaterial wurde mit jeder Abkühlstrecke eine Serie von mindestens 50 Briketts gepresst. Dazu wurde die Brikettierung ohne bzw. mit der jeweiligen Abkühlstrecke ausgerüstet und mit Obstholz ca. 45 Minuten auf Betriebstemperatur gebracht. Die Temperatur wurde wie in Kapitel 3.5.5 beschrieben an der Messstelle M1 überwacht, bis diese konstant blieb. Weiterhin wurde die Oberflächentemperatur des Briketts an der Messstelle BT1 und bei der aktiven und passiven Abkühlstrecke auch die Temperatur BT2 gemessen. Die Temperaturmessungen wurden im Versuch, während der Brikettierung der Ausgangsmaterialien mit den verschiedenen Abkühlvarianten dokumentiert.

Die Qualitätsbeurteilung fand erst nach der Abkühlung der Briketts auf Raumtemperatur statt. Die neun Varianten wurden jeweils auf die Qualitätsparameter Wassergehalt, Aschegehalt, Brennwert, Abriebfestigkeit und Teilchendichte untersucht. Der Wassergehalt wurde in Anlehnung der DIN 14 774-2, der Aschegehalt nach DIN 14 775, der Brennwert nach DIN 14 918 mit den bereits beschriebenen Methoden untersucht. Dazu wurde aus den Briketts eines Eingangsmaterials aus den drei Abkühlstreckenvarianten eine Mischprobe erstellt. Für die Abriebfestigkeit wurde die DIN 15 210-2 „Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts – Teil 2 Briketts“ herangezogen. Nach der DIN 15 210-2 sollen die Briketts mit geregelten Stößen durch gegenseitiges Zusammenstoßen und Anstoßen an die Wände einer festgelegten rotierenden Prüfkammer ausgesetzt werden. Die mechanische Festigkeit wird aus der Masse der Probe berechnet, die nach der Abtrennung der abgeriebenen und fein zerkleinerten Partikel zurückbleibt. Da die geforderten technischen Messeinrichtungen für die Normmessungen nicht zur Verfügung standen, wurden die Untersuchungen in Anlehnung an die DIN 15 210-2 wie folgt durchgeführt: Als Prüfgerät wurde ein Trommelmischer, welcher aus dem Bauwesen bekannt ist, an die DIN Norm angepasst. Die Trommel zur Prüfung war eine zylindrisch, glatte Stahltrommel mit einem Durchmesser und einer Tiefe von 640 mm, sowie einer Umdrehungszahl von $28 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Mischbleche wurden aus der Trommel entfernt und durch ein nach DIN-Norm entsprechendes Prallblech ersetzt. Nach Norm sollen Proben mit einem Gesamtgewicht von $2 \pm 0,1 \text{ kg}$ in vier Wiederholungen geprüft werden. Dabei ist in der Norm vorgesehen, die Proben über 5 Minuten bei $21 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ rotieren zu lassen. Da die

Umdrehungszahl der verwendeten Messtrommel bei $28 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ liegt und der Durchmesser, damit auch der Fallweg der Briketts höher ist, wurde die Messzeit auf 3,5 Minuten verkürzt. Das Probengewicht und die Wiederholungsanzahl entsprachen der Norm. Nach der Messung wurde der gesamte Inhalt auf ein Sieb mit einer Maschenweite von 40 mm gegeben und der auf dem Sieb verbleibende Anteil auf 1 g genau gewogen. Die mechanische Festigkeit der Briketts ist anschließend nach folgender Formel berechnet worden:

Formel 3-7: Berechnung der mechanischen Festigkeit von Briketts nach DIN 15 210-2

$$DU = \frac{m_A}{m_E} * 100 [\%]$$

Dabei ist

DU = mechanische Festigkeit [%],

m_E = Masse der Briketts vor der Behandlung in der Trommel [g],

m_A = Masse der gesiebten Briketts nach der Behandlung in der Trommel [g].

Aus den Wiederholungen wurde jeweils der Mittelwert berechnet. Die Teilchendichte wurde nach der in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Methode ermittelt.

3.6 Statistische Auswertung

Die ermittelten Daten wurden mit der Software Microsoft Excel 2007 aufbereitet und die dazugehörigen Grafiken erstellt. Die statistische Auswertung, sowie die Erstellung der Boxplotdiagramme fanden mit der Analysesoftware IBM SPSS Statistics Version 20 statt. Mittels der Software wurden mit Hilfe des Tukey-HSD-Test eine einfaktorische ANOVA Analyse der Mittelwerte durchgeführt. Paarweise Vergleiche von Varianten wurden über einen Mittelwertvergleich (T-Test) getestet. Signifikanzen wurden mit einem Konfidenzintervall von 95% bzw. einem Signifikanzniveau von 0,05 ($\alpha \leq 0,05$) berechnet. Signifikante Unterschiede sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet bzw. beim Paarvergleich durch einen Stern. Die Wiederholungsanzahl je Variante jedes Versuchs wird mit „n“ unter den Abbildungen angegeben.

4. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zu den Themen Schnittholz, Rodungsholz, Trocknung und Brikettierung vorgestellt.

4.1 Schnittholz

4.1.1 Verbesserung der Auffangvorrichtung am Kuhn

Schnittholzsammler

Das gesammelte und zerkleinerte Schnittholz besitzt nach der Bergung einen hohen Wassergehalt. Die Notwendigkeit einer Trocknung des Materials ist gegeben. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben eignet sich die originale Bunkervorrichtung des Kuhn Schnittholzsammlers nur bedingt. Das Sammelgut kann in den Nylonsäcken nur äußerst schlecht abtrocknen, da keine natürliche Luftzirkulation und damit nur eine sehr geringe Konvektion stattfinden. Dadurch kommt es zu einer starken Erwärmung und Verpilzung des Festbrennstoffs mit den Folgen eines Biomasse- und Brennwertverlustes. Weiterhin sind die Nylonsäcke in Obstbaubetrieben wenig verbreitet und müssen zugekauft werden.

Aufgrund der dargestellten Nachteile wurde die Bunkervorrichtung des Kuhn Schnittholzsammlers auf ein Großkistensystem umgebaut. Großkisten sind zur Lagerung von Obst im Erwerbsobstbau Standard. In diese werden im Herbst die geernteten Früchte eingelagert. Die Großkisten, welche aus einer Palette und einem Holzrahmen gefertigt sind, stehen dem Obstbauer im Frühjahr zur Schnittholzsammlung zur Verfügung, da dieser zwischen der Obsternte und dem Frühjahr das Obst zum großen Teil vermarktet hat.



Abbildung 4-1: Modifizierte Bunkereinrichtung für Großkisten des Kuhn-Schnittholzsammlers (Bildquelle: AUMÜLLER GRUBER, 2012);
1: Großkistenaufnahme; 2: Streben

Technisch wurde die Umrüstung umgesetzt, in dem ein zweiter Rahmen (1) (Abbildung 4-1) an die bereits bestehende Bunkervorrichtung montiert wurde. Dieser wurde so konstruiert, dass die Großkiste genau darauf gestellt werden kann. Da die Bunkervorrichtung im Original ebenfalls hydraulisch in vertikaler Richtung bewegt werden kann, ist die Großkiste während der Schnittholzbergung bis unter den Auswurfkanal vom Zerkleinerungsorgan zu heben. Die Großkistenaufnahme wurde durch zwei Streben (2) mit der vorhandenen Bunkereinrichtung verbunden, um das Gewicht der gefüllten Großkiste abzufangen. Ist die Kiste gefüllt, wird diese heruntergelassen und von einem Gabelstapler oder Schlepper mit Frontlader abgeladen und eine neue Kiste auf den Rahmen gestellt. In der zweijährigen Testphase bewies diese Konstruktion ihre Einsatztauglichkeit.

4.1.2 Schnittholzmengenerträge

In dem Versuch wurde die Erträge an Schnittholz in vier verschiedenen Apfelplantagen zwischen 2010 und 2012 mit dem Kuhn Schnittholzsammler erfasst. Das Schnittholz wurde nach dem jährlich durchgeführten Ertragsschnitt gesammelt und die Frischmasse (FM) bestimmt.

Alle vier Varianten zeigten keine signifikanten Unterschiede. Auch die Variante Sortenmix, welche sich erst im 5. Standjahr befand, hat im Mittel nur einen tendenziell geringeren Frischmasseertrag mit 1.850 kg*ha^{-1} . Die älteren Sortenvarianten liegen im Durchschnitt mit ca. 100 kg*ha^{-1} über dem Biomasseanfall des Sortenmix.

Tabelle 4-1: Schnittholzmengen aus dem Schnittholz sammelversuch (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=6$)

Sorte	Alter der Plantage im Versuchsjahr	Schnittholzmenge FM [kg*ha^{-1}]		
Jonagold 2010	12	1.943	± 510	n.s.
Jonagold 2011	13	1.935	± 388	n.s.
Jonagored 2012	14	1.970	± 300	n.s.
Sortenmix 2012	5	1.850	± 139	n.s.

(FM = Frischmasse; \pm Wert = Standardabweichung; n.s. nicht signifikant)

Ein Vergleich bezogen auf die Frischmassen ist nur sehr eingeschränkt aussagekräftig. Ein Vergleich der Trockenmasseerträge liefert detaillierte Aussagen, da der Wassergehalt der Biomasse von Jahr zu Jahr schwanken kann.

Die Varianten unterschieden sich im **Wassergehalt** voneinander. Dabei hatte die Variante Jonagold im Jahr 2011 den signifikant geringsten Wassergehalt von 35,50%. Den höchsten Wassergehalt wiesen die Variante Jonagold 2010 mit 40,33% und der Sortenmix aus 2012 mit 40,17% auf. Diese unterschieden sich signifikant von den anderen beiden Varianten, jedoch konnten untereinander keine statistisch abgesicherten Unterschiede ermittelt werden. Die Variante Jonagored 2012 lag mit 37,17% im Mittelfeld und unterschied sich ebenfalls signifikant von allen anderen Varianten. Die Ergebnisse können aus der Abbildung 4-2 entnommen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten beginnt die Ordinatenachse bei 33% Wassergehalt.

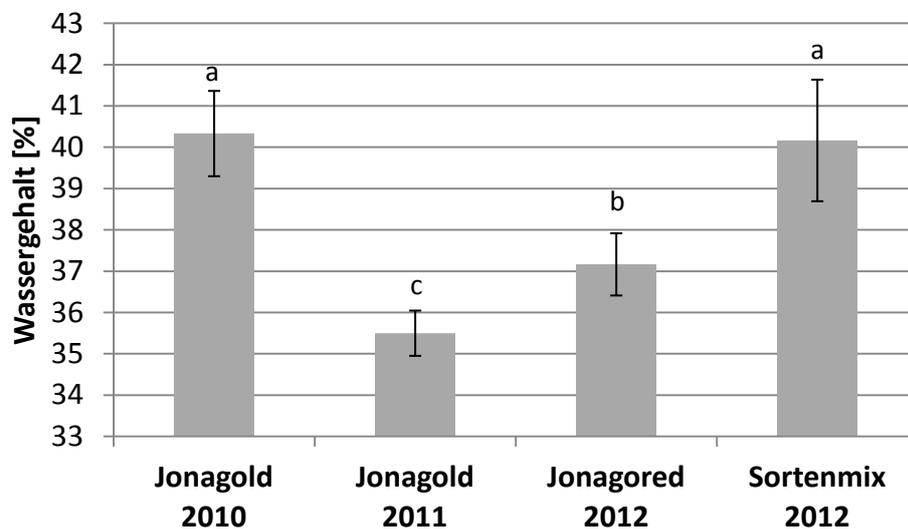


Abbildung 4-2: Wassergehalte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 33% (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Aus den Frischmasseerträgen und dem ermittelten Wassergehalt wurde der **Trockenmasseertrag** pro Hektar errechnet. Auch im Trockenmasseertrag zeigte die Variante Sortenmix 2012 mit 1.104 kg*ha^{-1} tendenziell die geringsten Biomasseerträge. Die Variante Jonagold 2010 wies im Trockenmasseertrag pro Hektar durch einen höheren Wassergehalt einen nur geringfügig stärkeren Ertrag als der Sortenmix 2012 auf, obwohl die Variante Jonagold 2010 zum Versuchszeitpunkt bereits im 12. Standjahr stand. Die Varianten Jonagold 2011 im 13. Standjahr und die Variante Jonagored 2012 im 14. Standjahr zeigten einen Mehrertrag von fast 150 kg*ha^{-1} im Vergleich zum Sortenmix 2012. Alle Trockenmasseerträge vom Apfelschnittholz unterschieden sich nicht signifikant untereinander. Der mittlere Trockenmasseertrag aller vier Varianten liegt bei 1.186 kg*ha^{-1} . Somit kann der zu erwartende Trockenmasse-Schnittholzertrag eines Obstbaubetriebes aus Apfelplantagen in der Ertragsphase (siehe dazu Abbildung 2-5) im Mittel mit $1,2 \text{ t*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$ angegeben werden. Tabelle 4-2 zeigt nochmal alle Trockenmasseerträge pro Hektar übersichtlich aufgelistet.

Tabelle 4-2: Trockenmasseerträge aus dem Schnittholzammelversuch (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Sorte	Alter der Plantage im Versuchsjahr [a]	Schnittholzmenge TM [kg*ha^{-1}]		
Jonagold 2010	12	1.155	± 284	n.s.
Jonagold 2011	13	1.248	± 247	n.s.
Jonagored 2012	14	1.238	± 181	n.s.
Sortenmix 2012	5	1.104	± 60	n.s.

(TM = Trockenmasse; \pm Wert = Standardabweichung; n.s. nicht signifikant)

4.1.3 Brennstoffeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu den Brennstoffparametern Aschegehalt, Brennwert und die elementare Zusammensetzung vom Schnittholz vorgestellt.

Der **Aschegehalt** aller Wiederholungen der vier Varianten (Jonagold 2010, Jonagold 2011, Jonagored 2012, Sortenmix 2012) lag zwischen 3,83 und 4,84%. Zwischen den untersuchten Varianten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Varianten Jonagored 2012 und Jonagold 2011 wiesen in den Mittelwerten den höchsten Aschegehalt mit 4,30% bzw. 4,27% auf. Der Sortenmix aus 2012 lag mit 4,16% anorganischem Rückstand im Mittelfeld. Den tendenziell geringsten Aschegehalt wies die Variante Jonagold 2010 mit 3,94% auf.

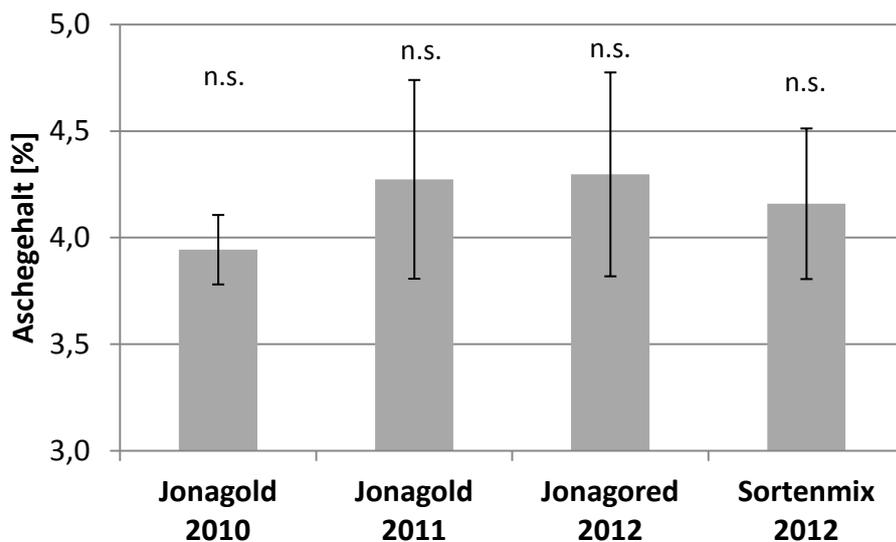


Abbildung 4-3: Aschegehalte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatensachse schneidet die Abszisse bei 3% (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Auch im **Brennwert** unterschieden sich die vier Varianten nicht signifikant voneinander. Der tendenziell höchste Brennwert konnte in der Variante Sortenmix 2012 im Mittel von $19,14 \text{ MJ*kg}^{-1}$ gemessen werden. Die Varianten Jonagold 2011 und 2010 wiesen mit $18,95$ und $18,94 \text{ MJ*kg}^{-1}$ kaum Unterschiede auf. Der tendenziell geringste Brennwert konnte in der Variante Jonagored 2012 mit $18,72 \text{ MJ*kg}^{-1}$ ermittelt werden. Auffällig bei den Ergebnissen ist, dass die Standardabweichung mit steigendem Brennwert kleiner wird. In der Variante Sortenmix lag diese bei $0,13 \text{ MJ*kg}^{-1}$, in Jonagold 2010 bei $0,18 \text{ MJ*kg}^{-1}$, Jonagold 2011 bei $0,23 \text{ MJ*kg}^{-1}$ und in Jonagored 2012 bei $0,36 \text{ MJ*kg}^{-1}$.

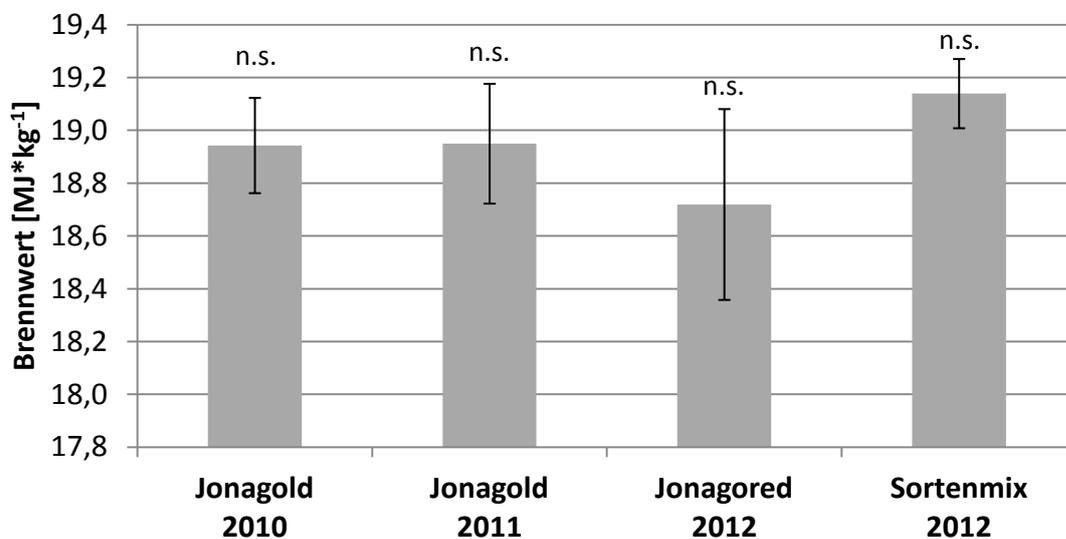


Abbildung 4-4: Brennwerte der vier Schnittholzvarianten. Ordinatensachse schneidet die Abszisse bei $17,8 \text{ MJ*kg}^{-1}$ (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Die quantitative **elementare Zusammensetzung** vom Schnittholz der Variante Sortenmix 2012 ergab folgende Inhaltsstoffe:

Tabelle 4-3: Elementaranalyse von Schnittholz auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)

C	N	S	Cl	K	Mg	Ca	Cu	Fe	Zn
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mg*kg ⁻¹]	[mg*kg ⁻¹]	[mg*kg ⁻¹]
46,404	0,833	0,069	< 0,010	0,409	0,126	1,029	10,83	401,31	17,35

Für das Schnittholz konnte ein Kohlenstoffanteil von 46,404% nachgewiesen werden. Im Vergleich zum Kohlenstoffgehalt sind die analysierten Hauptelemente Stickstoff, Schwefel, Chlor, Kalium, Magnesium und Calcium nur in geringen Prozentanteilen vertreten, haben jedoch eine größere Bedeutung in der thermochemischen Umwandlung von Biomassen.

Der Stickstoffanteil konnte mit 0,833% der Trockenmasse, der Schwefelgehalt mit 0,069% und der Anteil an Kalium mit 0,409% analysiert werden. Für das Element Chlor wurde die Nachweisgrenze im Ionenchromatographen unterschritten, sodass dieser Anteil nur mit < 0,010% angegeben werden kann. Die Hauptelemente Magnesium und Calcium, die einen Einfluss auf das Ascheerweichungsverhalten und die Einbindung von Schadstoffen in die Asche haben, konnte mit 0,126 bzw. 1,029% der Trockenmasse nachgewiesen werden.

Neben den Hauptelementen wurde das Schnittholz auf die metallischen Spurenelemente Kupfer, Eisen und Zink untersucht. Eisen ist mit 401,31 mg*kg⁻¹, was einem prozentualen Anteil von 0,040% entspricht, in der Biomasse enthalten. Zink und Kupfer sind mit 17,35 mg*kg⁻¹ (0,002%) bzw. 10,83 mg*kg⁻¹ (0,001%) nachgewiesen worden.

4.1.4 Arbeitsqualitätsfaktoren der Schnittholzammeltechnik

Ziel der Schnittholzammeltechnik ist, neben den phytosanitären Vorteilen, die Biomasse als Brennstoff in Feuerungsanlagen einsetzen zu können. Um Anlagen auf dieses Material auslegen zu können, bzw. Aussagen über die Eignung des Materials für eventuell vorhandene Heiztechnik treffen zu können, ist die Längenverteilung des gesammelten Schnittholzes ein wichtiger Faktor. Diese Korngrößenverteilung wird durch das in den Schnittholzsammlern verbaute Zerkleinerungsorgan bestimmt. Weiterhin sind für die Brennstoffqualität die aufgenommenen Nicht-Holz-Bestandteile (Gras, Moos und Blätter) entscheidend und wurden zusammen mit der Korngrößenverteilung aufgenommen.

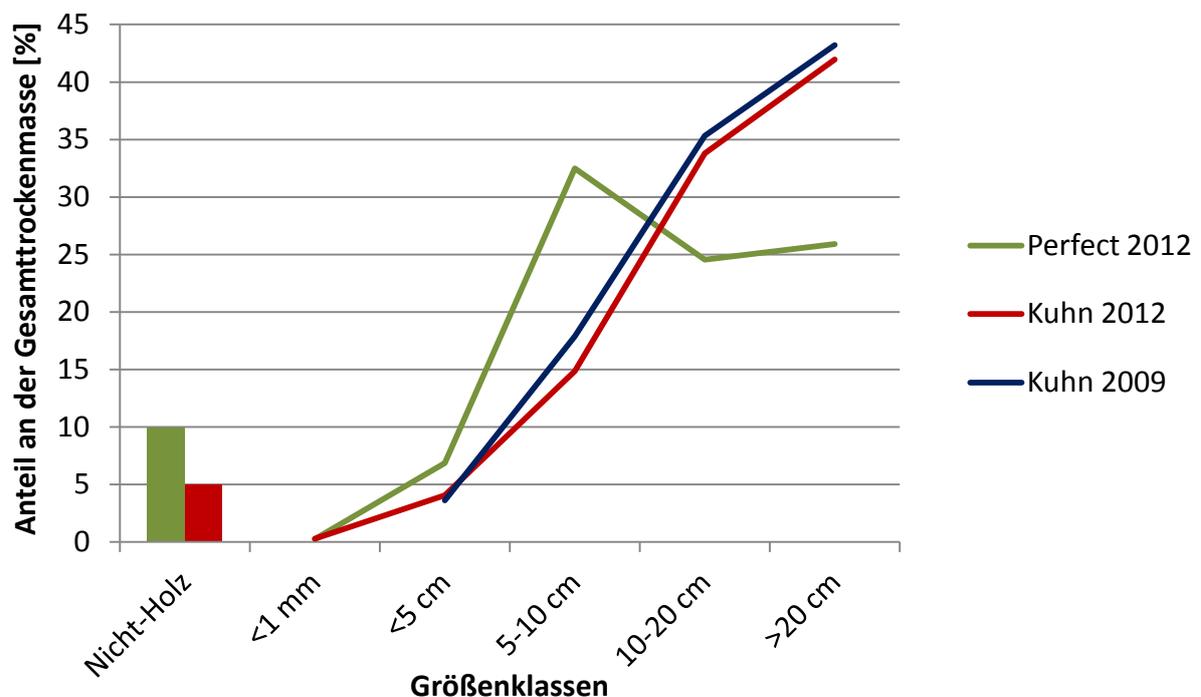


Abbildung 4-5: Längenverteilung der gesammelten Schnittholzbiomasse mit der untersuchten Bergetechnik (n=3)

Zunächst ist aus der Abbildung 4-5 ersichtlich, dass die Varianten, die mit dem Kuhn Schnittholzsammler in den Jahren 2009 und 2012 gesammelt wurden, sich kaum unterscheiden. Da es sich um das identische Gerät und damit um das gleiche Zerkleinerungsorgan handelt, sowie an beiden Terminen Schnittholz aus Apfelplantagen gesammelt wurde, ist eine ähnliche Korngrößenverteilungen zu erwarten. Der Graph der

Variante Kuhn 2009 liegt leicht über dem der Variante aus 2012, da bei dieser die Größenklassen <1 mm und Nicht-Holz nicht aufgenommen wurden und damit sich die Relation zur Gesamtmasse verschiebt. Weiterhin ist ersichtlich, dass sich ein Großteil der Schnittholzstücke beim Kuhn Gerät in der Größenklasse >20 cm befinden. Der Anteil dieser Klasse liegt in den Kuhn Varianten mit 41,96 bzw. 43,20% bei fast der Hälfte der Gesamtmasse. Auch die Größenklasse mit Holzstücken zwischen 10 und 20 cm ist mit 33,80 bzw. 35,31% der Gesamtmasse deutlich vertreten. Die Größenklassen <5 cm und von 5-10 cm besitzen nur einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtmasse. Dagegen weist die Längenverteilung des Perfect Mäh-Ladewagen einen Peak in der Größenklasse 5-10 cm mit 32,48% der Gesamtmasse auf. Ein Massenanteil von 50,46% entfällt auf die Größenklassen 10-20 cm und der >20 cm. Daraus ist zu entnehmen, dass bei dem Perfect Gerät das Material stärker zerkleinert wird.

Problematisch für die Brennstoffzuführung von Biomasseheizanlagen sind Holzstücke, die in ihrer Länge deutlich vom Rest des Materials nach oben abweichen („Ausreißer“). Diese können in der Zuführung zu Problemen führen. Beim Kuhn Schnittholzsammler konnten 22 Holzstücke mit einer Länge über 25 cm und 3 Stücke mit einer Länge über 35 cm gemessen werden. Die maximale Länge eines Holzstückes lag bei 46 cm. Beim Perfect Mäh-Ladewagen konnten dagegen nur 9 Stücke über 25 cm und keine über 35 cm festgestellt werden. Der Extremwert lag bei dem Perfect Gerät bei 34 cm.

Der Anteil der Größenklasse <1 mm ist bei beiden Geräte in allen Varianten gering. Bei dem Kuhn Gerät liegt diese Größenklasse mit 0,0029% und bei der Perfekt Technik mit 0,0025% auf einem vernachlässigbar niedrigen Niveau.

Einen Unterschied weisen beide Maschinen im Bereich der Nicht-Holz Bestandteile auf. Die gesammelte Biomasse, die mit dem Perfect Mäh-Ladewagen geborgen wurde, besteht zu 9,94% der Gesamtmasse aus Nicht-Holz Bestandteilen. Dagegen weist die Biomasse des Kuhn Schnittholzsammlers nur einen Anteil von 5,04% in dieser Klasse auf. Damit sind die Anteile von Blättern, Gras und Moos bei dem Perfect Gerät doppelt so hoch, wie bei der Kuhn Technik.

Als weiterer Arbeitsqualitätsfaktor wurde der Einfluss der Zapfwelldrehzahl auf die Zerkleinerungsintensität untersucht. Dieser Versuch konnte aus technischen Gründen (siehe dazu auch Kapitel 3.2.1) nur mit dem Kuhn Schnittholzsammler durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass die Korngrößenverteilung bei beiden Varianten ebenfalls sehr ähnlich ausfällt.

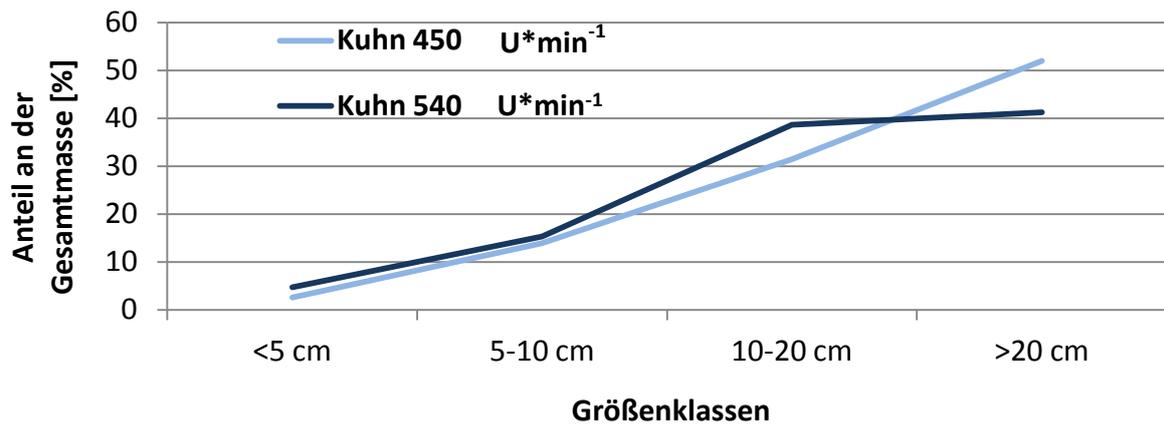


Abbildung 4-6: Einfluss der Zapfwelldrehzahl (Kuhn 450 = 450 U*min⁻¹; Kuhn 540 = 540 U*min⁻¹ Zapfwelldrehzahl) auf die Korngrößenverteilung von gesammeltem Schnittholz (n=2)

Wird die Zapfwelldrehzahl von 450 auf 540 U*min⁻¹ erhöht, sinkt der Anteil in der Größenklasse >20 cm leicht ab und der der Größenklasse 10-20 cm steigt leicht an. Auch der Anteil der Größenklasse <5 cm und 10-20 cm nimmt leicht zu. Dies bedeutet, dass die Zerkleinerungsintensität mit zunehmender Zapfwellenumdrehzahl und damit steigender Rotorgeschwindigkeit zunimmt.

Als letzter Arbeitsqualitätsfaktor wurde der Massenverlust erfasst, der von den Schnittholzsammlern der Firmen Perfect und Kuhn in den Obstplantagen zurückgelassen wurde. Dies bedeutet, dass Schnittholz von der Aufsammeleinrichtung bzw. dem Zerkleinerungsorgan nicht erfasst wurden und so in der Plantage verblieb. Aus der Abbildung 4-7 kann entnommen werden, dass der Massenverlust bei beiden Geräten gering ausfiel. Bei dem Schnittholzsammler der Firma Kuhn wurden im Mittel 1,1% der Schnittholzbiomasse in der Obstplantage nicht geborgen. Bei dem Mäh-Ladewagen wurde ein Verlust von 2,1% ermittelt. Beide Varianten unterscheiden sich signifikant voneinander. Weiterhin ist die Standardabweichung bei dem Perfect Gerät mit 0,44% größer als bei dem Schnittholzsammler von Kuhn (0,21%).

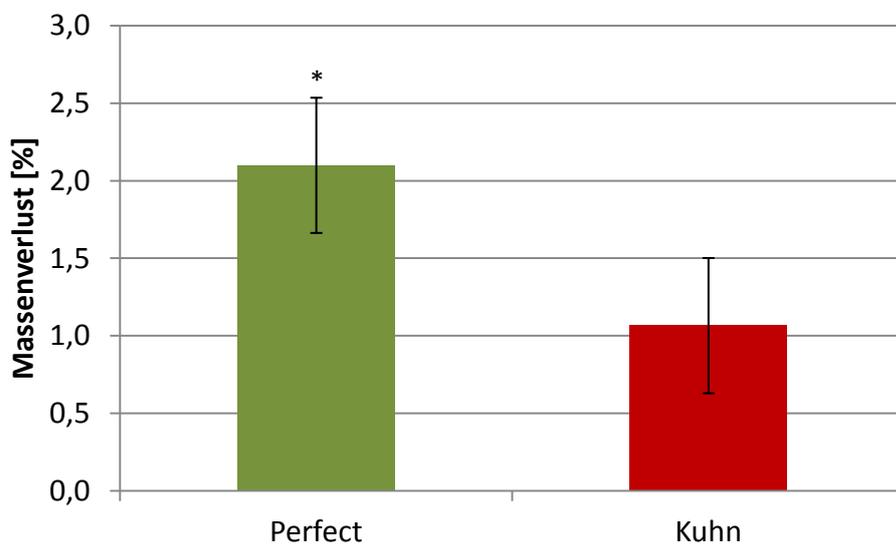


Abbildung 4-7: Biomasseverluste, die von den getesteten Schnittholzsammlern in der Obstplantage nicht erfasst wurden (Signifikanzen: T-Test, $\alpha \leq 0,05$, $n=3$)

4.2 Rodungsholz

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse zum Themenbereich Rodungsholz aus Baumobstplantagen vorgestellt. Vor der quantitativen und qualitativen Bewertung des Rodungsholzes wird der Einfluss von Holzbeimischungen in den Ackerboden, wie durch herkömmliche Rodeverfahren verursacht, beschrieben.

4.2.1 Einfluss von Holzbeimischungen in den Ackerboden auf die Keimrate von Kressesamen

Der Bioindikatorentest zeigte bereits eine Woche nach dem Ansetzen der Boden-Holz-Mischungen und der ersten Aussaat der Kresse Unterschiede in der Keimrate in Abhängigkeit von Holzbeimischungen (Abbildung 4-8).

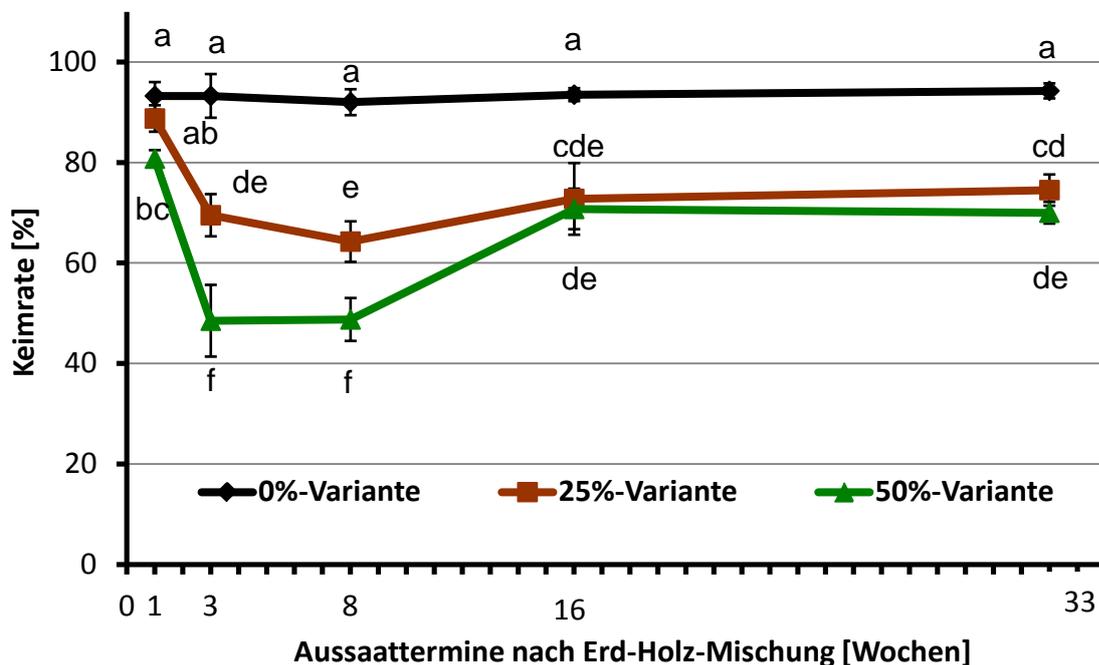


Abbildung 4-8: Einfluss von Apfelholzbeimischung (25 und 50% im Vergleich zur 0-Variante) in einen Ackerboden auf die Keimraten von Kresse. Geprüft mit einem Bioindikatorentest (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=4$)

Bei der 0-Variante keimten im Mittel 93,2% der Kressesamen, wogegen in der 25%-Variante 88,7% und in der 50%-Variante nur 80,7% der Keimlinge aufliefen. Drei Wochen nach Versuchsbeginn mit der zweiten Aussaat sank die Keimrate in der 25%-Variante auf 69,5% und in der 50%-Variante auf 48,5% ab. Die Kontrolle wies dieselbe mittlere Keimrate von 93,2% auf und blieb während der gesamten Versuchszeit auf einem hohen Niveau zwischen 92 und 94% bei gleichzeitig niedriger Standardabweichung. Zum dritten Bioindikatorentest, der acht Wochen nach der Boden-Holz-Mischung ausgesät wurde, konnte ein weiteres Absinken der Keimrate in der 25%-Variante auf 64,2% festgestellt werden. In der 50%-Variante blieb die Keimrate mit 48,7% auf einem konstant niedrigen Wert. Nach weiteren 8 Wochen stiegen die Keimraten der 25%- und 50%-Variante auf 72,8 bzw. 70,8% an, lagen aber noch deutlich unter der 0-Variante. In der 33. Woche nach Mischung des Bodens mit Holz blieb die Keimrate des Bioindikatorentest in der 25%- und 50%-Variante nahezu konstant bei 74,5 bzw. 70%. Während des gesamten Versuchs unterschieden sich die Keimraten der 25%- und 50%-Variante im Vergleich zur 0-Variante signifikant.

4.2.2 Rodeverfahren RB 60 Klein-Altendorf

Das Rodeverfahren RB 60 bewies, in der ersten Version der Firma Dröppelmann Agrartechnik, eine generelle Einsatztauglichkeit. Die Apfelbäume der Parzelle H2 am Campus Klein-Altendorf auf der Unterlage M9 im 11. Standjahr konnten mit Wurzel und Pfahl aus dem Erdreich geborgen werden. Auch die Birnenplantage (H1), welche im 24. Standjahr auf der schwachwachsenden Unterlage Quitte C stand, konnte mit dem RB 60 gerodet werden. Als problematisch erwiesen sich während der ersten Versuche zum einen die Ablage der gerodeten Obstbäume, sowie ein noch erheblicher Erdanhang an den Wurzeln der Bäume. Aufgrund dessen wurden an Verbesserungen der mittels Exzenter angetriebenen Siebfläche und der Leiteinrichtung zur Führung der Bäume während des Rodevorgangs gearbeitet. Die technischen Veränderungen führten zu einer neuen Version des Rodepflugs. Die Umsetzung der Neuentwicklung wurde von der Werkstatt am Campus Klein-Altendorf durchgeführt, sodass ein konkretes Baumuster entstand. Die Neuerungen wurden anschließend durch die wissenschaftliche Werkstatt des Instituts für Landtechnik Bonn in technischen Zeichnungen mit dem Programm AutoCAD festgehalten. Auf der Praxisversuchsfläche Dick 10 wurden einzelne Veränderungsschritte getestet und zur Weiterentwicklung genutzt.

Zunächst soll mit der Abbildung 4-9 eine Übersicht der neu entwickelten Baugruppe des Rodepflugs gegeben werden. Abgebildet sind das U-förmige Unterschneidemesser (1), der Siebrost (2) und die Leiteinrichtung (3).

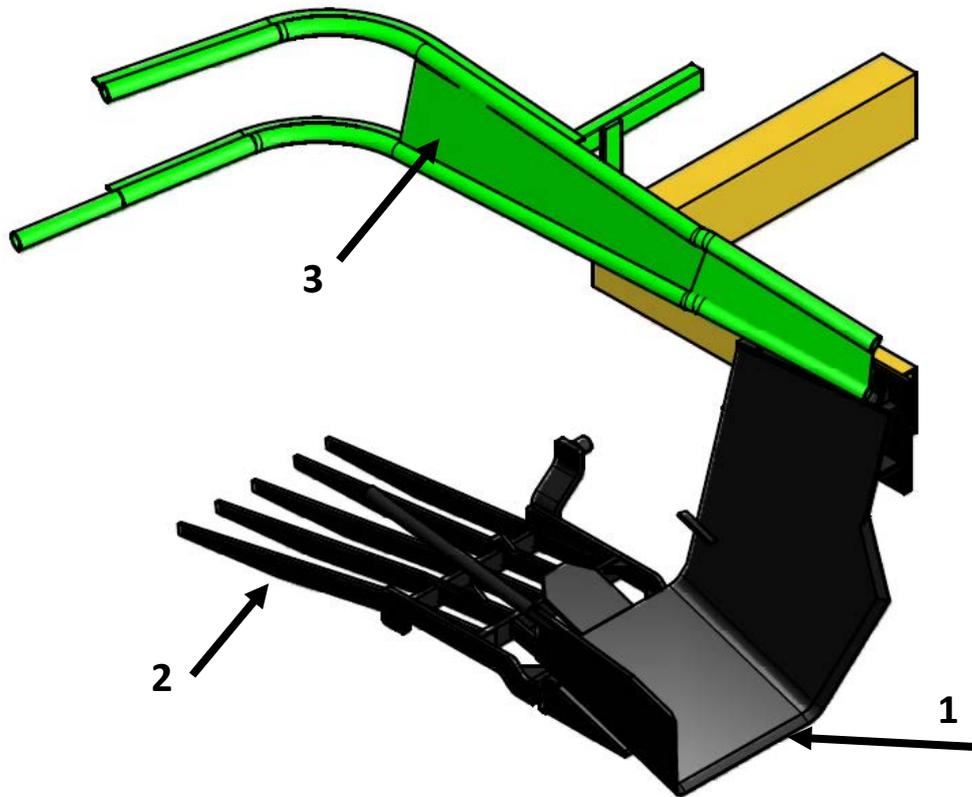


Abbildung 4-9: Baugruppe Rodepflug RB 60 (Stand 2012); 1: Unterschneidemesser; 2: Siebfläche; 3: Leiteinrichtung (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)

Im ersten Schritt der Verbesserung am Rodepflug wurde der Siebrost neu konzipiert. Dazu wurde die alte Siebfläche komplett aus dem Rahmen der Siebeinrichtung, der durch den Exzenter horizontal angetrieben wird, herausgetrennt. Die neuen Siebstäbe wurden ebenfalls als Flachstähle ausgeführt und fächerförmig angeordnet, damit der Erdstrom auseinandergezogen und so die Erdabsiebung maximiert wird. Die Flachstähle wurden im Bezug zur ersten Version ca. 150 mm länger ausgeführt, damit der Baum die Siebfläche später verlässt und somit mehr Exzenterstöße pro Baum bei der Rodung auf die Wurzel einwirken. Zusätzlich wurden auf der Siebfläche zwei Flachstähle in dreieckiger Form aufgebracht, um den Erdstrom anzureißen und so die Absiebung zu verbessern. Aus demselben Grund wurden an den Seiten des Unterschneidemessers zwei Flachstähle in rechteckiger Form angebracht.

Weiterhin wurde während der ersten Praxisversuche festgestellt, dass das abgewinkelte Endstück der Siebstäbe in Richtung des Ackerbodens der ursprünglichen Bauform ein abkippen der Bäume in Fahrtrichtung nach hinten nicht begünstigte. Deswegen wurden in der neuen Bauform die Siebstäbe auf der gesamten Ebene nach hinten abfallend ausgeführt. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die Siebroste in der ersten (Abbildung 4-10) und in der optimierten Bauform (Abbildung 4-11) im Vergleich.



Abbildung 4-10: Siebrost von Rodepflug RB 60 in der ersten Bauform (Bildquelle: DRÖPELMANN, 2010)

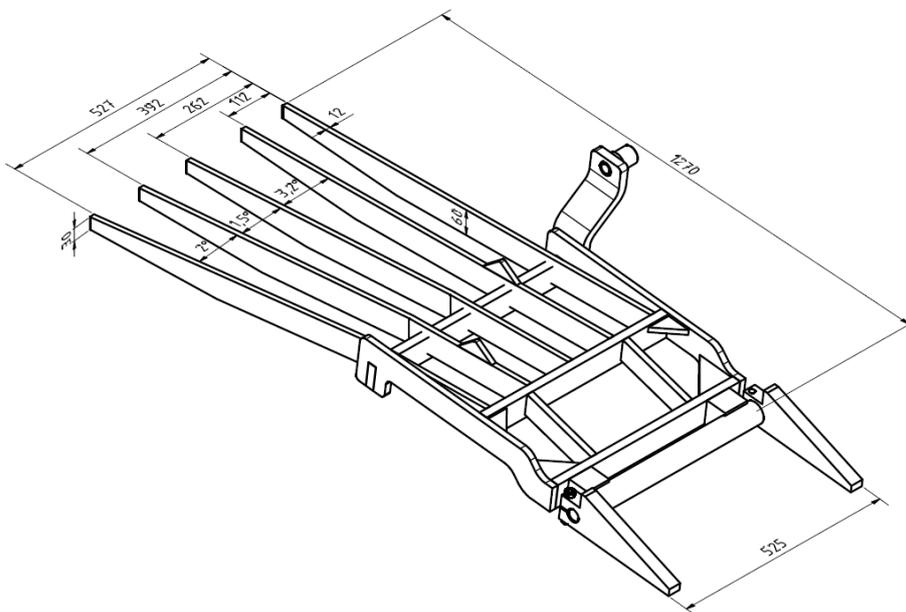


Abbildung 4-11: Siebrost von Rodepflug RB 60 in der optimierten Bauform mit Bemaßung (Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)

Da die Neigung der Siebfläche zur alleinigen Lenkung der Fallrichtung der Bäume nach dem Roden nicht ausreicht, wurde die Leiteinrichtung am Rodepflug verbessert. Die Leiteinrichtung der ersten Bauform war lediglich mit zwei geraden Rohren versehen, die ein

abkippen der gerodeten Bäume auf den Rodepflug verhinderten (Abbildung 3-10). Ziel war es jedoch, die gerodeten Bäume reihensenkrecht abzulegen, da aus dieser Ablage eine weitere Aufnahme und Abtransport der Bäume im Rahmen der Weiterverarbeitungskette (Kapitel 3.3.3) erleichtert wird. Weiterhin dient die Leiteinrichtung dazu, die Bäume während des Absiebvorgangs auf der Siebfläche zu halten, um so einen undefinierten Austritt der Bäume aus dem Rodeaggregat zu unterbinden. Daher wurde die Leiteinrichtung neu konstruiert.

Die Leiteinrichtung wurde in Form von zwei Rohren ausgeführt, die in Fahrtrichtung nach rechts gebogen sind. Diese sind am Hauptrahmen des Rodepflugs angeschlagen und über drei Haltepunkte fixiert. Untereinander sind die Rohre über ein Blech verbunden, welches ein Verhaken von Ästen der Bäume am Rahmen oder der Leiteinrichtung verhindert. Ab der Biegung sind die Leitrohre ohne Verbindung. Dafür wurden diese von der Rückseite mit einem Flachstahl verstärkt, um die auftretenden Kräfte abzufangen. Die Leiteinrichtung ist zunächst ab dem Unterschneideschar ansteigend und ab der Biegung mit einer negativen Steigung ausgeführt. Dies hat zur Folge, dass die Bäume durch ihre Seitenäste, die auf den Rohren geleitet werden, eine Zwangsführung bekommen. Dabei wird der Baum mit Wurzelwerk auf dem Siebrost gehalten. Weiterhin ist das obere Leitrohr in Fahrtrichtung nach hinten versetzt, um eine rückwärtige Lage der Bäume zu erreichen. Damit wird ein nach vorne Fallen der Bäume in die noch zu rodenden Baumreihe verhindert. Das untere Rohr der Leiteinrichtung ist um 300 mm im Vergleich zum oberen verlängert, wodurch der Baum kurz vor dem Austritt aus dem Rodepflug in die fast reihensenkrechte Ablage geführt wird. Als weitere Leiteinrichtung wurde ein Rohr von 677 mm an dem Unterschneidmesser in Fahrtrichtung rechts angebracht. Damit wird sichergestellt, dass der Baum mit Wurzel und anhaftenden Erdreich auf die Siebeinrichtung geführt wird und nicht direkt seitlich aus der Maschine fällt. Die Ausführung der Leiteinrichtung mit Bemaßung kann aus den Abbildungen 4-12 und 4-13 entnommen werden. Weitere Detailzeichnungen des Rodepflugs, sowie Zeichnungen aus verschiedenen Perspektiven mit den Bemaßungen sind dem Anhang der vorliegenden Arbeit angefügt. Grenzen des Rodeverfahrens können ebenfalls benannt werden. Bei großkronigen und im starken Habitus stehende Obstbäume können nicht gerodet werden. So konnten Quittenbäume auf der Unterlage Quitte A im 7. Standjahr nicht ohne Beschädigungen des Roders RB 60 gerodet werden. Dagegen war eine Bergung von Holunderbäumen auf eigener Wurzel im 9. Standjahr möglich.

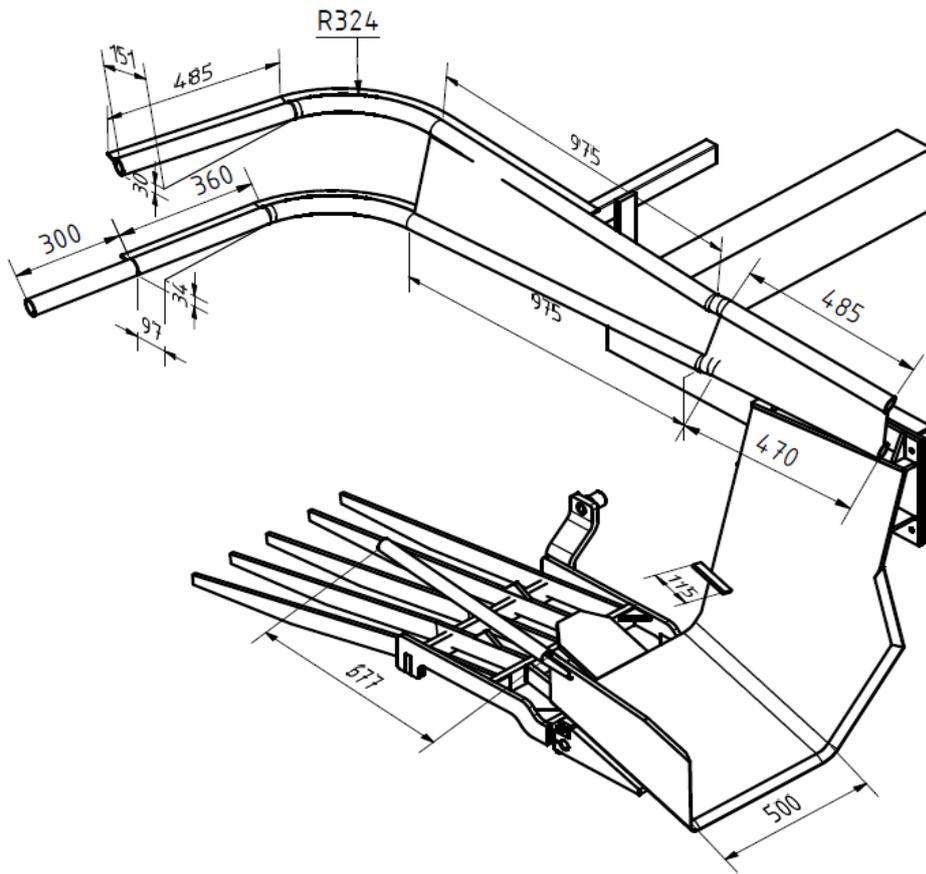


Abbildung 4-12: Baugruppe Rodepflug RB 60 mit Bemaßung der Leiteinrichtungen
(Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)

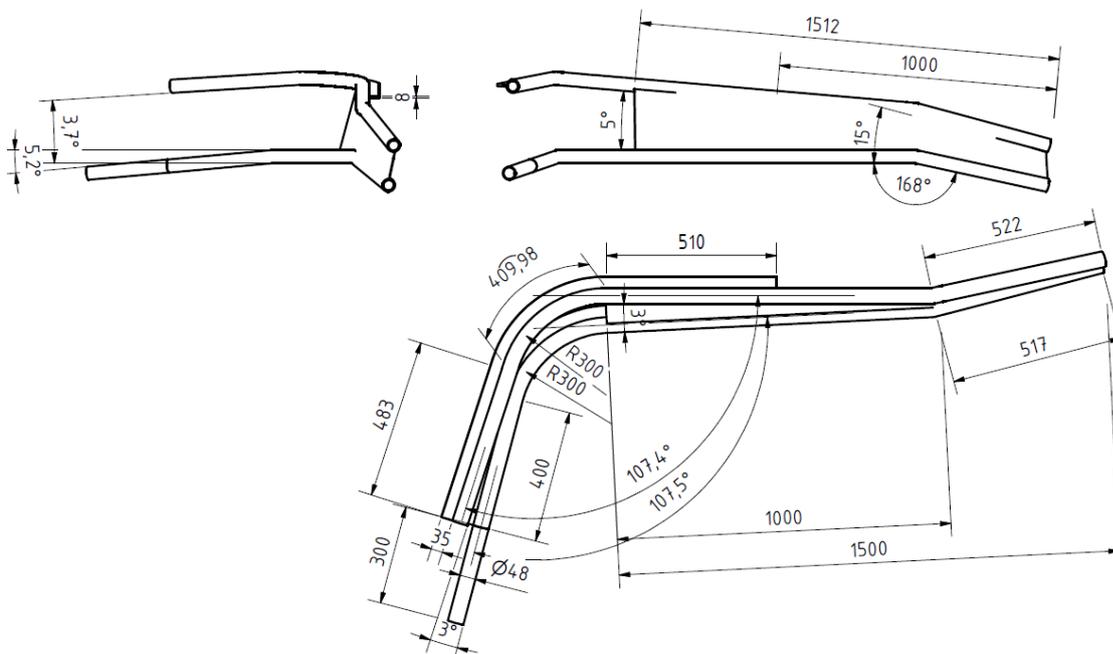


Abbildung 4-13: Detailansichten der Baugruppe Leiteinrichtung vom Rodepflug RB 60
(Bildquelle: BERCHTOLD, 2012)

4.2.3 Weiterverarbeitungskette

Das Zusammenschieben und Aufpoltern der gerodeten Obstbäume mittels **Radlader und Reisiggabel** mit Oberzange erwies sich als praxistauglich. Die reihensenkrecht abgelegten Bäume wurden von der Gabel gut erfasst. Durch die mechanischen Zusammenstöße der Bäume und das aufpoltern konnte ein Teil des an der Wurzel anhaftenden Oberbodens abgetrennt werden. Dazu erwies sich ein Austrocknen des Erdanhangs nach dem Roden als vorteilhaft. Reihenlängen von 30-50 m konnten in einem Schubdurchgang bis zum Vorgewende problemlos aufgeschoben werden. Beim Zusammenschieben und Aufpoltern sollte darauf geachtet werden, dass die Bäume richtungsgleich gesammelt und aufgepackt werden, d.h. die Feldmiete sollte nicht von zwei Seiten aus gepoltet werden. Damit wird ein erneutes Aufnehmen der Bäume in der weiteren Verfahrenskette erleichtert.

Die Aufbereitungskette der Obstbäume zu einem Brennstoff mittels **Sieb- und Schredderanlagen** nach der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Methode erwies sich ebenfalls als praxistauglich. Die produzierte Schredderware ist nur begrenzt vergleichbar mit einem G100 Hackschnitzel. G100 Hackschnitzel dürfen nach der ÖNORM M 7133 eine maximale Korngröße inklusive der Überlängen von 250 mm besitzen. Dieses Kriterium kann von der produzierten Schredderware nicht erfüllt werden, sodass das Material nur in Feuerungsanlagen eingesetzt werden kann, wenn diese auf Überlängen größer 250 mm ausgelegt worden sind. Weiterhin unterscheidet sich das Schreddermaterial deutlich von einem Hackschnitzel bezüglich der geometrischen Form der Einzelstücke. Durch den reißenden Schnitt eines Schredders sind die Kanten brüchig und nicht scharfkantig, wie bei einem Holzhäcksler. Durch die undefinierte Oberfläche haften augenscheinlich mineralische Bestandteile des Ackerbodens, welcher nicht abgesiebt wurden, an der Biomasse.

Das aufsammeln, zerkleinern und bündeln der Obstbäume nach der Rodung mit dem **BioBaler BW55** erwies sich als nicht einsatztauglich. Zum einen wurden die Obstbäume in der Presskammer nicht zu einem Ballen geformt, sodass ein Abbinden der Biomasseballen, wie es aus der Strohernte bekannt ist, nicht realisierbar war (Abbildung 4-14). Zum anderen blieben erhebliche Anteile an Holz auf dem Ackerboden liegen, die durch das Mulchaggregat erfasst, zerkleinert jedoch nicht in die Presskammer des BioBalers befördert wurden (Abbildung 4-15).



Abbildung 4-14 & 4-15: Biomasseballen des BioBalers aus Obstplantagen (links); Biomasseverluste in der Weiterverarbeitungskette von gerodeten Obstbäumen mittels BioBaler (rechts)

4.2.4 Rodungsholzmengen

Das Wiegen der Schrederware aus den **Praxisparzellen H2 und H1**, welche eine Gesamtfläche von 1,01 ha besitzen, ergab eine Gesamtmasse kurz nach dem Zerkleinern von 33.827 kg mit den Tonkinstäben der Drahtrahmenunterstützung. Zu beachten ist, dass diese Masse nach einer Lager- und Trocknungszeit der Ganzbäume von ca. 60 Tagen bestimmt wurde. Als Referenz wurde das Gesamtvolumen des eingelagerten Materials gemessen. Dabei konnten 156 Schüttraummeter ermittelt werden. Die mittlere Schüttdichte der Obstholzmasse lag bei $221 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Die rechnerische Gesamtmasse aus der Multiplikation von Volumen und Schüttdichte ergibt eine Masse von 34.476 kg für die Versuchspartellen H2 und H1. Demzufolge kann die Rodungsholzmenge sowohl über die Gesamtmasse als auch über das Produkt von Volumen und Schüttdichte praxisgerecht ermittelt werden. Im Mittel kann für die Fläche H1/H2 ein Frischmasseertrag von $34,134 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ angegeben werden (Tabelle 4-4).

Auf der **Praxisversuchsfläche Dick 10** konnte die Rodungsholzmenge nur über das Volumen und die Schüttdichte ermittelt werden. Das Volumen wurde an der aufgeschütteten Feldmiete über die geometrische Form eines Obeliskens bestimmt. Dies ergab bezogen auf

die 3,86 ha große Versuchsfläche ein Biomassevolumen von 415 m³ ohne Baumpfähle. Daraus resultiert ein Hektarertrag von 108 Schüttraummetern (srm). Die Schüttdichte betrug im Mittel 214 kg*m⁻³. Diese Biomasseertragsdaten wurden nach einer Lager- und Trocknungszeit der Obstbäume von ca. 270 Tagen erfasst. Rechnerisch ergibt sich aus den gemessenen Werten ein Frischmasse-Hektarertrag von 23,112 t (Tabelle 4-4). Aus den Massenerträgen und den ermittelten Wassergehalten kann nach demselben Verfahren, welches aus der Schnittholzmassenanalyse bekannt ist, der Trockenmasseertrag pro Hektar angegeben werden.

Der **Wassergehalte** der Obstbäume der **Fläche H2/H1** wurde während der Zerkleinerung der Bäume im Zuge der Weiterverarbeitungskette bestimmt. Dabei konnte ein mittlerer Wassergehalt von 32,95% ermittelt werden. Der Trockenmasseertrag, der sich aus den Apfelbäumen auf der Fläche H2, welche im 11. Standjahr stand, und der Fläche H1 mit Birnenbäumen im 24. Standjahr zusammensetzt, kann mit 22,9 t TM*ha⁻¹ angegeben werden (Tabelle 4-4). Dabei ist zu beachten, dass flächenmäßig die Birne nur ¼ des Ertrages ausmacht, jedoch bezogen auf die Masse durch das höhere Alter und den allgemein stärkeren Wuchs der Birne im Vergleich zum Apfel ein höheren Massenanteil an der Rodungsholzmenge besitzt.

Auf der **Praxisversuchsfläche Dick 10** konnte beim Schreddern ein mittlerer **Wassergehalt** von 36,72% analysiert werden. Daraus ergibt sich ein Trockenmasseertrag der Apfelkultur im 14. Standjahr von 14,6 t TM*ha⁻¹ (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Rodungsholz mengen aus den Praxisversuchen auf den Flächen H2/H1 und Dick 10

Standort	FM-Ertrag [t*ha ⁻¹]	Wassergehalt [%]	TM-Ertrag [t*ha ⁻¹]
H2/H1	34,134	32,95	22,9
Dick 10	23,112	36,72	14,6

(FM = Frischmasse; TM = Trockenmasse)

Tabelle 4-5: Rodungsholzmengen aus den Apfel-Einzelbaumuntersuchungen (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; n=5, Gala und Boskoop n=10)

Sorte	Stand-jahr	Standort	FM-Einzelbaum-gewicht [kg]			Wassergehalt [%]	TM-Einzelbaum-gewicht [kg]	TM-Ertrag [t*ha ⁻¹]
Elstar	11	H2	15,2	± 4,4	a	44,97	8,36	21,7
Pinova	11	H2	7,2	± 1,0	d	44,14	4,02	10,5
Topaz	11	H2	12,6	± 1,5	a-c	45,81	6,83	17,8
Gala	14	Dick 10	8,1	± 2,1	b-d	41,76	4,72	12,3
Golden	14	Dick 10	7,6	± 2,4	cd	42,73	4,35	11,3
Delicious								
Jonagored	14	Dick 10	9,2	± 3,9	b-d	42,38	5,30	13,8
Boskoop	14	Dick 10	10,2	± 3,3	a-d	42,46	5,87	15,3
Elstar	14	Dick 10	13,1	± 0,7	ab	42,59	7,52	19,6

(FM = Frischmasse; ± Wert = Standardabweichung; TM = Trockenmasse; Hektarertrag mit 2.600 Bäumen pro Hektar errechnet)

Die größten **Frischmassen- (FM) Einzelbaumgewichte** (Tabelle 4-5) waren in diesem Versuch in der Sorte Elstar zu verzeichnen. Die Variante Elstar im 11. Standjahr zeigte dabei mit 15,2 kg die signifikant höchsten mittleren FM-Gewichte. Die Variante Elstar im 14. Standjahr lag im Mittel mit 13,1 kg FM pro Baum nur knapp darüber. Die Varianten Pinova (11. Standjahr), Golden Delicious (14.) und Gala (14.) zeigten mit 7,2, 7,6 und 8,1 kg die niedrigsten FM-Einzelbaumgewichte, wobei die Sorte Pinova das signifikant geringste Gewicht aufwies. Die Sorten Jonagored, Boskoop und Topaz lagen im oberen Mittelfeld der FM-Gewichte. In dem Versuch konnten keine Abhängigkeit zwischen dem 11. und 14. Standjahr im Bezug zu den Rodungsholzerträgen erkannt werden.

Die **Wassergehaltsanalyse der Einzelbäume** von verschiedenen Obstsorten der Flächen H2 und Dick 10 ergaben homogene mittlere Wassergehalte zwischen 41,76 und 45,81% (Tabelle 4-5). Diese Wassergehalte wurden kurz nach der Rodung der Bäume ermittelt. Aus diesem und der Frischmasse kann der mittlere Trockenmasseertrag pro Einzelbaum ermittelt werden. Diese sind in Tabelle 4-5 ebenfalls aufgelistet. Weiterhin wurden die mittleren Baumgewichte auf Trockenbasis mit einer mittleren Baumanzahl pro Hektar von 2.600 multipliziert und so der Trockenmasseertrag pro Hektar errechnet.

Auffällig bei den **Trockenmasseerträgen** ist, dass diese sortenabhängig stark schwanken (Tabelle 4-5). Die Sorte Pinova zeigte die geringsten Biomasseerträge mit $10,5 \text{ t TM*ha}^{-1}$. Die höchsten Trockenmasseerträge wurden, wie bei den Frischmasseerträgen in der Sorte Elstar im 11. Standjahr, mit $21,7 \text{ t TM*ha}^{-1}$ berechnet. Die Variante Elstar im 14. Standjahr lag knapp mit $19,6 \text{ t TM*ha}^{-1}$ dahinter. Den Trend, dass die Variante Elstar (11) einen höheren Biomasseertrag lieferte als die Variante Elstar (14) setzt sich auch im Mittel über alle Varianten aus dem 11. bzw. 14. Standjahr fort. Dabei wiesen die drei Varianten aus dem 11. Standjahr einen mittleren Ertrag von $16,7 \text{ t}$ und die fünf Varianten aus dem 14. Standjahr einen Ertrag von $14,5 \text{ t TM*ha}^{-1}$ auf. Zu beachten ist, dass die Standorte der Varianten aus dem 11. und 14. Standjahr differieren.

Einen Wert für die zu erwartenden **Biomasseerträge** aus einer Rodungsmaßnahme von Apfelmischkulturen nach 10-15 Jahre Standzeit zu geben ist schwierig. Im Obstbau werden oft Sortenmischungen angebaut, die eine Befruchtung der Blüten sicherstellen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Erträge stark sortenabhängig sind. Deswegen kann nur ein

Wertebereich der Biomasseerträge aufgezeigt werden. Die Daten aus den Praxisversuchen bestätigen die Varianz der Ergebnisse. Die zu erwartenden Erträge aus den Rodemaßnahmen können mit 10 bis 23 t TM*ha⁻¹ grob beziffert werden.

4.2.5 Brennstoffeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Brennstoffeigenschaften des Rodungsholzes charakterisiert. Dabei werden die Parameter Wasser-, Asche- und Energiegehalt, soweit untersucht, zu jedem Einzelversuch vorgestellt. Zum Teil werden die Ergebnisse durch die Analyse der elementaren Zusammensetzung ergänzt.

Die Analysen des **Aschegehaltes** der Rodungsholzmasse der **Fläche H2/H1** ergaben einen mittleren anorganischen Rückstand von 7,13 ± 1,11%. Der **Brennwert** kann im Mittel mit 18,04 ± 0,08 MJ*kg⁻¹ angegeben werden. Der **Aschegehalt** fiel im Vergleich zur Fläche H2/H1 in dem Versuch auf **Dick 10** mit durchschnittlich 4,9 ± 0,36% geringer aus. Dagegen stieg der **Brennwert** im Mittel auf 18,26 ± 0,07 MJ*kg⁻¹ an.

Um die Brennstoffeigenschaften des Rodungsholzes differenzierter betrachten zu können wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Zunächst werden die Massenanteile der **Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig** vorgestellt. Aus diesem Versuch ergab sich, dass 30% der Frischmasse eines 15 Jahre alten Apfelbaumes auf das Wurzelwerk, 52% auf den Schaft und 18% auf das Reisig entfallen. Dies kann aus Abbildung 4-16 entnommen werden.

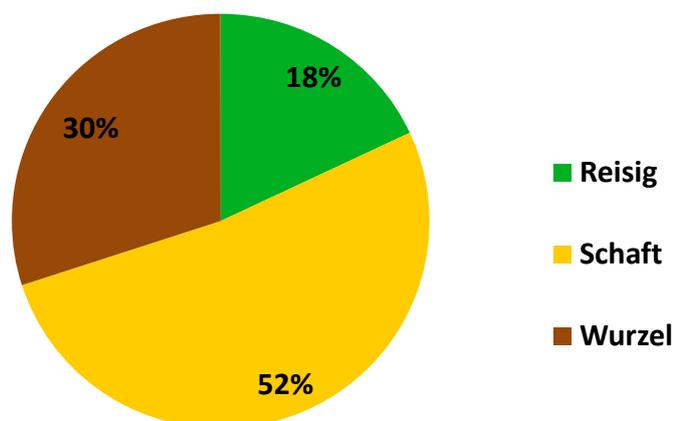


Abbildung 4-16: Frischmassenanteile der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig einer im Rodungsalter befindlichen Apfelanlage (15. Standjahr) auf M9 (n=20)

Die Brennstoffeigenschaften der Baumsegmente (Abbildung 4-17) zeigen, dass die Wurzel den signifikant höchsten Wassergehalt (61,57%) und Aschegehalt (9,78%) besitzt. Der Brennwert der Wurzelmasse ist mit ca. 17,3 MJ*kg⁻¹ tendenziell am geringsten. Der Schaft weist dagegen den signifikant geringsten Aschegehalt mit 4,08% auf; weiterhin ist der Brennwert tendenziell am größten (18,3 MJ*kg⁻¹). Der anorganische Rückstand des Reisigs wurde mit 6,88% analysiert und unterschied sich ebenfalls signifikant von den anderen Varianten.

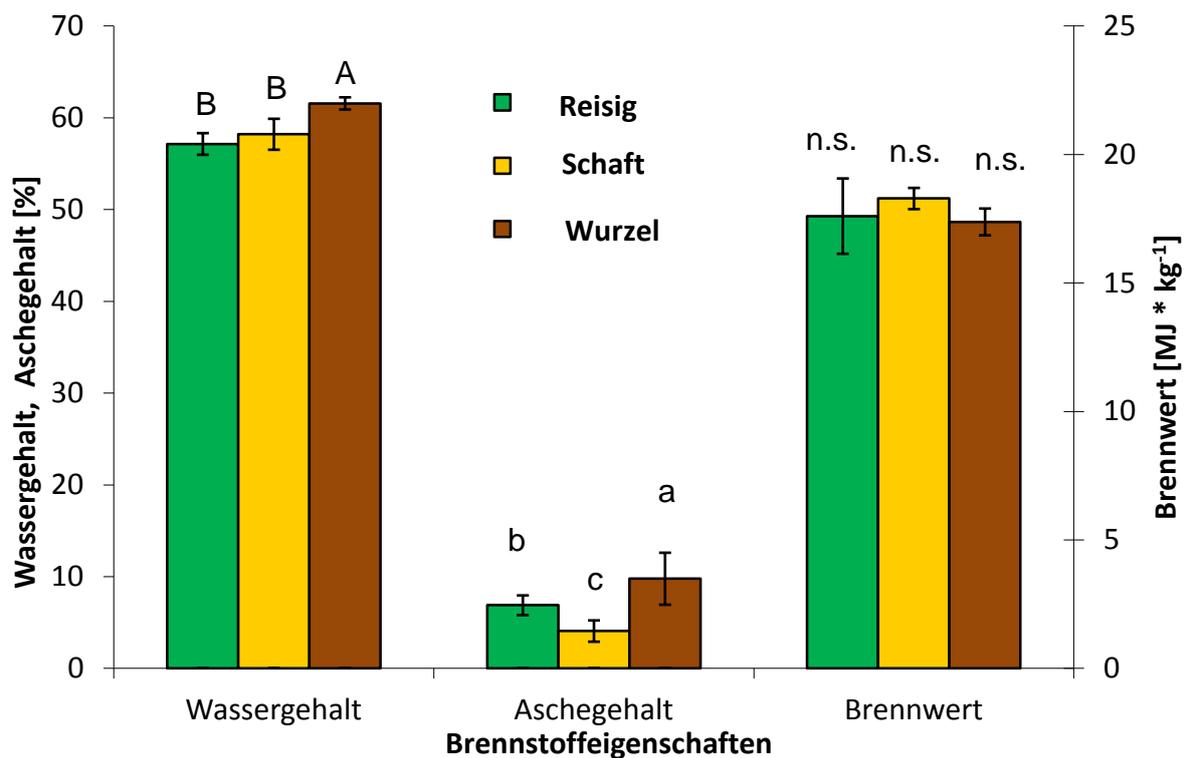


Abbildung 4-17: Brennstoffeigenschaften der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig einer im Rodungsalter befindlichen Apfelanlage (15. Standjahr) auf M9 (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft n=10)

Die Elementaranalyse der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig ist in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-6: Elementaranalyse der Baumsegmente Wurzel, Schaft und Reisig auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)

	C [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	Cu [mg*kg ⁻¹]	Fe [mg*kg ⁻¹]	Zn [mg*kg ⁻¹]
Wurzel	42,847	0,570	0,060	<0,010	0,446	0,129	2,590	9,97	747,44	35,22
Schaft	45,798	0,410	0,041	<0,010	0,336	0,066	1,331	6,50	118,29	15,08
Reisig	45,142	0,723	0,061	<0,010	0,485	0,113	1,920	11,70	170,11	29,83

Der Kohlenstoffgehalt der Baumsegmente Schaft und Reisig lagen mit 45,798 bzw. 45,142% rund 3% über dem der Wurzel (42,847). Die Elemente Stickstoff und Schwefel waren im Schaft mit 0,410 und 0,041% in geringeren Anteilen enthalten als in der Wurzel (N: 0,723%, S: 0,061%). Die Nachweisgrenze von Chlor von 0,010% wurde bei allen drei Baumsegmenten unterschritten. Die Kalium- und Magnesiumgehalte der Wurzel und des Reisigs liegen genauso wie der Schwefelgehalt auf gleichem Niveau. Der Schaft weist dagegen bei allen analysierten Elementen, außer beim Kohlenstoff, die geringsten Inhaltsstoffwerte auf (Tabelle 4-6).

Neben den Hauptelementen wurden wie beim Schnittholz auch die Schwermetallgehalte von Kupfer, Eisen und Zink ermittelt. Die drei Elemente besitzen in der Wurzel in Summe einen Anteil von 0,079% der Biomasse, im Reisig dagegen nur 0,021% und im Schaft 0,014%. Damit ist der Schwermetallgehalt in der Wurzel um das 4-6 fache höher als in Reisig und Schaft.

Bei der detaillierten Untersuchung der **Brennstoffeigenschaften der Baumsegmente unter- und oberhalb, sowie im Veredlungsknoten** und der Unterschiede zwischen Rinde und dem reinen Holz konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden.

Aus Abbildung 4-18 (I) wird ersichtlich, dass der Wassergehalt in der Rinde in allen Varianten tendenziell höher lag, als im Holz. In den Baumsegmenten unter und im Veredlungsknoten war dieser Unterschied nicht signifikant ausgeprägt, im Stamm auf einer Höhe von 0,4 und 1,3 m dagegen schon. Gleichzeitig wurden im Holz des Stamms in beiden Höhen die niedrigsten mittleren Wassergehalte mit 32,97 bzw. 33,70% gemessen. In den beiden

gleichen Varianten konnten dagegen in der Rinde die höchsten Wassergehalte von 44,63 bzw. 44,45% beobachtet werden. Alle Standardabweichungen lagen auf einem konstant niedrigen Niveau zwischen 0,44 und 1,18%. Werden die Obstbäume in ihrer vertikalen Achse betrachtet, kann eine Zunahme des Wassergehaltes in der Rinde von unten nach oben und eine entsprechende Abnahme im Holz festgestellt werden.

Die Abbildung 4-18 (II) zeigt die Aschegehalte der acht Varianten. Dabei wird ein deutlicher Unterschied zwischen dem Aschegehalt in der Rinde und dem Holz sichtbar. Der mittlere Aschegehalt über alle vier Holzvarianten wurde mit 1,40% analysiert. Dagegen beträgt dieser in den Rindenvarianten 13,84% und liegt damit fast um das Zehnfache höher. Der Veredelungsknoten besitzt im Holzteil einen signifikant höheren mineralischen Anteil, als die anderen Holzvarianten. Auch in den Rindenvarianten zeigte der Aschegehalt des Veredelungsknoten mit 17,86% den höchsten Wert. Wird der gesamte Baum wieder in der vertikalen Achse betrachtet, nimmt der Aschegehalt in allen Varianten tendenziell, teilweise auch signifikant von unten nach oben ab.

Die Brennwerte der Varianten zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen dem Holz und der Rinde (Tabelle 4-18 (III)). Dabei unterscheiden sich alle Holzvarianten untereinander nicht signifikant. Der Brennwert dieser Varianten (Holz) schwankt zwischen 19,23 und 19,43 MJ*kg⁻¹ und ist damit sehr homogen bei sehr geringen Standardabweichungen. In den Rindenvarianten ist dagegen ein aufsteigender Trend in vertikaler Achse von unten nach oben zu erkennen. Die Messergebnisse der Rinde des Veredelungsknoten sowie der darunter, zeigen den signifikant geringsten Brennwert. Die Rinde des Stamms auf 0,4 und 1,3 m wiesen dagegen einen signifikant höheren Energiegehalt auf.

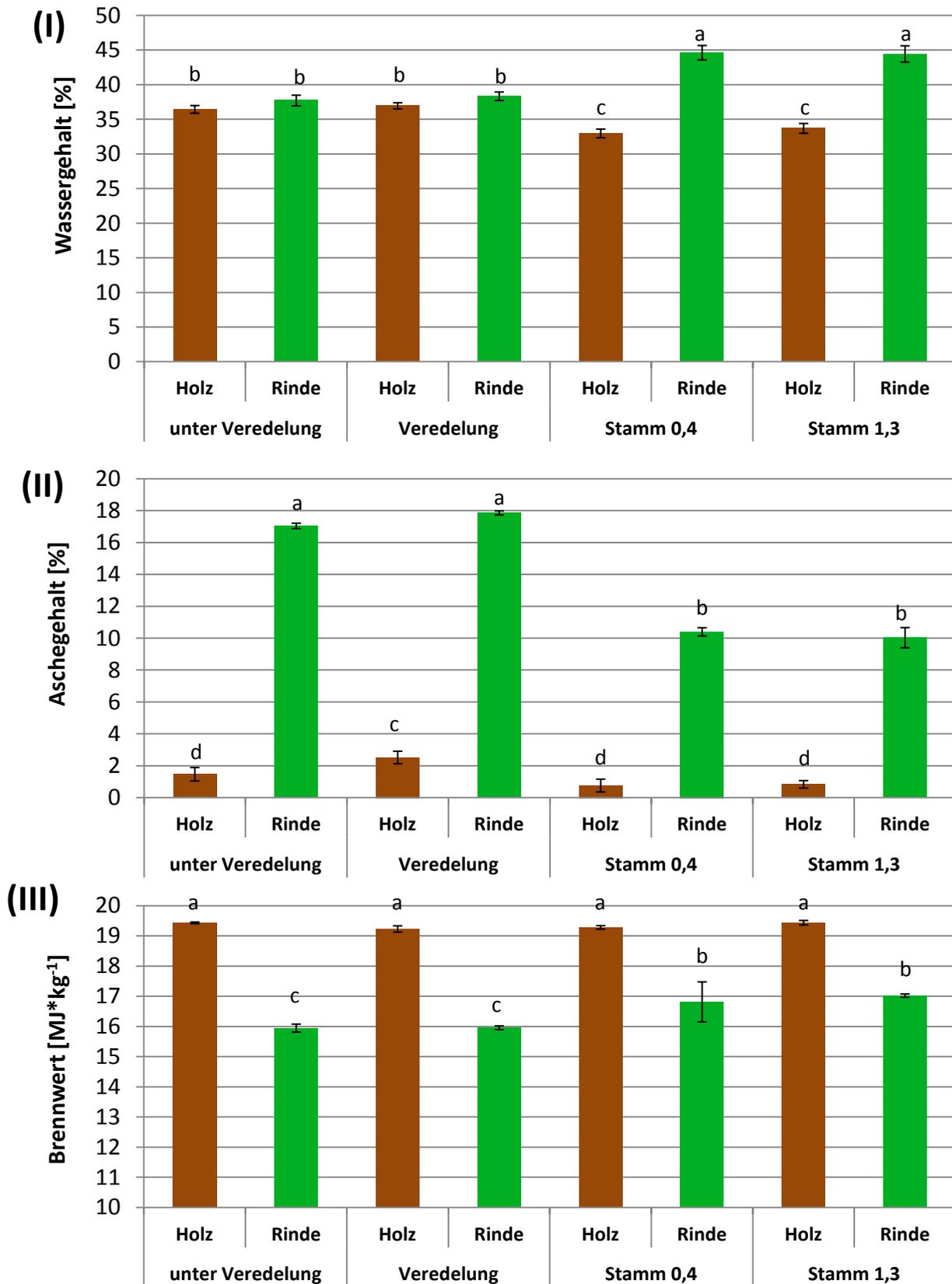


Abbildung 4-18: Wasser- (I), Aschegehalt (II) und Brennwert (III) der Baumsegmente unterm und im Veredelungskonten, sowie am Stamm in 0,4 bzw. 1,3 m Höhe, getrennt in Holz und Rinde (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft $n=3$)

Tabelle 4-7: Elementaranalyse unterm und im Veredelungsknoten von Apfelbäumen, sowie am Stamm in 0,4 bzw. 1,3 m Höhe, getrennt in Holz und Rinde auf die Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Kupfer (Cu), Eisen (Fe) und Zink (Zn) (n=2)

Variante	C [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	Cu [mg*kg ⁻¹]	Fe [mg*kg ⁻¹]	Zn [mg*kg ⁻¹]
Holz unter Veredelung	47,256	0,316	0,038	<0,010	0,245	0,037	0,393	4,77	46,11	27,56
Rinde unter Veredelung	41,670	0,859	0,077	<0,010	0,500	0,135	5,580	45,04	572,72	32,38
Holz Veredelung	46,950	0,304	0,043	<0,010	0,264	0,044	0,669	8,02	55,28	16,78
Rinde Veredelung	41,705	0,821	0,078	<0,010	0,523	0,141	5,805	39,20	544,81	35,22
Holz Stamm 0,40 m	45,927	0,208	0,026	<0,010	0,171	0,045	0,359	4,34	50,10	7,99
Rinde Stamm 0,40 m	42,845	0,597	0,083	<0,010	0,536	0,111	3,545	36,16	198,01	30,96
Holz Stamm 1,30 m	46,182	0,191	0,034	<0,010	0,190	0,038	0,234	3,04	50,50	5,72
Rinde Stamm 1,30 m	43,149	0,603	0,062	<0,010	0,572	0,105	3,580	26,85	158,15	16,21

Bei der getrennten Analyse von Holz und Rinde auf die elementare Zusammensetzung an verschiedenen Baumteilen (unterm und im Veredlungsknoten sowie am Stamm in 0,4 und 1,3 m Höhe) werden die Unterschiede zwischen dem Holz und der Rinde deutlich (Tabelle 4-7). Der Kohlenstoffgehalt der Holzabschnitte lag um 3-6% über denen der Rinde. In den Holzvarianten der Apfelbäume konnte ein homogener Kohlenstoffgehalt zw. 45,927 bis 47,256% analysiert werden. Wie schon bei der Brennwertuntersuchung (Abbildung 4-18 (III)) aufgezeigt, ist auch ein steigender Kohlenstoffgehalt in der Rinde tendenziell von unten nach oben längst der vertikalen Baumachse zu beobachten (Rinde unter Veredlung: C = 41,670%; Rinde Stamm 1,3m: C = 43,149%).

Der Chlorgehalt lag auch in dieser Elementaranalyse unterhalb der Nachweisgrenze in allen Varianten und kann daher mit <0,010% angegeben werden. Für die Hauptelemente Stickstoff, Schwefel und Kalium kann unabhängig von der Variante festgehalten werden, dass deren Gehalte in der Rinde ca. doppelt so hoch waren, wie im Holz. Beim Erdalkalimetall Calcium zeigte sich ein noch deutlicherer Unterschied zwischen Rinde und Holz. Dabei wurden in der Rinde, ähnlich wie zuvor beim Aschegehalt gezeigt, rund zehnfach erhöhte Werte im Vergleich zum reinen Holz nachgewiesen. Das Holz besteht im Mittel aller Baumabschnitte zu 0,414% aus Calcium, die Rinde dagegen zu einem Anteil von 4,628%.

Auch die Schwermetallgehalte liegen in der Rinde deutlich über denen im Holz. Dabei konnten für die Elemente Kupfer, Eisen und Zink in der Rinde der unteren Baumabschnitte (unter und im Veredlungsknoten) höhere Gehalte gemessen werden als in den oberen (Stamm auf 0,4 bzw. 1,3 m Höhe). Die Summe der Schwermetallgehalte in der Rinde der unteren Baumkompartimente kann mit 0,064% der Trockenmasse, dagegen in den oberen Baumrinden mit 0,023% angegeben werden. Im Holz ist der Schwermetallgehalt homogener und liegt im Mittel über alle Varianten bei 0,002%, also auch um eine Zehnerpotenz niedriger. Der Hauptanteil bei den Schwermetallen ist, wie bei den anderen Elementaranalysen, auf das Element Eisen zurückzuführen.

Bei der **Aschegehalts- und Brennwertanalyse der vier Apfelsorten** (Boskoop, Elstar, Gala und Cox) **und einer Birnensorte** (Alexander Lucas) konnten folgende Ergebnisse ausgewertet werden (Abbildung 4-19): Die Birnensorte besitzt mit $18,93 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ einen signifikant höheren Brennwert als die Apfelsorten Boskoop, Elstar und Cox. Von der Apfelsorte Gala ($18,77 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) unterscheidet sich die Birnensorte nicht signifikant, sondern nur tendenziell.

Weiterhin können zwischen den Apfelsorten, also innerhalb einer Art, signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die Apfelsorte Boskoop besitzt mit $18,40 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ den signifikant geringsten Brennwert hinter den Sorten Cox ($18,44 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) und Elstar ($18,55 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Gleichzeitig besitzt die Sorte Boskoop den signifikant höchsten Aschegehalt mit 5,18%. Den signifikant geringsten Aschegehalt weist die Apfelsorte Gala mit 3,86% auf. Von der Sorte Gala unterscheiden sich die Sorte Elstar (4,12%) nur tendenziell, genauso wie die Birnensorte Alexander Lucas (4,10%). Damit kann vermutet werden, dass mit sinkendem anorganischem Anteil in der Biomasse der Brennwert generell steigt. In Abbildung 4-19 werden die Ergebnisse übersichtlich dargestellt.

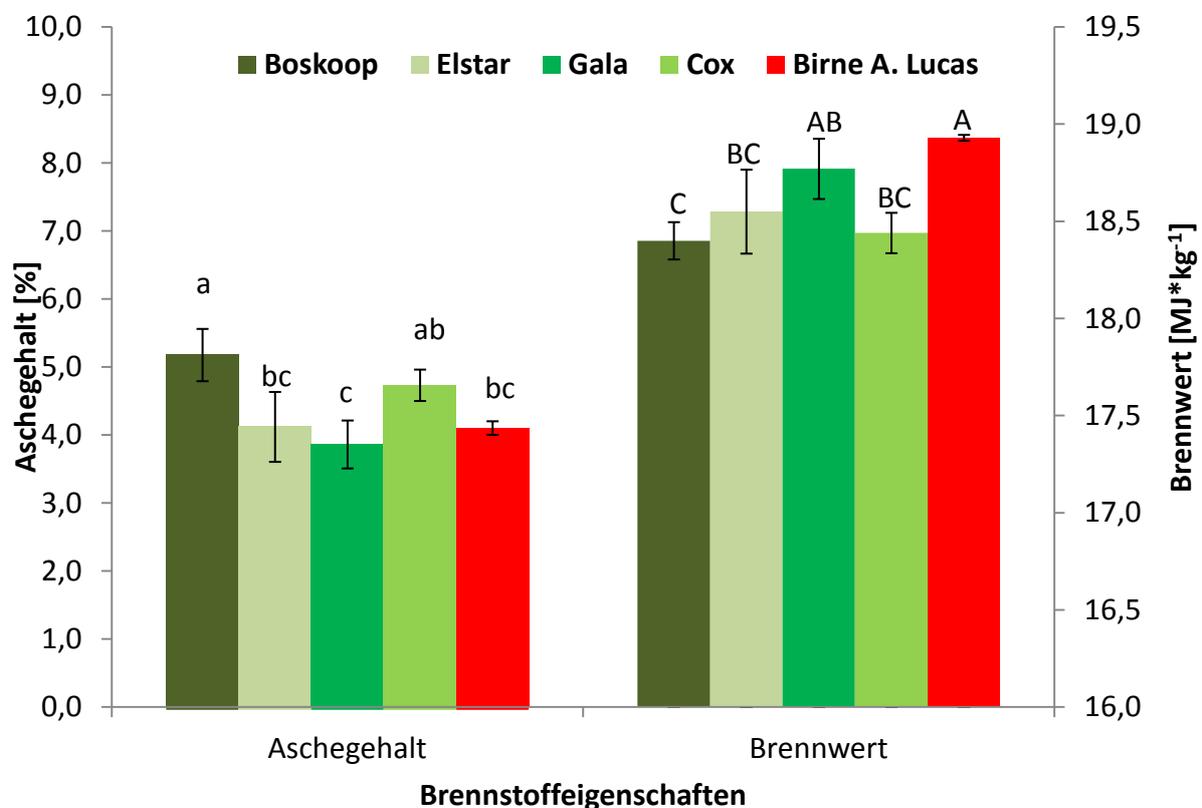


Abbildung 4-19: Aschegehalte und Brennwerte von Rohholz verschiedener Obstsorten und -arten. Die Sekundär-Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei $16 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; je Brennstoffeigenschaft $n=3$)

4.2.6 Arbeitsqualitätsfaktoren RB 60 „Klein-Altendorf“

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungsergebnisse zu den Arbeitsqualitätsfaktoren für das neu entwickelte Rodeverfahren RB 60 „Klein-Altendorf“ vorgestellt.

Zunächst wird auf die abgebrochenen Pfähle aus dem Unterstützungsgerüst der Apfelplantagen eingegangen. Bei der Auswertung der beschädigten bzw. abgebrochenen Baumpfähle auf vier Versuchspartzen mit jeweils 100 bonitierten Pflanzplätzen ergab sich eine sehr geringe Beschädigungsquote der Pfähle. Diese lag zwischen 1 und 3%. Die Unterstützungsstähle wurden während des Rodeprozess simultan mit dem Obstbaum aus dem Erdreich geborgen und abgelegt. Somit können bis zu 99% der Pfähle des Unterstützungsgerüsts für eine Neuanlage einer Obstanlage wiederverwendet werden, was wirtschaftliche Vorteile bietet. Weiterhin werden keine Pfahlspitzen im Boden belassen, welche bei einer Grundbodenbearbeitung zu Beschädigungen an Maschinen führen können. Abbildung 4-20 zeigt die Einzelergebnisse der vier Versuchspartzen.

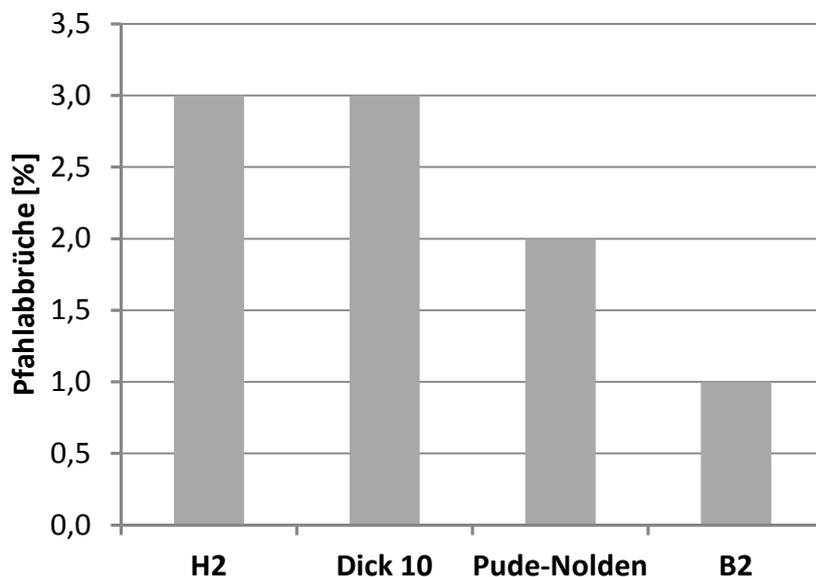


Abbildung 4-20: Pfahlabbrüche während der Rodung von Apfelplantagen mit dem Rodeverfahren RB 60 (n=100)

Weiterhin konnte bei diesen Versuchen beobachtet werden, dass selbst Pfahlspitzen, die bereits bei den herkömmlichen Rodemaßnahmen der Vorkultur im Erdreich verblieben waren und sich durch ihre Teerölimprägnierung im Boden nicht zersetzen, mit dem Rodepflug geborgen werden konnten. Die Abbildung 4-21 belegt diese Beobachtungen.

Als weiterer Arbeitsqualitätsfaktor wurde die Erdabsiebung definiert. In der Abbildung 4-22 sind sowohl die Ergebnisse aus den Einzelbaumuntersuchungen, als auch die Totalerhebung aus den Praxisversuchen aufgeführt. Aus den Einzelbaumuntersuchungen wird zunächst deutlich, dass der Erdanteil am Wurzelwerk deutlich durch die Verbesserung der Siebeinrichtung des Rodepflugs, welche in Kapitel 4.2.2 beschrieben wurde, reduziert werden konnte. Bei der Einzelbaumuntersuchung in der Fläche H2 wurde ein mittlerer Resterdanteil von 27,87% an den Bäumen ermittelt. Mit der Verbesserung der Siebeinrichtung im Laufe der Versuche konnte eine Reduktion des Erdanteils auf zunächst 16,35% (Dick 10 Einzelbaum) und weiter auf 9,76% (B2 Einzelbaum) festgestellt werden. Zwischen dem Versuchen auf der Fläche Dick 10 und B2 wurde hauptsächlich die Leiteinrichtung optimiert, um die Obstbäume während der Rodung besser über die Siebfläche zu führen. Auffällig sind die sehr großen Standardabweichungen, weswegen auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden konnten. Mit abnehmendem Erdanteil von rund 28% auf knapp 10% wurden auch die Standardabweichungen kleiner (18% auf 7%). Die Praxisversuche auf der Fläche H2 und Dick 10 bestätigen die Beobachtungen aus den Einzelbaumuntersuchungen. Im Praxisversuch konnte auf der Fläche H2 beim Schreddern im Zuge der Weiterverarbeitungskette (siehe Kapitel 3.3.3 und 3.3.6) ein Erdanteil aus der Rodungsholzmasse von 21% ausgesiebt werden. Dieser sank auf 13% auf der Fläche Dick 10 (Praxis). Damit wurden in den Praxisversuchen rund 3 bis 7% geringere Erdanteile gemessen als in den Einzelbaumuntersuchungen. Zwischen den Einzelbaum- und Praxisversuchen lagen das Poltern der Obstbäume mittels Radlader und Reisiggabel, sowie eine Lagerzeit der Bäume in den Poltern (siehe dazu auch Kapitel 3.3.3 und 4.2.3).



Abbildung 4-21:
Pfahlspitzen aus
Vorkultur, welche
durch herkömmliche
Rodeverfahren
abgebrochen wurden

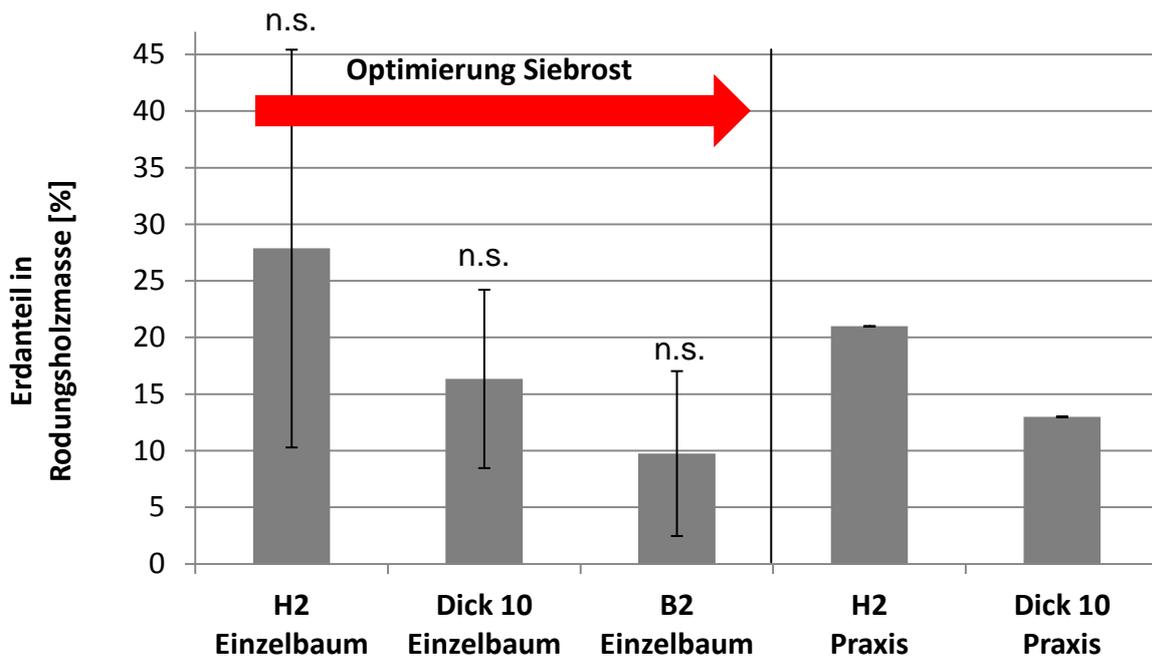


Abbildung 4-22: Verringerung des Erdanteils an den Wurzeln von Obstbäumen durch die Optimierung der Siebfläche (Einzelbaumuntersuchung n=5; Praxisversuch n=1)

Abschließend wurden zwei Versuche durchgeführt, die zusammenfassend den Wirkkomplex aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Umdrehungszahl des Zapfwellenantriebs beim Betrieb des Rodeverfahrens RB 60 untersuchen. Mit den genannten Faktoren wird Einfluss auf den Oberboden am Wurzelwerk, die Wurzelmasse und die Ablagegenauigkeit der Bäume nach dem Roden genommen. Die Ergebnisse der beiden Versuchsflächen werden durch Boxplotdiagramme in Abbildung 4-23 und 4-24 dargestellt.

Auf der Abszisse des Boxplotdiagramms in Abbildung 4-23 und 4-24 ist die Zapfwellendrehzahl, mit der der exzentrische Antrieb der Siebfläche bewegt wird, abgetragen. Die Variation der Vorfahrtsgeschwindigkeit wird durch die verschiedenen Farben der Boxen gekennzeichnet. Die Ordinatenachse zeigt den nach der in Kapitel 3.3.6 beschriebenen Methode und nach Formel 3-4 berechneten Arbeitsqualitätsfaktor. Ein kleiner Arbeitsqualitätsfaktor bedeutet, dass die Zielvorgaben der Erdabsiebung, des Wurzelabbruchs und der Ablagegenauigkeit nicht erfüllt wurden. Maschineneinstellungen, die einen höheren Arbeitsqualitätsfaktor erreichen, sind bezüglich der Qualität der Arbeitserledigung zu bevorzugen.

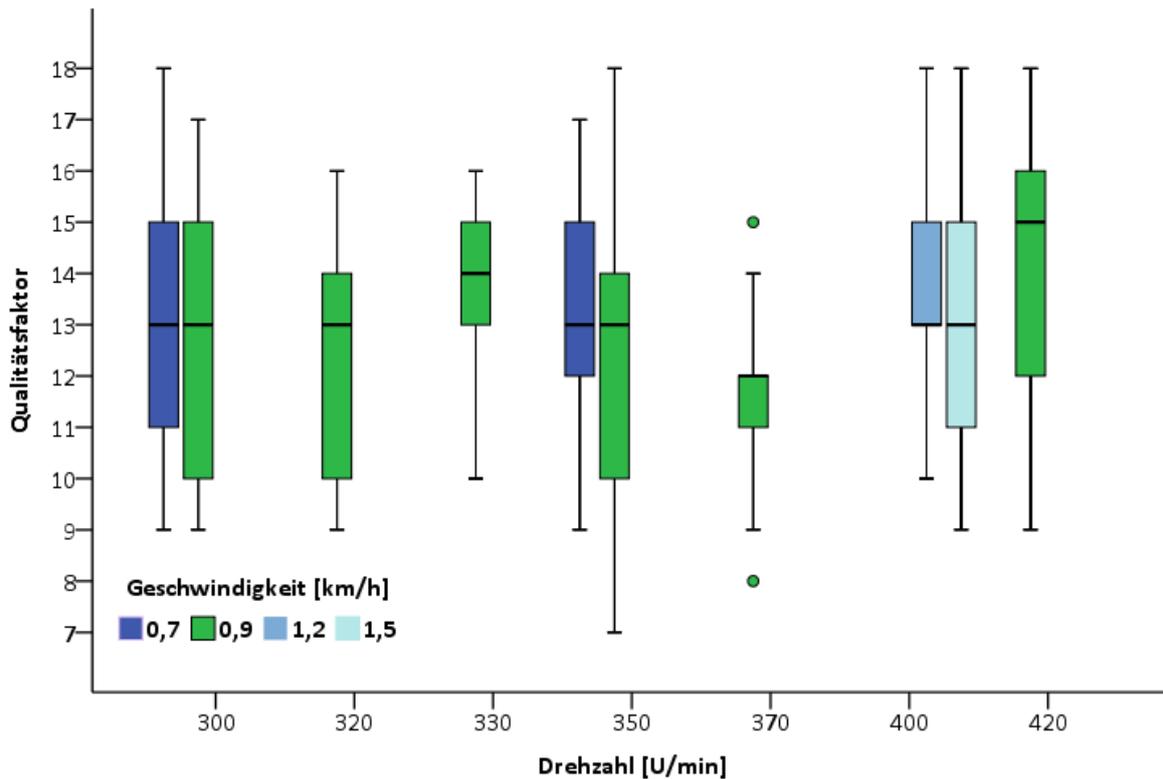


Abbildung 4-23: Rodeversuch in einer 6 jährigen Apfelplantage. Test des Wirkkomplexes aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Zapfwellendrehzahl beim Betrieb des Rodepflugs RB 60 auf die Qualität der Arbeitserledigung (n=20)

Aus der Abbildung 4-23 wird deutlich, dass bei variierender Vorfahrtsgeschwindigkeit (v) und Zapfwellendrehzahl (Drehzahl) der Qualitätsfaktor in den Varianten unterschiedliche Streubreiten besitzt. Diese ist in den meisten Varianten hoch (bspw. Drehzahl = $350 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$, $v = 0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ oder $420 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $1,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Einige Kombinationen aus Zapfwellendrehzahl und Vorfahrtsgeschwindigkeit zeigen jedoch geringere Variationen. Diese sind die Varianten Drehzahl = $330 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $v = 0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $400 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $1,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Weiterhin sind Unterschiede im Median der Varianten festzustellen. Dabei zeigt die Variante Drehzahl $330 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ einen durchschnittlich höheren Arbeitsqualitätsfaktor als die Variante $370 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Abbildung 4-23). Um den Rodepflug mit optimalen Maschineneinstellungen zu betreiben, müssen die Varianten ausgewählt werden, die eine geringe Streubreite, also homogene Qualität der Arbeitserledigung, bei gleichzeitig hohem Arbeitsqualitätsfaktor aufweisen. Dies sind die Schleppereinstellungen mit einer Zapfwellendrehzahl von $330 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ und $0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ Vorfahrtsgeschwindigkeit oder

Drehzahl = 400 U*min⁻¹ bei v = 1,2 km*h⁻¹. Bei diesen Maschineneinstellungen wurde in der sechsjährigen Apfelplantage die höchste und homogenste Übereinstimmung aus maximaler Erdabsiebung, geringem Wurzelabbruch und 90° Ablagegenauigkeit zur Baumreihenausrichtung erreicht.

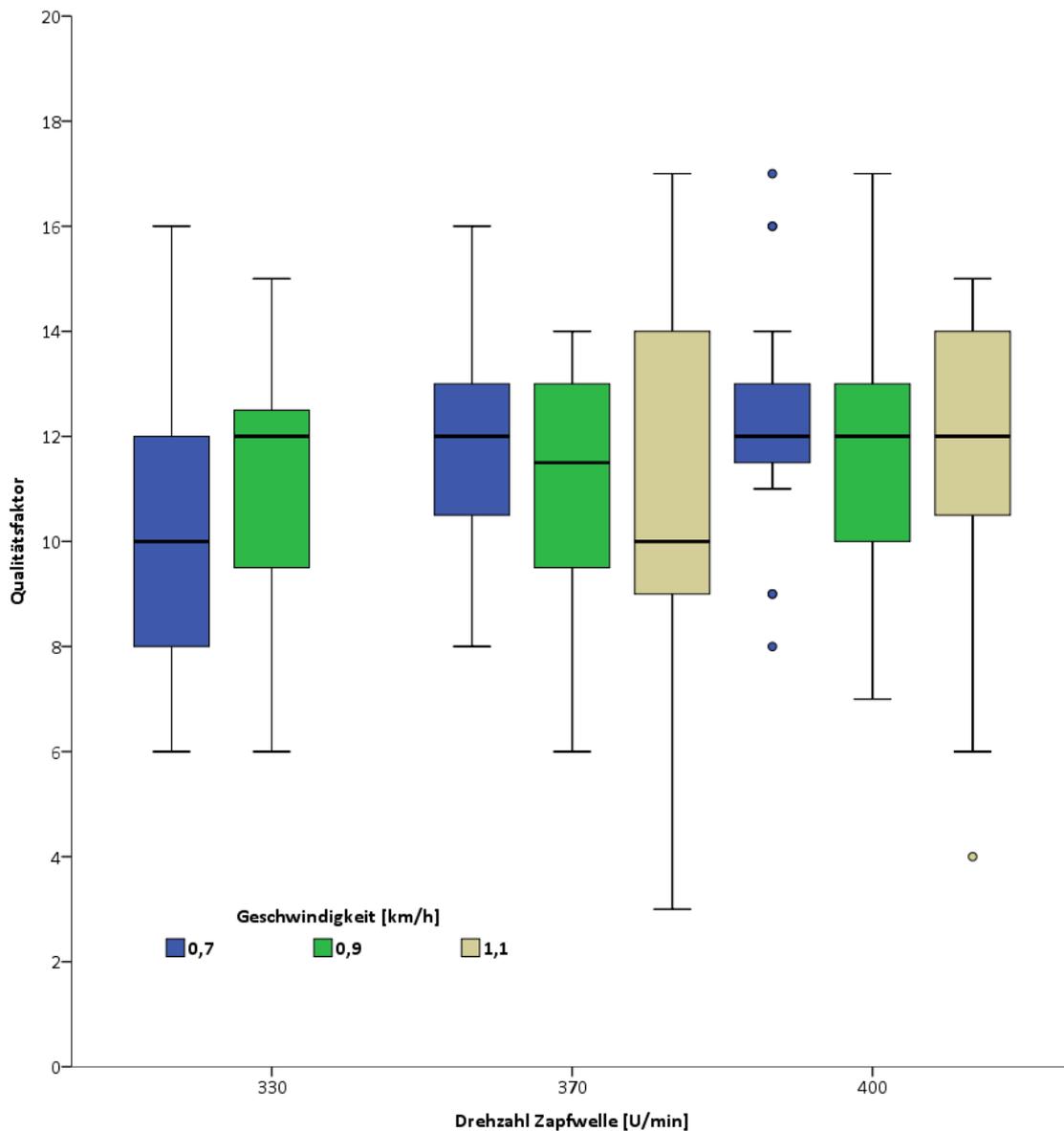


Abbildung 4-24: Rodeversuch in einer 19 jährigen Apfelplantage. Test des Wirkkomplexes aus Vorfahrtsgeschwindigkeit und Zapfwelldrehzahl beim Betrieb des Rodepflugs RB 60 auf die Qualität der Arbeitserledigung (n=20)

Die Abbildung 4-24 zeigt die Ergebnisse desselben Versuchs in einer Apfelplantage im 19. Standjahr. Durch die längere Standzeit, im Vergleich zum vorherigen Versuch, sind die Bäume größer und besitzen ein kräftigeres Wurzelwerk. Aus Abbildung 4-24 kann weiter

entnommen werden, dass mit zunehmender Vorfahrtsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Drehzahl die Streubreite des Arbeitsqualitätsfaktors steigt. Weiterhin sinkt der Median mit zunehmender Vorfahrtsgeschwindigkeit. Eine Ausnahme ist die Variante mit einer Drehzahl von $330 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $0,7$ bzw. $0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. In diesen wird durch die Erhöhung der Vorfahrtsgeschwindigkeit von $0,7$ auf $0,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ der Arbeitsqualitätsfaktor positiv beeinflusst. Die Variante $370 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ bei $0,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ zeigt hohe Übereinstimmungen mit den Anforderungen an die Qualität der Arbeitserledigung. Mit einer Erhöhung der Drehzahl auf $400 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ konnte die Erdabsiebung und somit der Arbeitsqualitätsfaktor weiter gesteigert werden.

Aus beiden Versuchen kann abgeleitet werden, dass die Maschineneinstellungen individuell auf die jeweilige Obstplantage abzustimmen sind. Tendenziell sollte mit zunehmenden Bestandesalter die Zapfwellendrehzahl erhöht und die Vorfahrtsgeschwindigkeit verringert werden. Aus den begleitenden Beobachtungen beim Roden der Versuche wurde deutlich, dass mit zunehmender Drehzahl mehr Erde abgesiebt wird. Dabei sollte die Drehzahl so gewählt werden, dass die an den Wurzeln anhaftende Erde erst im hinteren Drittel der Siebfläche abgesiebt wird. Ist die Wurzel zu früh erdfrei, wird der Baum nicht mehr in der Maschine geführt, fällt dadurch unkontrolliert aus dem Roder oder verklemmt sich in der Leiteinrichtung, was die Rodung blockiert. Weiterhin darf die Vorfahrtsgeschwindigkeit nur so weit verringert werden, dass noch ein fließender Prozessablauf beim Roden gewährleistet ist. Ansonsten ist ein Führen der Bäume durch die Leiteinrichtung nicht gegeben und die Bäume fallen in die noch stehende Baureihe nach vorne.

Zur einfachen und unabhängigen Einstellung der Zapfwellendrehzahl und Vorfahrtsgeschwindigkeit ist ein Schlepper mit stufenlosem Getriebe von Vorteil. Die Drehzahl sollte in einem Bereich von 300 bis maximal $450 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ gewählt werden. Auf einem sehr siebfähigen Sandboden können auch geringere Drehzahlen ausreichen. Die Vorfahrtsgeschwindigkeit ist zwischen $0,5$ - $1,5$ (max. $2,0$) $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ einzustellen.

4.3 Trocknung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Trocknung von Agrarhölzern beschrieben. Dazu wird in drei Abschnitten die Trocknung von Ganzbäumen, Biomasseballen und in Form von Hackschnitzel erläutert.

4.3.1 Ganzbaumtrocknung

Das Obstholz aus der Rodung der Versuchspartzen H2 und Dick 10 wurden, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, nach der Rodung und vor der Weiterverarbeitungskette auf Poltern zwischengelagert, wo die Biomasse abtrocknete. Auf der **Versuchsfläche H2** trocknete das Material von Februar bis April 2011 in einer Zeitspanne von 59 Tagen. Dabei sank der Wassergehalt im Mittel über alle Sorten und den gesamten Biomassestapel von 43,92% auf 32,95%. Dies entspricht einem Wasserentzug von 0,186% pro Trocknungstag [%*d⁻¹].

Das Rodungsholz der **Parzelle Dick 10** wurde nach der Rodung ebenfalls gepoltet und bis zur Weiterverarbeitung zwischengelagert. Die Lagerzeit lag zwischen dem 28.02. und dem 29.11.2011. Daraus ergibt sich eine Trocknungsperiode von 274 Tagen. In dieser Zeit trockneten die Obstbäume von 42,38% auf 36,72%. Aus diesen Daten kann ein Wasserentzug von 0,021%*d⁻¹ errechnet werden. Auffällig ist, dass trotz der vierfachen Trocknungszeit der Bäume auf Dick 10 der Restwassergehalt mit 36,72% höher liegt als der der Bäume auf H2 (32,95%). Der Trocknungsbeginn beider Versuche war im Februar 2011. Das Ende der Untersuchungen lag dagegen auf der Fläche H2 im April und auf Dick 10 Ende November.

Um den **Trocknungsverlauf von Ganzbäumen** im jahreszeitlichen Verlauf genauer zu untersuchen, wurde ein Versuch mit Pappel- und Weidenruten angelegt. Zu Beginn der Wassergehaltsanalysen ab Dezember sank dieser in den Varianten „Pappel“ und „Weide“ marginal. Eine Trocknung setzte erst ab April ein. Ab diesem Zeitpunkt kam es zu einer sprunghaften Abnahme des Wassergehalts bis zum Ende der Versuchsanstellung am 28.06.2011. Dies wird in der Abbildung 4-25 deutlich. Die Pappelruten hatten zu Beginn der Trocknungsversuche einen höheren mittleren Wassergehalt von 50% gegenüber den Weidenruten von 48%. Am Ende der Versuche wiesen die Pappeln mit 25% Restwassergehalt einen deutlich niedrigeren Wert als die Weidenruten mit 32% auf. Der Wasserentzug pro Tag kann nach 202 Trocknungstagen für die Variante Pappel mit $0,124\% \cdot d^{-1}$ und für die Weiden mit $0,079\% \cdot d^{-1}$ angegeben werden.

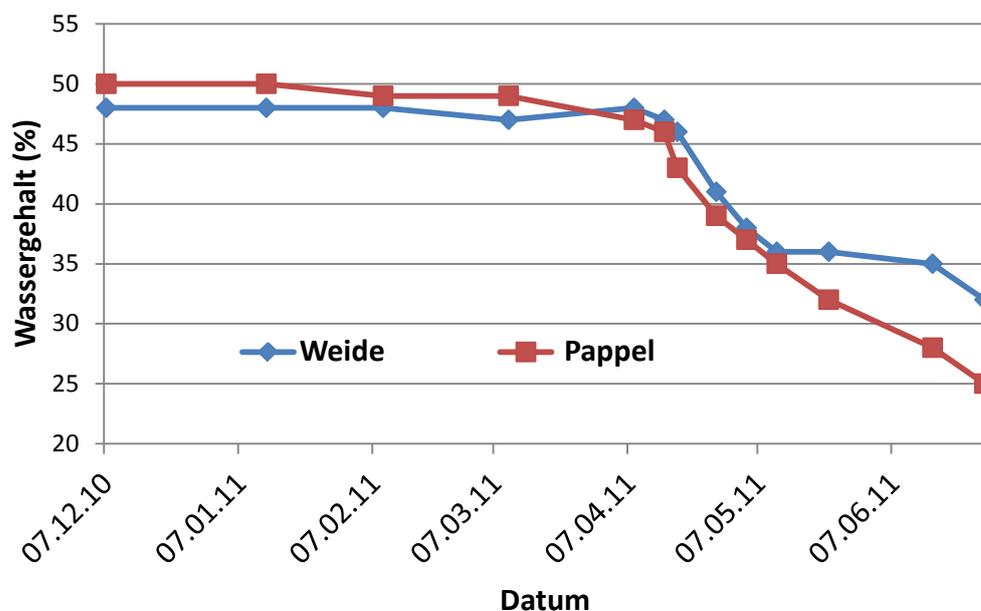


Abbildung 4-25: Trocknungsverlauf von aufgepolterten Weiden- und Pappelruten am Campus Klein-Altendorf (n=3) (verändert nach WINZER, 2012)

4.3.2 Ballentrocknung

Die Ballentrocknung ist eine Form der Festbrennstofftrocknung. Die Holzballen werden vom BioBaler produziert und bestehen aus grob zerkleinerten Holzstücken in einer Rundballenform. Damit ist die Ballentrocknung in der Systematik zwischen der Ganzbaum- und Hackschnitzeltrocknung einzuordnen. Die Analysen zum Trocknungsverhalten der BioBaler-Ballen erfolgten am Standort Klein-Altendorf und bei der Firma Jenz aus Petershagen im Mindener Land. Das Agrarholz stammte aus Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln und Weiden, da wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben eine Produktion von Ballen aus Obstholz nicht erfolgreich war.

Am Standort Klein-Altendorf konnte eine sehr starke Wasserabnahme zwischen der ersten (24.02.2011) und zweiten (29.04.2011) Wassergehaltsanalyse von 53,33 auf 9,95% festgestellt werden (Abbildung 4-26). Zur dritten Analyse am 01.07.2011 stieg der Wassergehalt wieder auf 15,10% an. Die Standardabweichung des dritten Probentermins stieg im Verhältnis zu den ersten beiden Terminen ebenfalls an. Alle Wassergehalte unterschieden sich signifikant.

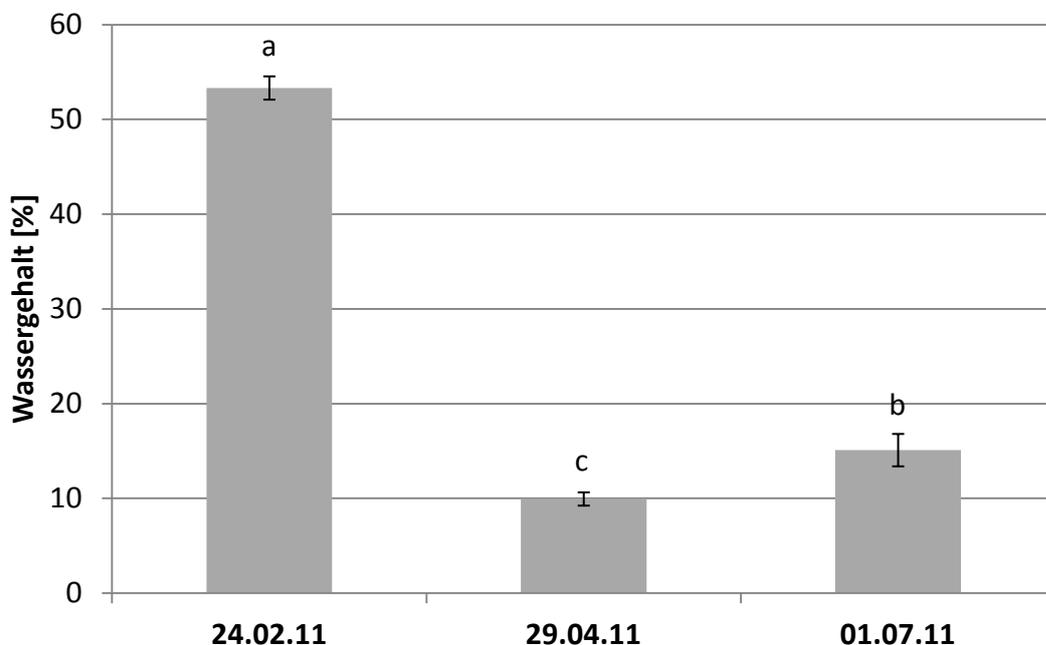


Abbildung 4-26: Trocknungsverlauf von Biomasseballen am Standort Klein-Altendorf (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$) (verändert nach VON GLISCZYNSKI, 2011)

Am Standort Petershagen, entwickelten sich die Wassergehalte ähnlich (Abbildung 4-27). Die Versuche begannen jedoch fast drei Monate früher am 07.12.2010 bei einem mittleren Wassergehalt von 52,02%. Bereits zwei Wintermonate später, am 07.02.2011, konnte ein absinken des Wassergehalts auf 36,92% dokumentiert werden. Bis Ende März 2011 trockneten die Ballen weiter auf 14,72%. Am Ende der Versuchszeit am 28.06.2011 erreichten die Ballen einen Restwassergehalt von 12,31%. Alle Versuchstermine unterschieden sich signifikant voneinander bei niedrigen Standardabweichungen zwischen 0,44 und 0,75%.

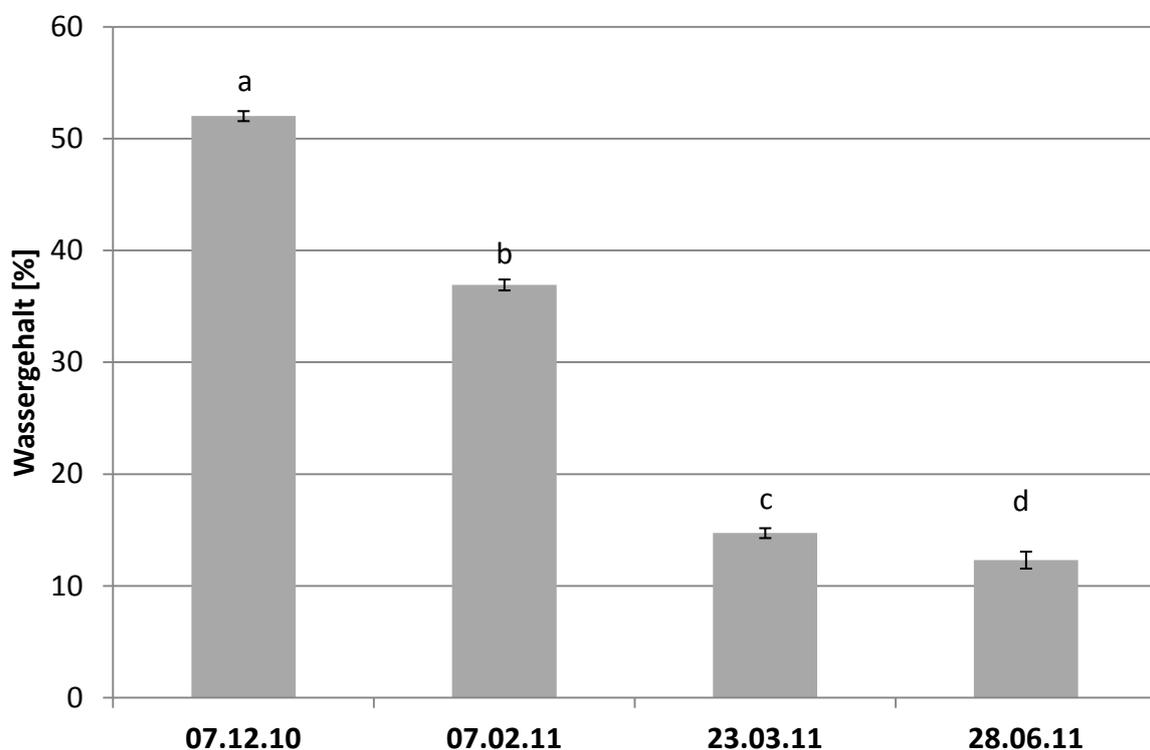


Abbildung 4-27: Trocknungsverlauf von Biomasseballen am Standort Petershagen (Signifikanz: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$) (verändert nach von GLISCZYNSKI, 2011)

Für die Versuche kann der Wasserentzug pro Tag errechnet werden. Dieser kann für den Standort Klein-Altendorf mit $0,240\% \cdot d^{-1}$ bei einer Trocknungszeit von 159 Tagen angegeben werden, wobei der Wassergehaltsanstieg am letzten Probenstermin mit berücksichtigt wurde. Am Standort Petershagen wurde über 202 Tage der Trocknungsverlauf beobachtet. In dieser Zeit verringerte sich der Wassergehalt um 39,71%, was einen Wasserentzug pro Tag von $0,197\% \cdot d^{-1}$ ergibt.

4.3.3 Hackschnitzeltrocknung

Die Trocknung von Hackschnitzeln wurde anhand von zwei Varianten getestet. Zum einen wurde das Trockenverhalten und die Haufwerktemperatur an einer überdachten Miete (Miete Dach) und zum anderen an einer Miete mit einer Strohschutzvliesabdeckung (Miete Vlies) untersucht. An der Miete Dach wurden jeweils 6 Messpunkte an der Vorderseite und Oberseite nach dem in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Schema verteilt.

Die **Temperaturverläufe** an der Ober- und Vorderseite der Variante **Miete Dach** unterscheiden sich geringfügig. Die gemittelten Temperaturen der 6 Messpunkte besitzen einen maximalen Unterschied von 1,5 K zwischen Ober- und Vorderseite. Weiterhin unterscheidet sich die Haufwerktemperatur nur geringfügig von der Außentemperatur. Eine Ausnahme bildet hierbei der erste Messtermin vom 22.04.2011, an dem die Haufwerktemperatur ca. 22 K über der Außentemperatur lag. Dies ist ein Indiz, dass es zum ersten Messtermin, der kurz nach der Einlagerung der Miete durchgeführt wurde, zu einer Selbsterwärmung im Haufwerk kam. Zum zweiten Messtermin (07.02.2012) lagen Haufwerk- und Außentemperatur fast auf einem Niveau.

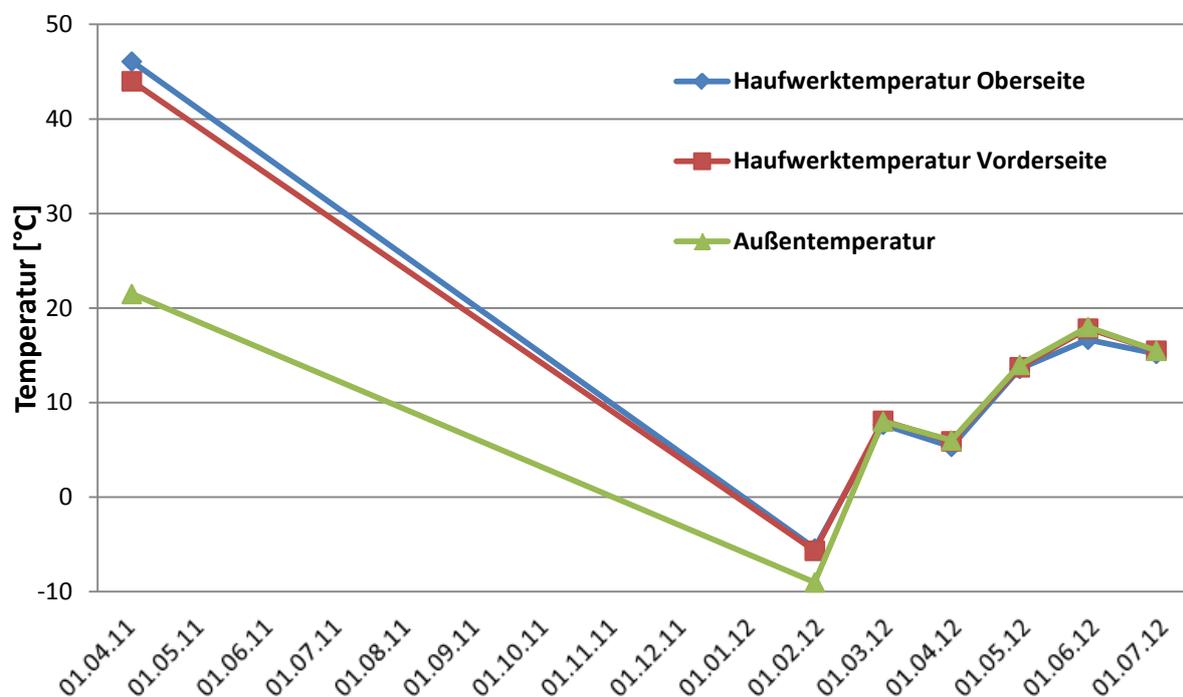


Abbildung 4-28: Verlauf der Haufwerktemperaturen an der Ober- und Vorderseite der Miete Dach im Vergleich zur Außentemperatur. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei -10°C ($n=6$)

Im Vergleich der Verläufe der **Wassergehalte** zwischen der **Mietenoberseite und –vorderseite** können ebenfalls nur geringe Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 4-29). Zu Beginn der Messreihe und vor allem am zweiten Messtermin lag der Wassergehalt an der Mietenoberseite um ca. 2-4% höher als an der Vorderseite des Haufwerks. Zum dritten Messtermin stiegen die Wassergehalte wieder etwas an. Besonders auffällig ist der Anstieg des Wassergehalts an der Vorderseite der Miete von 23,25 auf 31,17% zwischen dem zweiten und dritten Messtermin. Danach glichen sich die Wassergehalte der Mietenoberseite und –vorderseite an. Zum letzten Termin ist nochmal ein geringer Anstieg des Wassergehalts an der Mietenoberseite zu erkennen. Die Trocknungsrate pro Tag kann über die gesamte Versuchszeit von 451 Tagen mit $0,009\% \cdot d^{-1}$ für die Oberseite und mit $0,010\% \cdot d^{-1}$ für die Vorderseite angegeben werden. Auffällig bei diesem Versuch sind die hohen Standardabweichungen, welche auf partielle Feuchtenester im Haufwerk hinweisen.

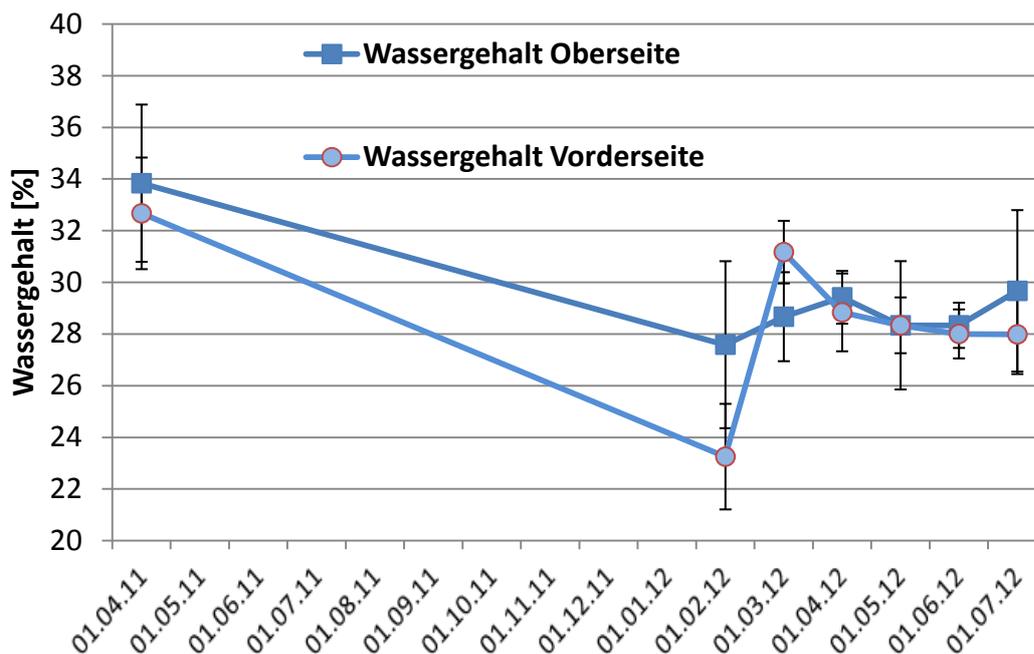


Abbildung 4-29: Verlauf der Wassergehalte an der Ober- und Vorderseite der Miete Dach. Ordinatenschnittstelle bei 20% (n=3)

An der **Feldmiete**, welche mit einem **Strohschutzvlies** abgedeckt war und in der Zeit vom 13.12.2011 bis zum 16.07.2012 auf ihren Trocknungsverlauf untersucht wurde, konnten kaum Unterschiede zwischen der **Haufwerktemperatur** und der **Außentemperatur** festgestellt werden (Abbildung 4-30). An einigen Messterminen lag die Außentemperatur knapp unter der Temperatur im inneren der Hackschnitzelmiete. Dies ist jedoch weniger durch die Selbsterwärmung der Miete zu erklären, sondern durch die Tageszeit, an der die Messungen durchgeführt wurden. Diese war stets in den Morgenstunden. Durch die isolierende Wirkung der Schüttung tritt der Ausgleich zwischen Außen- und Innentemperatur nach kühlen Nächten verzögert ein. Auch eine Selbsterwärmung der Miete kurz nach deren Anlage und dem Zerkleinern des Materials konnte nicht festgestellt werden.

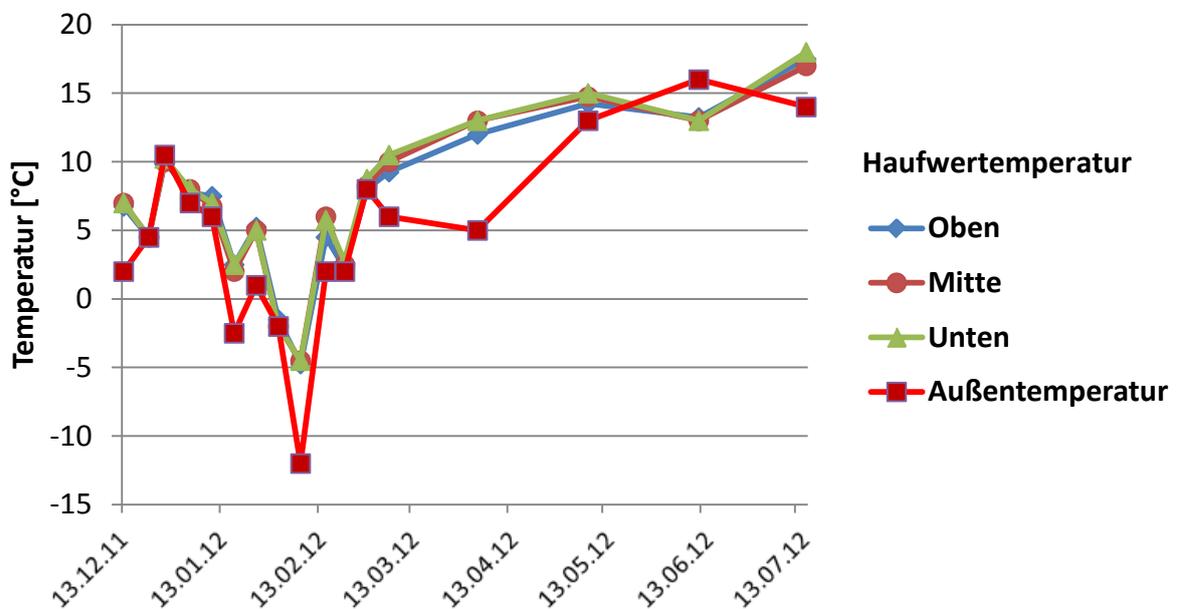


Abbildung 4-30: Verlauf der Haufwerktemperaturen im Vergleich zur Außentemperatur in der Miete Vlies. Die Haufwerktemperaturen wurden auf drei Höhen an der Miete ermittelt. Ordinatenachse schneidet Abszisse bei -15°C (n=2)

Die **Wassergehalte** der mit **Vlies** bedeckten Miete wiesen zu Versuchsbeginn erhebliche Schwankungen auf. Die Messstellen waren in vertikaler Linie auf drei Höhen verteilt. Zu Versuchsbeginn bis Ende Januar lag der durchschnittliche Wassergehalt im oberen Bereich der Miete um ca. 2-6% über dem der mittleren und unteren Messstelle. Ab Februar sank der Wassergehalt an der oberen Messstelle stärker als an der mittleren und unteren. Zu Versuchsende im Juni 2012 lag der Wassergehalt aller drei Messpunkte auf einem gleichmäßigen Niveau zwischen 26 und 27%. Die Trocknungsrate pro Tag wurde für die Versuchszeit von 216 Tagen auf $0,032\% \cdot d^{-1}$ berechnet.

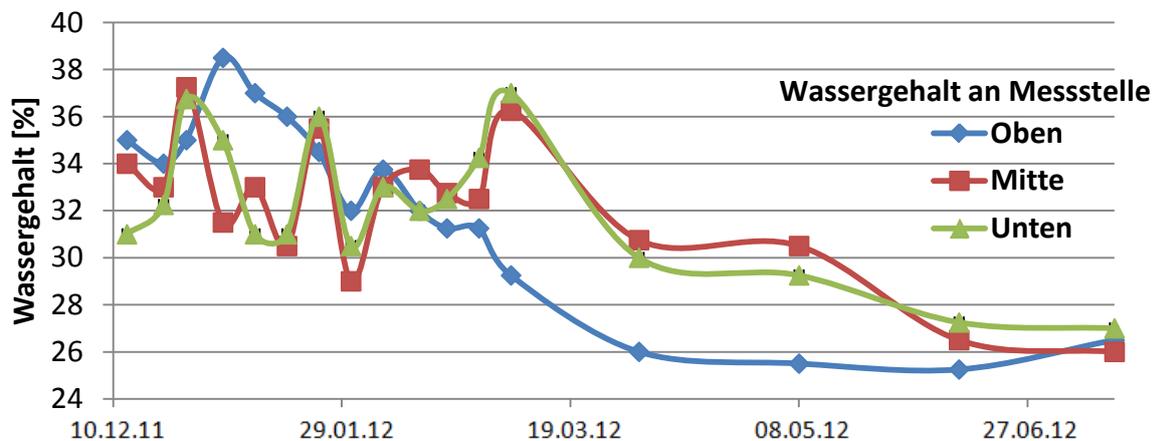


Abbildung 4-31: Verlauf der Wassergehalte an den drei Messstellen im unteren, mittleren und oberen Bereich der Miete Vlies. Ordinatennachse schneidet Abszisse bei 24% (n=2)

Eine Zusammenfassung und Vergleich der Trocknungsmethoden und –ergebnisse erfolgt in der Diskussion (Kapitel 5.3).

4.4 Brikettierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den Versuchen im Themenbereich der Brikettierung vorgestellt. Zunächst werden die Vorversuche dargestellt. Weiterhin wird auf die Auswirkungen einer Pressdruckveränderung eingegangen. Im dritten Schritt wird der Energieverbrauch des Brikettiervorgangs quantifiziert. In den letzten drei Abschnitten wird der Einfluss der herkömmlichen und entwickelten Abkühlstrecken auf die Brikettqualität erläutert.

4.4.1 Vorversuche

Die Vorversuche ergaben, dass das gesammelte Schnittholz (Kapitel 4.1) mit Hilfe der Aufbereitungskette Zerkleinern und Sieben, welche in Abschnitt 3.5.2 beschrieben wurde, als Eingangsmaterial in die verwendete Brikettpresse (BrikStar C, Höcker Polytechnik) geeignet ist. Ein Kompaktieren des Materials war grundsätzlich mit den Standardmaschineneinstellungen durchführbar.

In den Tabellen 8-1 bis 8-3 im Anhang sind die Eigenschaften der im Vorversuch produzierten Briketts aufgeführt. Dabei wurde zunächst ohne Abkühlstrecke (Tabelle 8-1) und dann in zwei Serien mit Abkühlstrecke (Tabelle 8-2 und 8-3) brikettiert. Bei allen drei Brikettierserien war der Wassergehalt im Mittel gleich (12,5%). Weiterhin waren die Länge der Briketts (48-77 mm), sowie das Gewicht (125-263 g) in allen drei Varianten sehr ähnlich.

Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Serie 2 und 3, die mit gleichen Maschineneinstellungen und der Abkühlstrecke nur an zwei verschiedenen Tagen produziert wurden, dieselben Briketteigenschaften hervorbringt. Somit können mit der Brikettierung reproduzierbare Versuchsstrecken gefahren werden. Zwischen der ersten Serie ohne Abkühlstrecke und der Serie 2 und 3 mit Abkühlstrecke sind jedoch Unterschiede in den Briketteigenschaften ersichtlich.

Die Brikettierung besitzt einen Presskanal mit einem Durchmesser von 65 mm. Beim Austritt der Briketts aus dem Presskanal dehnen sich diese auf Grund der Reibungswärme, des Wassergehalts und des Fehlens der Gegenkraft gegen den Pressdruck aus. Bei der ersten Serie liegt der durchschnittliche Durchmesser der Briketts bei 68,48 mm nach der Pressung.

Die Schwankungsbreite lag zwischen 68,00 und 69,00 mm. Dagegen fiel die Ausdehnung der Briketts in den Serien zwei und drei mit Abkühlstrecke geringer aus. Diese lag im Mittel bei 67,21 mm bzw. 67,22 mm und in einem Bereich von 67,00 – 68,00 mm. Damit war die Ausdehnung der Briketts im Schnitt gut einen Millimeter geringer als bei der Variante ohne Abkühlstrecke. Dies wird auch im Vergleich der Partikeldichte deutlich. Mit einem Anstieg des Volumens bei gleichem Gewicht muss die Dichte sinken. Bei der Serie 1 liegt die mittlere Partikeldichte bei $0,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Bei der Serie 2 und 3 erreicht diese einen Wert von $0,94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Bei der Betrachtung der Extremwerte (kleinste Partikeldichte) ist ein deutlicher Anstieg der Partikeldichte durch die Montage der Abkühlstrecke zu beobachten.

Da mit den vorhandenen Maschineneinstellungen und einer montierten Abkühlstrecke die in der Norm CEN/TS 14 961-3 geforderte Partikeldichte von $>0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ nur knapp erreicht wurde, wurde ein Folgeversuch angesetzt. Dieser wird in Kapitel 4.4.2 beschrieben.

4.4.2 Veränderung des Pressdrucks

In diesem Versuch wurde der Pressdruck der Brikettierung verändert. Dabei wurde dieser um 2 mPa auf 14 mPa erhöht.

Bezüglich der unerwünschten Ausdehnung der Briketts aus den Vorversuchen konnte durch die Pressdruckerhöhung eine weitere Verbesserung verzeichnet werden. Mit erhöhtem Pressdruck (14 mPa) konnte ein mittlerer Brikettdurchmesser von 67 mm festgestellt werden, wobei zwei getestete Briketts einen Durchmesser von 66 mm, zwei einen von 68 mm und sechs einen von 67 mm aufwiesen. In einer weiteren Wiederholung mit 14 mPa Pressdruck konnte ein mittlerer Durchmesser von 66,8 mm bestimmt werden, da drei Briketts einen Durchmesser von 66 mm und nur noch einer einen von 68 mm aufwiesen. Damit konnte die Ausdehnung der Briketts durch die Erhöhung des Pressdrucks weiter verringert werden.

Bezüglich der Partikeldichte konnte auch eine Verbesserung der Briketteigenschaft durch die Pressdruckerhöhung gemessen werden. Die mittlere Partikeldichte kann für die beiden Serien mit 14 mPa Pressdruck mit $1,08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Stabw. $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) angegeben werden. Auch der Partikeldichtebereich beider Serien war gleich und lag zwischen 1,02 und

1,15 g*cm⁻³. Damit entsprachen alle Briketts der Normanforderung der CEN/TS 14 961-3 bezüglich der Partikeldichte.

4.4.3 Energiebedarf für Brikettierung

Bei der Betrachtung von Veredelungsschritten für Biomassen, wie beispielsweise der Brikettierung, ist der aufzuwendende Energieinput ein maßgebliches Bewertungskriterium. Um diesen zu quantifizieren wurde an der Brikettierung eine Leistungsmessung durchgeführt. Anschließend wurde die Leistung über die Zeit integriert, um den Energieverbrauch anzugeben. Dabei wurde die Brikettierung mit Abkühlstrecke und den Maschineneinstellungen aus Kapitel 4.4.2 betrieben. Es wurden drei Serien mit Obstbaumschnittholz als Eingangsmaterial gemessen. In Tabelle 4-8 sind die Energieverbräuche für die Probenmassen, sowie der hochgerechneten Energieverbrauch pro Tonne aufgezeichnet.

Tabelle 4-8: Energiebedarf für den Prozessschritt der Brikettierung mit montierter Abkühlstrecke

Versuchs-wiederholung	Masse [kg]	Energiebedarf [kWh]	spezifischer Energieverbrauch [kWh*t ⁻¹]
1	9,33	0,542	58,09
2	9,41	0,541	57,49
3	8,47	0,505	59,62

Der durchschnittliche Energieverbrauch für die Brikettierung von einer Tonne Obstbaumschnittholz beträgt demnach 58,40 kWh (Stabw. 1,10 kWh). Bei einem aktuellen Strompreis von 0,2541 €*kWh⁻¹ (ENERGY.EU, 2012) ergibt dies Stromkosten von ca. 15 € pro Tonne Obstbaumschnittholz.

4.4.4 Temperaturverlauf an der Abkühlstrecke

Mit dem vorliegenden Versuch soll die Wirkung der Abkühlstrecke quantifiziert werden. Weiterhin kann anhand der Oberflächentemperatur der Briketts kurz nach dem Pressen eine Einschätzung über die Verflüssigung des Lignins, der sogenannten Verglasung, gegeben werden. Als letztes gibt dieser Versuch Aufschluss über die benötigte Zeit, die die Brikettierung zum Warmlaufen braucht. Erst ab diesem Zeitpunkt können reproduzierbare Ergebnisse ermittelt werden. Um die gewünschten Aussagen treffen zu können wurden Messstellen an der Brikettierung und der Abkühlstrecke festgelegt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4-32 dargestellt. Die Außentemperatur und damit Starttemperatur aller Messungen war 20°C, weswegen die Ordinate des Diagramms bei 20°C beginnt.

Die Messstelle M1 lag zwischen der Stopfereinheit und dem Klemmzylinder der Brikettierung. An dieser konnten die höchsten Temperaturen gemessen werden. Die Temperatur stieg in den ersten 10 Minuten nach Versuchsbeginn stark an. Danach flachte der Verlauf etwas ab und erreichte nach ca. 30 Minuten einen fast konstanten Wert von 75 - 78°C. An diesem Messpunkt sind die höchsten Temperaturen zu finden, da dort die Presseinheit die Briketts formt und so durch Reibung viel Wärme entsteht. Die zweite Messstelle (M2) befand sich am Ende des Presskanals im Übergang zur Abkühlstrecke. An dieser Stelle, wie auch an den Messpunkten 3 bis 5, zeigte der Temperaturverlauf einen linearen Anstieg innerhalb von 40 Minuten nach dem Start der Maschine (Abbildung 4-32). An der Messstelle M2 stieg die Temperatur in dieser Zeit von 20 auf 37°C und blieb bis zum Versuchsende zwischen 37 und 39°C fast konstant. An den Messstellen M3, M4 und M5, welche auf der Abkühlstrecke lagen, zeigten die gemessenen Temperaturen eine geringe Streubreite. Die Temperatur erhöhte sich in den ersten 40 Minuten um ca. 10 K auf 30°C. Danach blieben die Temperaturen in einem Bereich von 30 - 33°C. Die Temperatur der Abkühlstrecke resultiert aus der von den Briketts abgegebenen Wärme und zum anderen aus der entstehenden Reibung bei der Beförderung der Briketts durch die Abkühlstrecke. Gleichzeitig wird ein Teil der Wärme durch die Konvektion von der Abkühlstrecke an die Umgebungsluft übertragen.

Die Oberflächentemperatur der Briketts wurde an zwei Messstellen erfasst (BT1 und BT2) und ist in der Abbildung 4-32 durch die roten Graphen dargestellt. Dabei befand sich der

Messpunkt BT1, wo das Brikett erstmals beim Austritt aus dem Presskanal sichtbar wird, kurz bevor es in die Abkühlstrecke hinein wechselt. Die Temperatur BT2 wurde beim Austritt der Briketts am Ende der Abkühlstrecke erfasst. Die Briketttemperaturen BT1 und BT2 zeigen einen ähnlich starken Temperaturanstieg, wie die Messstelle M1. Allerdings flacht dieser bereits nach 10 Minuten bei einer Temperatur an BT1 von 40°C und BT2 von 22°C stark ab. Dabei ist zu erkennen, dass die Temperaturdifferenz bereits nach 10 bis 15 Minuten nach Versuchsbeginn zwischen BT1 und BT2 konstant bei 7°C bleibt. In den ersten 10 Minuten des Versuchs war die Temperaturdifferenz doppelt so hoch bei ca. 15°C. Zu erklären ist dies durch den anfänglich höheren Temperaturgradienten zwischen Briketttemperatur und Temperatur der Abkühlstrecke. Mit zunehmender Erwärmung der Abkühlstrecke nimmt der Gradient ab und die Wärmeübertragung vom Brikett auf die Abkühlstrecke wird gebremst.

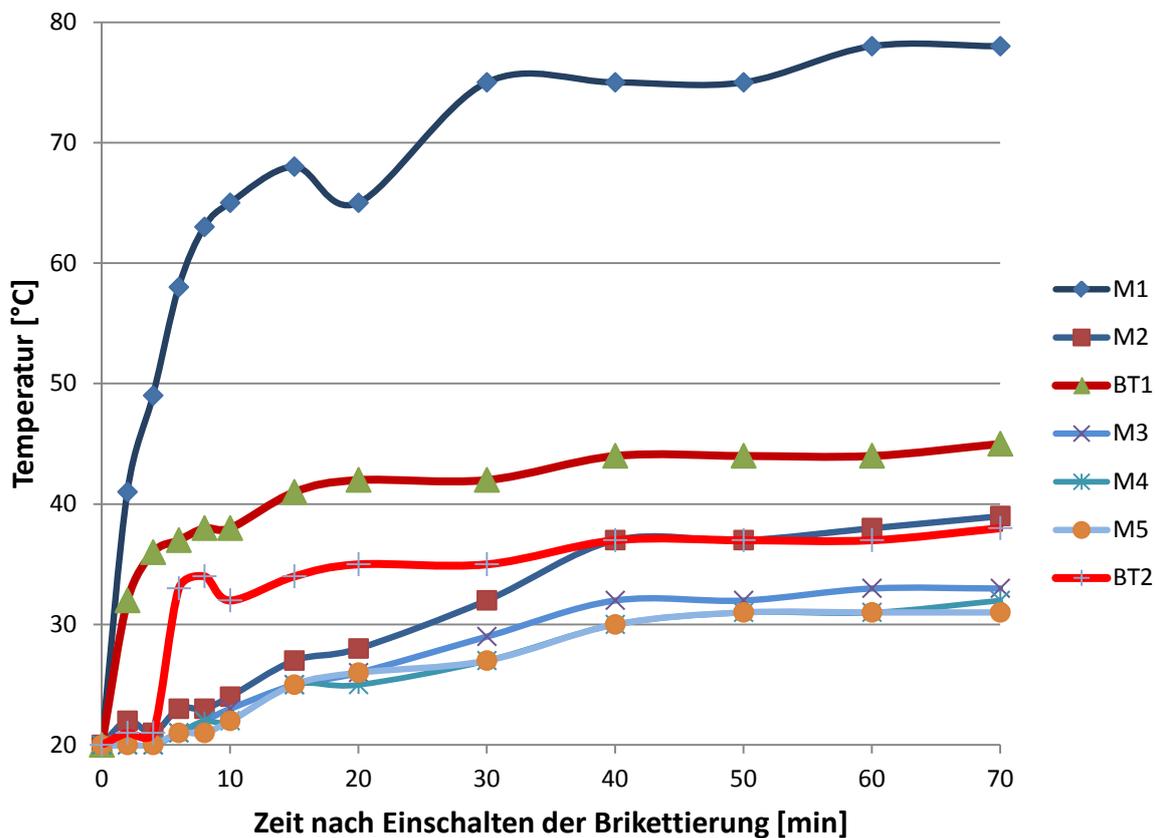


Abbildung 4-32: Temperaturverläufe an der Abkühlstrecke und an den Briketts (rote Linien: Briketttemperatur (BT1 und BT2); blaue Linien: Messstellentemperatur (M1-M5); je heller eine Linie, umso größer der Abstand von der Presseinheit der Brikettierung, Raumtemperatur 20°C. Ordinatennachse schneidet die Abszisse bei 20°C

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Abkühlstrecke die Oberflächentemperatur des Briketts senkt. Gleichzeitig wird das Brikett während des Abkühlvorgangs unter Spannung in der Strecke gehalten, sodass die Form beibehalten wird. Durch die geringen Wärmegradienten ist der Kühleffekt jedoch eingeschränkt. Eine Verflüssigung des Lignins setzt bei ca. 70°C - 80°C ein. Damit beginnt eine Verglasung der Briketts. Die Warmlaufphase bis zum Erreichen eines gleichmäßigen Temperaturniveaus beträgt ca. 30-40 Minuten.

4.4.5 Bau einer wassergekühlten Abkühlstrecke

Aus den Erkenntnissen der Vorversuchen und der Temperaturverläufe an der Abkühlstrecke, wurde die Idee entwickelt, über ein optimiertes Kühlsystem nach der Brikettierung die Brikettqualität zu erhöhen. Durch die Erwärmung bei der Brikettierung verflüssigt sich, wie in Kapitel 2.4 erläutert, das Lignin. Kühlt das Brikett aus, verfestigt sich das Lignin wieder und die Form wird beibehalten. Die Oberflächenstruktur wird glatt. Dieser Vorgang wird auch bei der Holzpelletierung als „verglasen“ bezeichnet. Qualitätsfördernd ist, wenn der Pressling bei der Abkühlung in seiner Form gehalten wird. Untersucht wurde dieser Zusammenhang für Briketts bisher nicht.

Die für die Brikettierung vom Hersteller gelieferte Abkühlstrecke, im Folgenden nur noch als passive Abkühlstrecke bezeichnet, kühlt das Brikett rein über die Konvektion. Dabei nimmt die passive Abkühlstrecke durch den Temperaturunterschied die Wärme vom Brikett ab und gibt diese wiederum an die Umgebungsluft weiter. Je höher der Temperaturgradient ist, umso mehr Wärme kann abgeleitet werden (siehe auch Kapitel 4.4.4).

Um den Wärmeabfluss zu optimieren und damit eine schnellere Abkühlung des Briketts nach der Brikettierung in der Abkühlstrecke zu erreichen, wurde eine baugleiche Abkühlstrecke des Herstellers mit einer Wasserkühlung versehen. Eine solche Konstruktion ist bisher unbekannt. Dazu wurden auf die Abkühlstrecke Wassertaschen durch die Werkstatt am Campus Klein-Altendorf geschweißt. Durch diese wird mit dem Leitungswasserdruck das Wasser als Kühlmittel über die metallischen Oberflächen der Abkühlstrecke geführt und die Wärme abtransportiert. Abbildung 4-33 zeigt die wassergekühlte Abkühlstrecke, im Folgenden als aktive Abkühlstrecke bezeichnet, im Vergleich zur passiven Abkühlstrecke.



Abbildung 4-33:
Passive (montiert)
und aktive Abkühl-
strecken der
Brikettierung

4.4.6 Brikettiersuch mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke

Nach der Zerkleinerung und Siebung des Eingangsmaterials für den Brikettiersuch mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke, wurden die Holzbrennstoffe in einer **Siebanalyse** untersucht. Die in Abbildung 4-34 dargestellten Werte sind Mittelwerte von 8 Siebwiederholungen für das Holz von Obstbäumen, Paulownien und Akazien. Dabei zeigte das Akazienholz eine feinere Korngrößenverteilung als das Obstholz und die Paulownia. Das Obst- und Paulowniaholz unterscheidet sich in der Korngrößenverteilung nur geringfügig. Da die Prüfmaschine nur Siebe mit einer maximalen Maschenweite von 10 mm besitzt, wurde der Rückstand auf dem größten Sieb mittels Schieblehre vermessen. Der Korngrößenbereich aller Varianten kann damit zwischen 0 und 12 mm angegeben werden. Weiterhin ist anzumerken, dass 95% aller Teilchen in allen drei Varianten eine Korngröße unter 8 mm besitzen. Zudem fällt auf, dass das Paulowniaholz in der Siebfraction kleiner 0,63 mm nur 2,78% Massenanteil besitzt. Das Obst- und Akazienholz liegt mit 6,22% bzw. 6,44% deutlich höher in dieser Klasse.

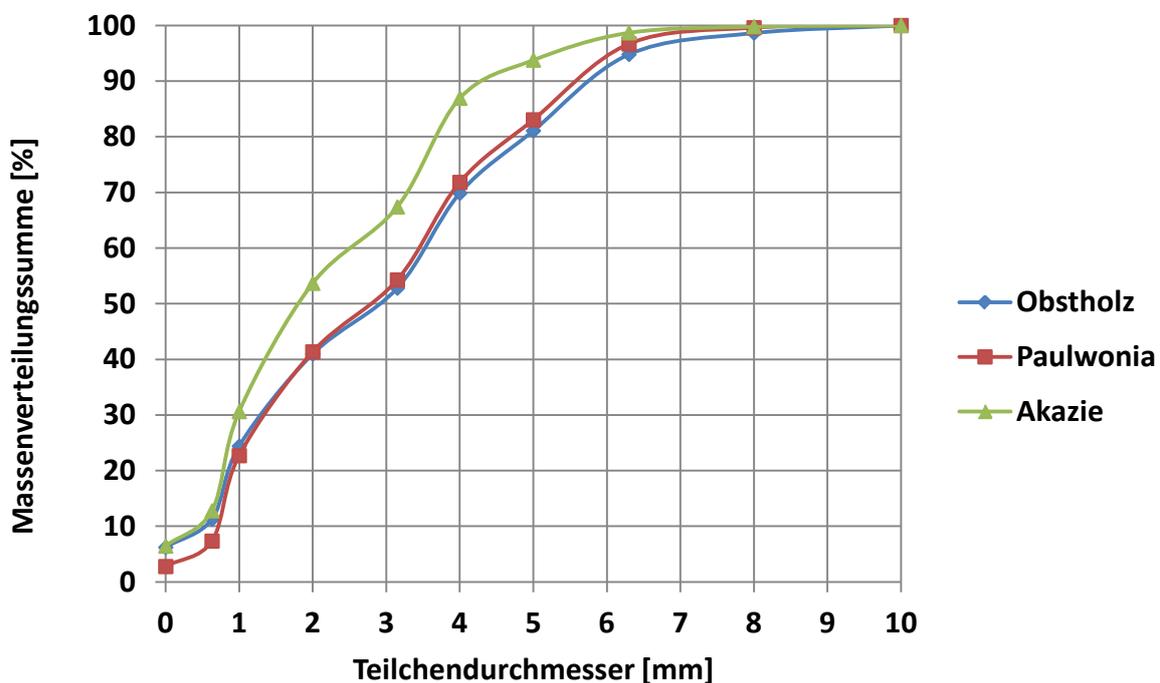


Abbildung 4-34: Siebanalyse der drei Eingangsmaterialien Obst-, Paulownien- und Akazienholz für den Brikettiersuch (n=8)

Die **Auswertungen der Temperaturen** am Presskanal (M1) nach einer Warmlaufphase von 40 Minuten ergaben, dass diese in den Varianten mit Akazienholz deutlich höher lagen, als in denen mit Obst- und Paulowniaholz (Tabelle 4-9). Die Temperatur an M1 stieg beim Akazienholz mit der aktiven und ohne Abkühlstrecke auf 90°C, mit der passiven auf 87°C. Dagegen erreichten die Obstholzvarianten nur eine Temperatur von 72 – 80°C. Die Paulowniavarianten lagen in einem Temperaturbereich von 78 - 85°C. Die Oberflächentemperaturen der Briketts, welche an der Messstelle BT1 ermittelt wurde, lag unter der Temperatur des Presskanals. Die Paulownia- und Akazienvarianten zeigten fast identische Oberflächentemperaturen von ca. 70°C. In der Obstholzvariante konnte eine ca. 10°C kühlere Oberflächentemperatur gemessen werden. Allgemein fällt bei den Ergebnissen an den Messstellen M1 und BT1 auf, dass die Temperaturen bei den Holzvarianten, die mit der passiven Abkühlstrecke erstellt wurden, geringer ausfielen als mit der aktiven und ohne Abkühlstrecke.

Bei der Auswertung der Kühlleistung der aktiven und passiven Abkühlstrecke zeigte sich, dass die aktive Abkühlstrecke in allen drei Holzarten eine stärkere Verminderung der Oberflächentemperatur erzielte (Tabelle 4-9). Die Temperaturabsenkung der passiven Abkühlstrecke lag in diesem Versuch über alle drei Holzarten bei 18 K, dagegen konnte bei der aktiven eine mittlere Kühlleistung von knapp 29 K ermittelt werden. Zu beachten ist allerdings, was dieses Ergebnis deutlich relativiert, dass die Oberflächentemperatur der Briketts beim Eingang in die passive Abkühlstrecke schon geringer war als bei der aktiven. Damit sinkt der Temperaturgradient.

Weiterhin soll festgehalten werden, dass die Oberflächentemperatur der Briketts mit beiden Abkühlstrecken gegenüber den Varianten ohne Abkühlstrecke deutlich reduziert wurde. Damit wird das Brikett bei den Varianten mit Abkühlstrecken bei einer tieferen Temperatur aus der formhaltenden Führung entlassen, als ohne Abkühlstrecke.

Tabelle 4-9: Temperaturen an den Messstellen M1 (Presskanal), BT 1 und BT 2 (Brikett) im Brikettiersversuch mit aktiver, passiver und ohne Abkühlstrecke

Holzart	Abkühlstrecke	Temperatur M1 [°C]	Temperatur BT 1 [°C]	Temperatur BT 2 [°C]	Differenz BT 2-BT 1 [K]
Obst	aktiv	80	60	38	22
	passiv	72	50	38	12
	ohne	75	63		
Paulownia	aktiv	85	70	37	33
	passiv	78	57	40	17
	ohne	82	70		
Akazie	aktiv	90	70	39	31
	passiv	87	65	40	25
	ohne	90	72		

Bei der Analyse der **Brennstoffeigenschaften der Briketts** wurden diese nicht nach den Abkühlstreckenvarianten aufgeteilt, da diese keinen Einfluss auf Wassergehalt, Aschegehalt und Brennwert besitzen. Alle drei Holzarten zeigten, dass die Normanforderung von <15% Wassergehalt erfüllt wurden. Dabei wurde beim Akazienholz der signifikant höchste Wassergehalt von durchschnittlich 12,23% gemessen. Das Obstholz wies den niedrigsten mittleren Wassergehalt mit 9,83%, jedoch die höchste Standardabweichung von 0,51% auf. Alle drei Varianten unterschieden sich signifikant voneinander (Abbildung 4-35).

Ein ebenfalls deutlichen und signifikanten Unterscheid wiesen alle drei Holzvarianten in den Aschegehalten auf. Dabei zeigt das Obstholz den höchsten gemittelten Aschegehalt von 10,95%. Mit 6,35% anorganischem Rückstand lag das Akazienholz im Mittelfeld der Aschegehalte. Den signifikant niedrigsten Aschegehalt wies das Paulowniaholz mit durchschnittlich 2,99% und erfüllte damit die geforderten maximalen 3% Aschegehalt der Brikettnorm CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz. Jedoch ist dies bei einer Standardabweichung von 0,15% kritisch zu betrachten (Abbildung 4-35).

Bei den Brennwerten übertreffen dagegen alle drei Varianten den geforderten Normwert der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz. Bei dieser Versuchsreihe zeigt sich zudem, wie schon beim Schnitt- und Rodungsholz, eine Abhängigkeit zwischen dem Aschegehalt und dem Brennwert. Die These, dass mit steigendem anorganischem Rückstand der Brennwert sinkt, bestätigt sich abermals mit diesem Versuch. Das Paulowniaholz zeigte einen extrem hohen Brennwert von durchschnittlich $21,17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dieser unterschied sich gegenüber dem Akazienholz tendenziell und im Vergleich zum Obstholz signifikant. Das Obstholz wies den geringsten mittleren Brennwert von $17,97 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ auf, unterschied sich jedoch nur tendenziell vom Akazienholz. Bei diesem konnte ein durchschnittlicher Brennwert von $19,12 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ gemessen werden.

Alle Ergebnisse zu den Brennstoffeigenschaften Wasser- und Aschegehalt, sowie dem Brennwert sind in Abbildung 4-35 zusammengefasst. Mit roten Linien sind die Normanforderungen der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz angegeben.

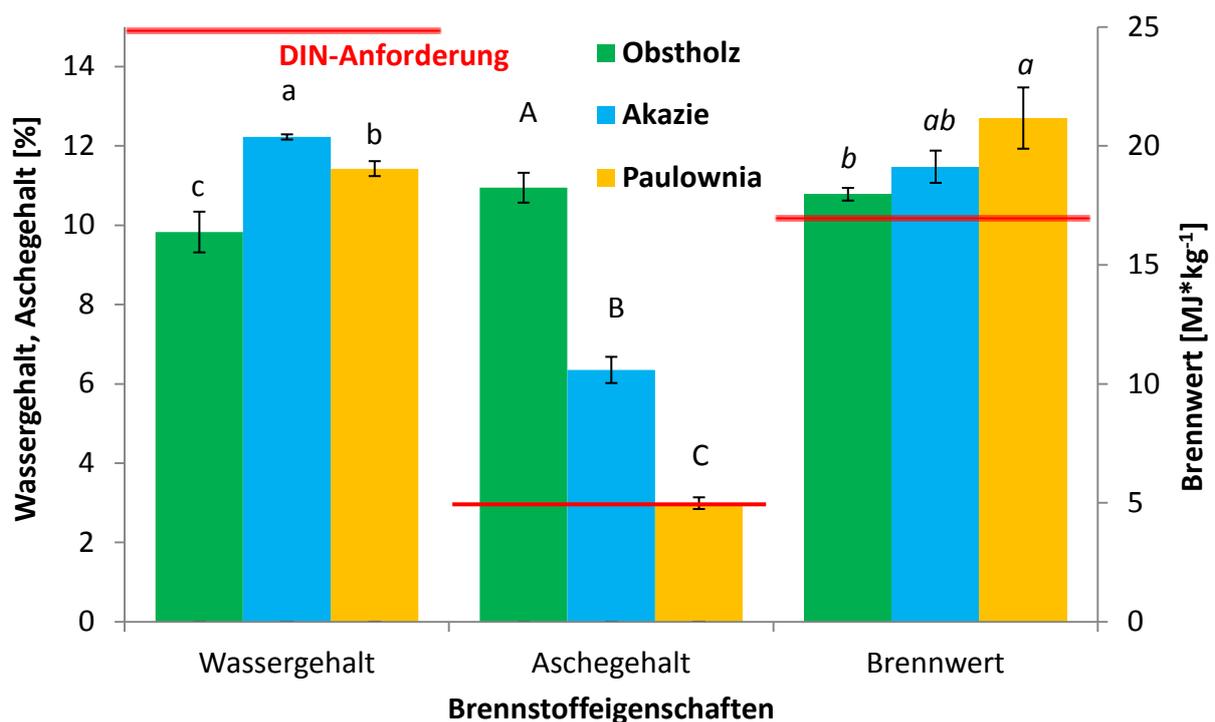


Abbildung 4-35: Brennstoffeigenschaften der Briketts aus Obst-, Akazien- und Paulowniaholz. Rote Linien markieren Normanforderungen der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Bei den Abriebfestigkeitstests wurde zum einen zwischen den eingesetzten Holzarten als auch nach den Abkühlstreckenvarianten unterschieden. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen tendenzielle Trends, statistisch sind diese nicht abzusichern. Tendenziell lässt sich festhalten, dass die Briketts, welche ohne Abkühlstrecke erzeugt wurden, eine geringere Abriebfestigkeit aufwiesen als die der aktiven und passiven Abkühlvarianten (Abbildung 4-36). Dabei zeigte die Variante „Obstholz ohne Abkühlstrecke“ die signifikant geringste Abriebfestigkeit von 92,91%. Bisher sind keine Grenzwerte für die Abriebfestigkeit in einer Norm festgelegt worden, jedoch kann dieser niedrige Wert als kritisch angesehen werden. Besitzt ein Brikett eine niedrige Abriebfestigkeit, verliert dieses besonders bei Ein- und Auslagerungsprozessen, sowie Umschlagmaßnahmen an Gewicht und loses, unerwünschtes Feinmaterial verbleibt zwischen den Briketts und am Boden der Lager. Die Holzarten Akazie und Paulownia haben ebenfalls in der Variante ohne Abkühlstrecke geringere Werte mit 94,22% und 94,70%, als die Varianten mit Abkühlstrecke. Die drei Varianten mit passiver und die drei mit aktiver Abkühlstrecke zeigten alle Abriebfestigkeiten um 97%. Ein tendenzieller Unterschied in den Varianten passive vs. aktive Abkühlstrecke konnte nur beim Obstholz festgestellt werden. Dabei zeigte die Variante Obst mit aktiver Abkühlstrecke eine Abriebfestigkeit von 97,04%, dagegen das Obstholz mit passiver Abkühlung einen Wert von 96,56%. Die signifikant höchsten Abriebfestigkeit in diesem Versuch wies zum einen die Variante Paulownia bei aktiver Abkühlstrecke mit 97,65% und die Variante Akazie mit passiver Abkühlstrecke mit 97,68% auf.

Besonders fiel bei den Ergebnissen auf, dass das Obstholz in allen Abkühlvarianten besonders hohe Standardabweichungen zeigte. Alle Abriebfestigkeiten aufgeteilt nach Holzarten und Abkühlvarianten können der Abbildung 4-36 mit dazugehörigen Standardabweichungen und Signifikanzen entnommen werden.

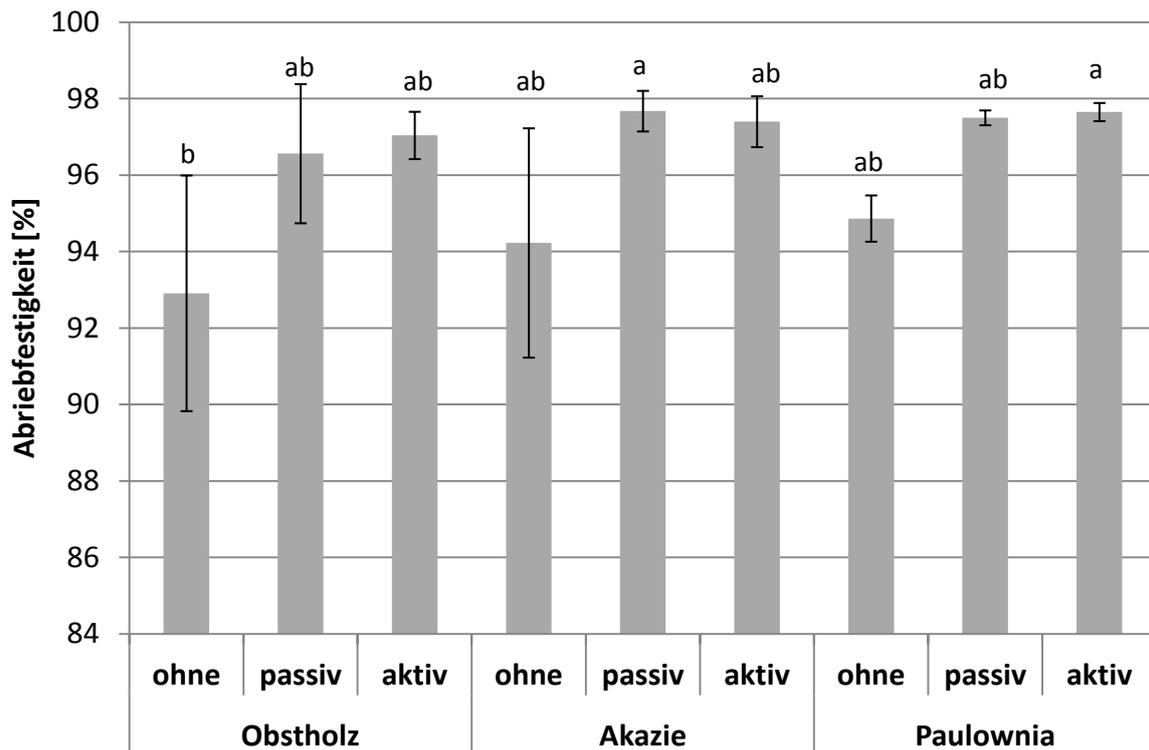


Abbildung 4-36: Abriebfestigkeit von Briketts. Varianten: Holzarten: Obst, Akazie und Paulownia; Abkühlstrecken: aktiv, passiv, ohne. Ordinatenachse schneidet die Abszisse bei 84% (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

Bei den Untersuchungen zur Dichte der Briketts konnten signifikante Unterschiede zwischen den Holzarten und den Abkühlvarianten festgestellt werden. Als Vergleichswert zu den ermittelten Ergebnissen dient die Normanforderung für die Partikeldichte von Briketts nach der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz von $>0,9 \text{ g*cm}^{-3}$.

Bei der Holzart Paulownia konnte mit den Maschineneinstellungen der verwendeten Brikettierung bei einem Druck von 14 mPa die geforderte Partikeldichte mit keiner der drei Abkühlvarianten erreicht werden. Die Dichte der Paulowniabriketts lag zwischen $0,86$ und $0,88 \text{ g*cm}^{-3}$. Damit konnten bei den Paulowniavarianten die signifikant geringsten Partikeldichten festgestellt werden. Das Obst- und Akazienholz konnte dagegen mit allen drei Abkühlvarianten zu Normkonformen Briketts bezüglich der Dichte kompaktiert werden.

Das Obst- und Akazienholz unterschied sich jeweils bei einer Abkühlvariante nur sehr gering. Größere Unterschiede konnten zwischen den drei Abkühlvarianten aktive, passive und ohne Abkühlstrecke festgestellt werden. Dabei weisen die Briketts aus Obstholz in der Variante

„aktiver Abkühlstrecke“ die höchsten gemessenen Partikeldichten mit durchschnittlich $1,09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ auf. Damit konnten tendenzielle Unterschiede zur Variante „passive Abkühlstrecke“ und signifikante Unterschiede zu Variante „ohne Abkühlstrecke“ beobachtet werden. Auch mit dem Akazienholz als Ausgangsmaterial für die Brikettierung konnte der Trend festgestellt werden. Mit $1,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ konnten in der Variante Akazienholz mit aktiver Abkühlstrecke tendenziell höhere Partikeldichten ermittelt werden, als in den Varianten „passive“ und „ohne Abkühlstrecke“ der gleichen Holzart.

Alle Partikeldichten mit dazugehörigen Standardabweichungen und berechneten Signifikanzen können der folgenden Grafik entnommen werden. Die rote Linie zeigt, wie in Abbildung 4-35, die Anforderung der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz an.

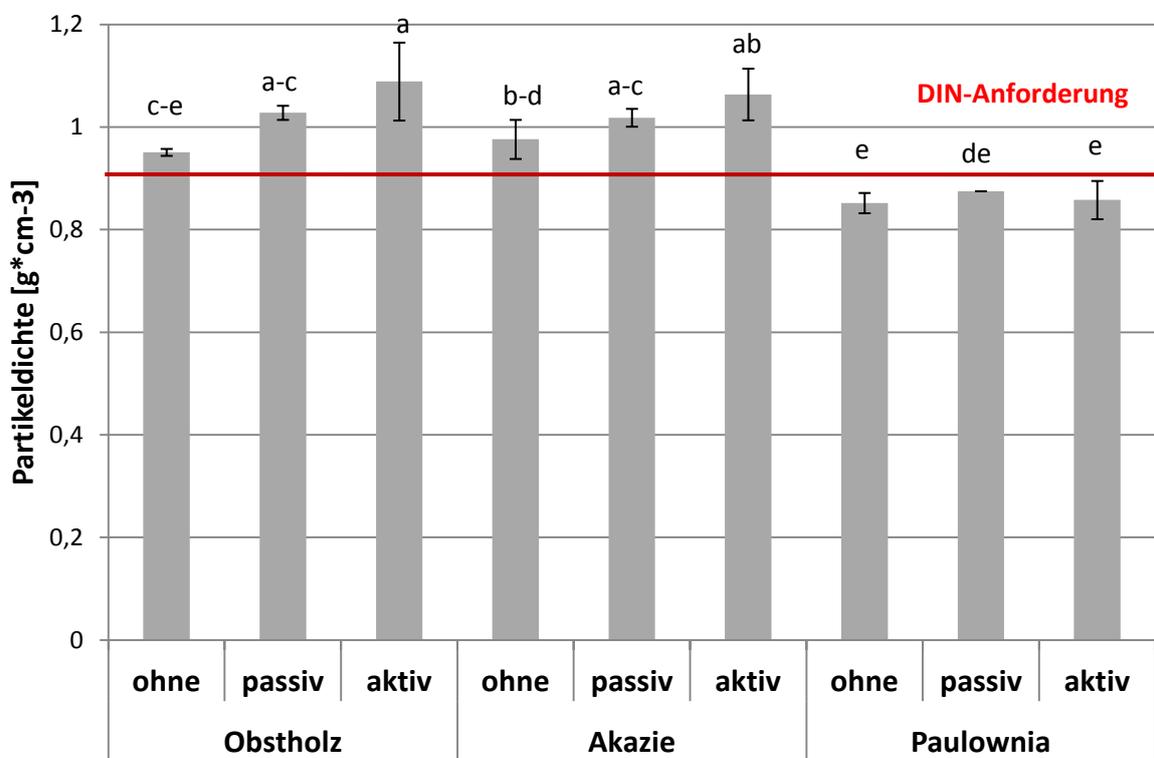


Abbildung 4-37: Partikeldichten von Briketts. Varianten: Holzarten: Obst, Akazie und Paulownia; Abkühlstrecken: aktiv, passiv, ohne. Rote Linie gibt die DIN-Anforderung der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz an (Signifikanzen: Tukey-HSD-Test, $\alpha \leq 0,05$; $n=3$)

5. Diskussion

5.1 Schnittholzpoteziale, deren Eignung zur energetischen Nutzung, sowie die Bereitstellung durch Bergetechnik

Die in Kapitel 4.1 vorgestellten Ergebnisse werden im Folgenden anhand der eingangs aufgestellten Arbeitshypothese diskutiert: „Die bisher ungenutzten Holzpotenziale aus dem jährlichen Ertragsschnitt von Obstplantagen können durch neue Schnittholzammeltechnik als Energieträger bereitgestellt werden“. Dazu werden das ermittelte Biomasseaufkommen und anschließend dessen qualitative Eigenschaften bewertet. Weiterhin sind eine Einordnung der technischen Parameter der Schnittholzammeltechnik und deren Einflüsse auf den Energieträger erforderlich.

Schnittholzpoteziale

Der **Schnittholzertrag** aus modernen Apfelplantagen auf der Unterlage M9 konnte im Durchschnitt mit $1,2 \text{ t TM} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ erstmals ermittelt werden. Bei den Ergebnissen zeigte sich, dass mit zunehmenden Bestandesalter die Trockenmasseerträge nicht signifikant anstiegen. Zwischen dem 5. und 12. Standjahr, also in der Obstertragsphase von Apfelbäumen, veränderte sich das Biomasseaufkommen kaum. Dieses ist wahrscheinlich eher abhängig von der angebauten Apfelsorte (bei gleicher Unterlage) und der jeweiligen Schnittstrategie des Obstbauern. Zu gleichen Aussagen kamen auch KROMER ET AL. (1982). In den Untersuchungen zeigten die Autoren, dass der Durchmesser der abgeschnittenen Äste in 6- bzw. 12-jährigen Spindelbüschen kaum Unterschiede aufwiesen. Dabei wurde ebenfalls die Ausführung der Schnitarbeiten als Variationsfaktor benannt. Ein weiterer Grund ist mit Sicherheit in den Witterungseinflüssen innerhalb der Vegetationsperiode gegeben, wie z.B. Blütenfrost und damit absterbende generative Organe. Sind diese verletzt wird weniger Energie für die Ausbildung der Früchte verbraucht. Das vegetative Wachstum wird angeregt, wodurch mehr einjährige Äste gebildet werden, die klassisch bei Schnittmaßnahmen entfernt werden (SNYDER UND MELO-ABREU, 2005). Weiterhin nehmen der Fruchtbehang sowie die daraus folgende Alternanz Einfluss auf das vegetative Wachstum. Über die Schnittmaßnahmen induziert der Anbauer ruhige Bäume und damit gleichmäßig hohe

Fruchterträge und- qualitäten (BAAB UND LAFER, 2005). Seine Schnittstrategie wird er dem Wuchsverhalten jährlich anpassen, weswegen die Schnittholzmasse schwankt. Aus dem Jahr 1984 ist eine Umfrage bekannt, bei der der Schnittholzanfall aus Kernobstbeständen ermittelt wurde. Dieser lag bei damaligen typischen mittelstark wachsenden Anlagen und 571 Bäume pro Hektar bei $0,5\text{-}5 \text{ t TM}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Durchschnittlich wurde für Heizöläquivalentberechnungen ein Wert von $1\text{-}2 \text{ t TM}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ angenommen (ZABELTITZ, 1984). Obwohl sich damals die Anbausysteme stark von den heutigen unterschieden, können relativ ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Das die heutigen Schnittholzerträge etwas geringer ausfallen ist durch die Veränderung der Unterlagen von starkwachsenden (bspw. MM109 oder Sämling) auf heute moderne schwachwachsende (M9) zu erklären (ATKINSON, 1983).

Der **Energiegehalt** des Schnittholzes kann aus den ermittelten Massen und dem mittleren Brennwert von $18,94 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ errechnet werden. Daraus ergibt sich eine theoretische Wärmemenge von $22.728 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Diese entspricht einem Heizöläquivalent von ca. $530 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ bei einem angenommenen Brennwert von $42,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ für Heizöl (DIN 51 603-1). Die Anbaufläche von Äpfeln in Deutschland umfasst ca. 36.000 ha (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2012). Daraus ergeben sich Heizöläquivalente von rund 19 Mio. Litern mit denen der Energiebedarf von 7.500 Haushalten gedeckt werden kann. Diese Energieressource ist besonders interessant, da sie in keiner Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion steht und bis auf die Sammeltechnik ohne zusätzlichen Energieinput genutzt werden kann. Abschläge müssen allerdings von den angegebenen Energiemengen berücksichtigt werden, da das Material nach der Bergung mit 35-41% relativ feucht ist. In typischen Verbrennungsanlagen für Biomasse wird das Material mit einem Wassergehalt zwischen 10-30% verbrannt (LWF, 2011). Dieser Sachverhalt und der Wirkungsgrad von Verbrennungsanlagen zwischen 90-94% verringern die tatsächlich nutzbare Energiemenge. Die tatsächlich verfügbare Wärmemenge beträgt aus den vorgenannten Gründen zwischen 83-85% der theoretischen Wärmemenge (LWF, 2011; BRÜGGER, 2013).

Brennstoffeigenschaften

Die **Brennstoffeigenschaften** des Schnittholzes wiesen überwiegend typische Merkmale für biogene Festbrennstoffe auf. Teilweise konnten jedoch Besonderheiten dokumentiert werden. Der klassische Ertragschnitt findet zum größten Teil in den arbeitsarmen Wintermonaten statt (BAAB UND LAFER, 2005). Dies besitzt den Vorteil, dass die Bäume

entlaubt sind. Die Blätter haben aufgrund der hohen Nähr- und Mineralstoffkonzentrationen negativen Einfluss auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften (HÄRDTLEIN ET AL., 2004). Vor allem hohe Chlor- und Kaliumgehalte der nicht lignocellulosehaltigen Organe, wie z.B. Blätter, führen zu Problemen bei der thermochemischen Umwandlung. Hohe Gehalte an Kalium und Chlor fördern die Korrosion an Oberflächen der Verbrennungsanlagen (HARTMANN, 2009c). Weiterhin steigen bei der Verbrennung von Gräsern oder Blättern der Kohlenmonoxidausstoß und der Feinstaubanteil im Rauchgas im Vergleich zu einer reinen Holzfeuerung um das 10- bis 100-fache an (CURTIS, 2002). Aus diesen Gründen und dem geringen Verholzungsgrad der Äste aus dem Sommerriss (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2) sollte dieser nicht für eine thermische Nutzung vorgesehen werden.

Ein weiterer Vorteil des Winterschnitts ist der etwas geringere Wassergehalt aufgrund der eingeschränkten physiologischen Aktivität der Pflanzen im Vergleich zu den Sommermonaten. In den Versuchen konnten Wassergehalte zwischen 35% und 41% gemessen werden. Zu beachten ist allerdings, dass diese Werte bei der Schnittholzbergung ermittelt wurden. Die Schnittholzbergung fand in den Versuchsjahren zwischen 2 bis 6 Wochen nach den Schnittmaßnahmen statt, in denen die Biomasse in den Fahrgassen trocknete. Diese Wassergehaltsabsenkung von geschätzten 2-10% ist grundsätzlich positiv zu betrachten, kann jedoch nicht weiter ausgedehnt werden, da in den Fahrgassen, die begrünt sind, im Frühjahr das Gras wächst. Dies hat zur Folge, dass das Schnittholz vom Gras überwachsen und eine Bergung erschwert wird. Weiterhin besteht die Gefahr, dass zu viele Grasbestandteile in den Brennstoff gelangen, was sich negativ auf Kohlenmonoxid- und Feinstaubausstoß auswirkt (CURTIS, 2002). Deswegen kann mit der Sammlung zugunsten einer Wassergehaltsabsenkung nicht zu lange gewartet werden. Ein Mulchen der Fahrgassen im Spätherbst ist bei einer geplanten Schnittholzbergung von Vorteil, damit im Frühjahr die Fahrgassenbegrünung verzögert aufwächst (OPITZ VON BOBERFELD, 1994).

Die Brennstoffeigenschaften Aschegehalt, Brennwert und die elementare Zusammensetzung des Schnittholzes stehen in Abhängigkeiten zueinander, weswegen diese zusammen diskutiert werden. Es konnten in den Versuchen Aschegehalte zwischen 3,83% bei der Variante Jonagold 2010 und 4,84% in der Sorte Jonagored 2012 ermittelt werden. Im Vergleich dazu besitzt nach HARTMANN (2009c) Buchen- und Fichtenholz mit Rinde einen Aschegehalt von 0,5% bzw. 0,6%. Damit ist nachgewiesen, dass Schnittholz im Vergleich zu

anderen holzartigen biogenen Festbrennstoffen einen 8-10-mal höheren Aschegehalt besitzt. Ähnlich hohe anorganische Rückstände, wie sie im Schnittholz ermittelt wurden, sind in reinen Rindenbestandteilen von Nadelhölzern (3,8%) oder einigen halmgutartigen Festbrennstoffen wie Roggen- (4,8%) oder Hanfstroh (4,8%), sowie Miscanthus (3,9%) zu finden (HARTMANN, 2009c). Die anorganischen Rückstände der Schnittholzvarianten unterschieden sich untereinander nicht signifikant. Auch die Variante Sortenmix 2012, die sich erst im 5. Standjahr befand, zeigte keinen höheren Aschegehalt. Dies ist dadurch zu erklären, dass beim Ertragsschnitt vorwiegend einjähriges Holz entnommen wird und so keine Korrelation zum Standalter bestehen kann (siehe auch Kapitel 2.2.2). Der allgemein hohe anorganische Rückstand beim Schnittholz ist durch den relativ hohen Rindenanteil in diesem Brennstoff zu erklären. Die Äste besitzen oft nur einen Durchmesser zwischen 5-25 mm. Diese Durchmesserspanne des Schnittholzes konnten auch von KROMER ET AL. (1982), WISSKIRCHEN (1968) und OTTO (1964) ermittelt werden. Da der innere Holzkern immer von der Rinde ummantelt ist, nimmt der Rindenanteil bei kleinem Durchmesser einen hohen Massenanteil ein. Somit steigt der Rindenanteil bei abnehmenden Astdurchmessern (KENNEY ET AL., 1990). Bei der technischen Auslegung von Biomassefeuerungsanlagen für Schnittholz muss der hohe Aschegehalt beim Brennstoffbedarf und der Ascheaustragung entsprechend berücksichtigt werden.

Dass der Aschegehalt mit steigendem Rindenanteil zunimmt, zeigten auch FILBAKK ET AL. (2011) in ihren Studien zu den Effekten von Rindenanteilen auf die Brennstoffqualität von Pinienpellets. In der Studie stieg bei zunehmendem Anteil von Pinienrinde (0-100%) der anorganische Rückstand der produzierten Pellets von 0,47 auf 2,5%. Gleichzeitig konnten auch höhere Brennwerte der Pellets (von 19,3 auf 19,7 MJ*kg⁻¹) mit zunehmenden Rindenanteil beobachtet werden (FILBAKK ET AL., 2011). Die Brennwerverhöhung ist allerdings nicht auf den steigenden Aschegehalt zurückzuführen, sondern auf den hohen Harzanteil der Pinienrinde. Steigt der Harzanteil in einem Brennstoff, sind gleichzeitig höhere Brennwerte zu ermitteln (WHITE, 1987). Der steigende Aschegehalt bei hohem Rindenanteil ist durch die elementare Zusammensetzung und durch exogene Verunreinigungen der Rinde zu erklären. Im Schnittholz wurde ein Calciumgehalt von 1,029% der Trockenmasse ermittelt. Calcium geht bei der Verbrennung fast vollständig in die Asche über (HARTMANN, 2009c). Hohe Calciumgehalte sind typisch für biogene Festbrennstoffe, wobei Werte über 1% vor allem bei Rinden gemessen werden können (HARTMANN, 2009c). In reinem Holz ist der Calciumgehalt

mit ca. 0,5% nur etwa halb so hoch (WIINIKKA ET AL., 2007). Calcium wirkt in der thermochemischen Umwandlung bei der Aschebildung schmelzpunkterhöhend. Dies ist vorteilhaft, da es zu weniger Schlackebildung in der Verbrennungsanlage kommt. Weiterhin bindet das Erdalkali einen großen Teil des Schwefels, welcher bei der Verbrennung frei wird. Dies ist positiv zu werten, da Calcium als natürlicher Gegenpol zum erhöhten Schwefelanteil zu sehen ist. Somit wird die Schwefeldioxidemission im Abgas verringert, der Ascherückstand steigt insgesamt dagegen an (HARTMANN, 2009c). Ein erhöhter Calciumgehalt in der Biomasse war zu erwarten, da bei der Bildung der generativen Organe, in dem vorliegenden Fall Äpfel, viel Calcium benötigt wird (DOLEGA UND LINK, 2002). Weiterhin begünstigt der hohe pH-Wert am Standort Klein-Altendorf die Calciumverfügbarkeit. Dieser hat ebenfalls positiven Einfluss auf das Anreicherungsvermögen der Pflanzen von kationischen Nährstoffen wie z.B. Stickstoff, Schwefel, Kalium und Magnesium. Dadurch können auch die hohen Analysewerte für Stickstoff und Schwefel erklärt werden. Nach FILBAKK ET AL. (2011) waren die Stickstoffgehalte von Pinienrinde mit 0,37% dreimal so hoch wie im Holz (0,13%). Im Schnittholz konnte ein Stickstoffgehalt von 0,833% ermittelt werden, der auch durch die intensive Düngung der Apfelplantagen im Gegensatz zu Waldholz zu erklären ist. Auch der Schwefelgehalt zeigt ähnliche Verläufe: Pinienholz <0,01%; Pinienrinde 0,03% (FILBAKK ET AL., 2011); Schnittholz 0,069%.

Der prozentuale Massenanteil der Schwermetalle Kupfer, Eisen und Zink an der Gesamtmasse ist zwar nur gering, jedoch gehen diese bei der Verbrennung vollständig in die Asche über. Als besonders hoch erwies sich der Kupfergehalt mit $10,83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ im Schnittholz. Nach HARTMANN (2009c) sind Kupfergehalte bei Fichtenholz bis maximal $8,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zu finden. Für Laubbaumarten werden Maximalwerte bis zu $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ angegeben. Diese deutlich erhöhten Kupfergehalte können durch die Kupferspritzung gegen pilzliche Schaderreger mit bis zu $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ begründet werden. Diese im Obstbau übliche Applikation wird vor allem zum langfristigen und protektiven Schutz der Kulturen vor Obstbaumkrebs (*Nectria galligena*) und Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) eingesetzt (LANGE ET AL., 2002). Eine Akkumulation von Kupfer v.a. im Boden aber auch auf den Pflanzen durch die jährlichen Applikationen ist bekannt (DRESCHER ET AL., 2009). Da im ökologischen Anbau Kupfer das einzige legal anwendbare Fungizid darstellt, ist von noch höheren Gehalten in Biomassen aus biologisch wirtschaftenden Betrieben auszugehen. Zusätzlich wirkt Kupfer bei der thermochemischen Umwandlung katalytisch auf die Bildung von Dioxinen und Furanen

(HARTMANN, 2009c). Damit ist eine hohe Schwermetallkonzentration für den Aschegehalt nur bedingt von Bedeutung, jedoch erhöhen sie die Schadstoffemission. Die Summe aller enthaltenen metallischen Elemente kann den Aschegehalt zwischen 0,1-0,5% beeinflussen (WIINIKKA ET AL., 2007).

Ein weiterer Faktor auf den anorganischen Rückstand in einem Brennstoff ist der Siliciumgehalt. In Verbrennungsaschen ist Silicium (Si) ein Hauptbestandteil. Si konnte im Schnittholz nicht analysiert werden. Es ist aber von einem hohen Gehalt auszugehen. Dazu stellte WIINIKKA ET AL. (2007) fest, dass in Aschen einer reinen Holzverbrennung zwischen 0,017-0,123% Si enthalten sind. Bei der Verbrennung von Rinde stieg der Siliciumgehalt in der Asche auf 0,720%. Somit entfiel ein Anteil von ca. 20% auf das Element bei einem Ascheanteil der Rinde von 3,7%. Zurückzuführen sind die hohen Gehalte auf exogene Verschmutzungen, bspw. durch Stäube, die auf der Rinde verbleiben oder Sandanhaftungen bei Bergung und Lagerung. Gleiche negative Prozesse sind auch beim Schnittholz zu vermuten, was auch durch die Untersuchungen zum Nicht-Holz-Anteil im Schnittholz von 5-10% in Abhängigkeit der Sammeltechnik nachgewiesen wurde. Mit Blättern, Gras und Moos werden mineralische Störstoffe in den Brennstoff eingetragen (CURTIS, 2002; WIINIKKA ET AL., 2007).

Der ermittelte Brennwert des Obstbaumschnittholzes wurde bereits bei der Berechnung der Energiepotenziale einbezogen. Die vier untersuchten Varianten unterschieden sich lediglich tendenziell. Der gemittelte Brennwert lag bei $18,94 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Damit liegt dieser aufgrund des hohen Aschegehalts und dem Fehlen von Harzen in der Rinde auf einem niedrigen Niveau. Bei einem Vergleich des Schnittholzbrennwerts mit Literaturwerten können ähnliche Brennwerte bei Weichhölzern (Birke, Ahorn und Weide) oder halmgutartigen Brennstoffen gefunden werden (Vgl. mit: HARTMANN, 2009c; GÜNTHER ET AL., 2012). Wie bereits beim Aschegehalt von Schnittholz diskutiert kann auch beim Brennwert kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden. Auch der im Verhältnis niedrige Brennwert muss bei der Ermittlung des Brennstoffbedarfs und der Dimensionierung von Verbrennungsanlagen (z.B. größere Brennstoffzuführungssysteme) einkalkuliert werden.

Eine bisher offengebliebene Fragestellung ist die Entwicklung der Schnittholzmasse und deren Brennstoffeigenschaften bei maschinellen Schnittmaßnahmen. Dabei werden die Obstbäume mit Hilfe von Maschinen (Sägeblätter, Flügelmesser oder Mähbalken)

geschnitten, sodass eine sogenannte Fruchtwand entsteht. Bei dieser Schnittmethode werden jährlich vor allem einjährige Triebe außerhalb einer fest eingestellten Schnittebene entfernt. Der Schnitt wird allerdings später als der übliche Ertragsschnitt ausgeführt, nämlich im Mai bis Juni (ELLWEIN UND MESCHENMOSER, 2012). Zu diesem Zeitpunkt sind die Bäume belaubt, was einen negativen Einfluss, wie oben beschrieben, auf die Brennstoffeigenschaften hat. Ein händischer Ergänzungsschnitt im Winter ist meist nötig, bei dem aber kaum Biomasse anfällt, da nur hängende und steil nach oben wachsende sowie Konkurrenztriebe entfernt werden (ELLWEIN UND MESCHENMOSER, 2012). Weiterhin besitzen die einjährigen Triebe aus dem maschinellen Schnitt in der Regel noch kleinere Astdurchmesser, damit einen höheren Rindenanteil, was zu weiter steigenden Aschegehalten führt. Daher ist der maschinelle Schnitt in Konkurrenz zur Schnittholzbergung zu sehen. Darüber hinaus wird eine eventuelle Kupferbehandlung bereits vor Mai appliziert, sodass weiter steigende Schwermetallgehalte im Brennstoff zu erwarten sind (KÜHNE ET AL., 2009). Aufgrund der arbeitswirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens wird es jedoch an Bedeutung gewinnen. Dem entgegen stehen die offen gebliebenen Fragestellungen bezüglich der Fruchterträge und -qualitäten, die vor einer Etablierung des maschinellen Schnittes endgültig geklärt werden müssen (ELLWEIN UND MESCHENMOSER, 2012).

Technische Bewertung der Bergetechnik

Neben dem Brennstoff und dessen qualitativen Merkmalen stand die **Schnittholzbergetechnik** im Fokus der Untersuchungen. Die Veränderung der Bunkereinrichtung von der Absackeinrichtung zum Großkistensystem bei dem Schnittholzsammler der Firma Kuhn erwies sich als praxistauglich. Wie schon bei den Untersuchungen zum Wassergehalt erwähnt besitzt das Schnittholz einen Wassergehalt von 35-41% bei der Sammlung. Daher ist eine Trocknung nötig. Diese kann in den Großkisten durchgeführt werden, da durch die Bauweise der Kisten eine Durchlüftung von allen Seiten möglich ist. Das Fassungsvermögen beträgt 0,72 m³, sodass ca. 300-350 kg Frischmasse aufgenommen werden können. Die originalen Nylonsäcke besitzen ein Volumen von 0,75 m³ (KUHN, 2009). Damit ist das Bunkervolumen der Großkiste im Vergleich zum Nylonsack nahezu identisch. Ein weiterer Vorteil der Großkisten ist, dass diese, bedingt durch ihre Bauform, gestapelt werden können. Dies ist platzsparend und die notwendige Logistik ist in den meisten Betrieben durch die Obstlagerung vorhanden. Nachteilig bei diesem System ist

der Bedarf einer zweiten Arbeitskraft beim Schnittholzammelvorgang. Die Kisten müssen von dem Trägergestell am Schnittholzsammler mit einem Rad- oder Frontlader mit Palettengabel ab- und aufgeladen werden. Mit den Nylonsäcken war dies durch die hydraulische Höhenverstellung der Sackaufnahme von einer Arbeitskraft durchführbar.

Oberstes Ziel der Schnittholzammeltechnik ist es, einen Festrennstoff bereitzustellen, der in automatisierten Verbrennungsanlagen eingesetzt werden kann. Für die Beschickung solcher Anlagen werden zumeist Schnecken- oder Trogförderer eingesetzt. Anlagenhersteller beziehen sich in den geforderten Brennstoffspezifikationen zur Teilchengrößenverteilung meist auf die österreichische ÖNORM M 7133 „Holzhackgut für energetische Zwecke- Anforderungen und Prüfbestimmungen“, teilweise auch auf die seit 2005 in Kraft getretene europäische Norm CEN/TS 14961-1 „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen“. Damit müssen die ermittelten Längenverteilungen der Schnittholzammeltechnik der Firmen Kuhn und Perfect mit den angeführten Normen verglichen werden. Grundsätzlich kann das Schnittholzammelmaterial nicht in die ÖNORM M 7133 eingegliedert werden, da es nicht mit einem scharfen Schnitt, sondern mit einem Mulchaggregat schlagend zerkleinert wird. Die ÖNORM bezieht sich aber nur auf gehacktes Material. Dennoch können die Längenverteilung mit den Größenklassen verglichen werden. Dabei schreibt die ÖNORM bei der größten Klasse „G100“ eine maximale Länge einzelner Holzstücke von 25 cm vor (Ausschlusskriterium bei Überschreitung von nur einem Holzstück). Diese Anforderungen können beide Geräte nicht erfüllen, da bei dem Kuhn Gerät 22 Holzstücke im Probenvolumen von 10 Litern länger als 25 cm und bei dem Perfect Schnittholzsammler 9 Stücke die Maximallänge überschritten. Weiterhin ist in der ÖNORM ein maximaler Massenanteil von 20% in der Größenklasse >6,3 cm festgelegt. Bei dem Kuhn Gerät konnte in den Größenklassen >10 cm ca. 76 Massen-% und beim Perfect Schnittholzsammler ca. 50 Massen-% ermittelt werden. Damit werden die Anforderungen der österreichischen Norm M 7133 nicht erfüllt.

Die europäische Norm 14961-1 sieht Spezifikationen zum einen für Holzhackschnitzel und zum anderen für Schredderholz vor. Eine Gruppierung in die Holzhackschnitzeleigenschaften kann aus den zerkleinerungstechnischen Gründen nicht vorgenommen werden. Die größte Klasse für Schredderholz nach der DIN EN 14961-1 ist die „P300“. Diese sieht einen Massenanteil von 75% in dem Längenbereich von 0,315-30 cm vor. Diese Eigenschaft kann

von beiden getesteten Schnittholzsammeltechniken erfüllt werden. Eine maximale Partikellänge wurde bisher in der Norm 14961-1 für die Klassen P200 und P300 nicht festgelegt. In den Klassen P45 bis P125 beträgt diese 35 cm. Angenommen diese maximale Partikellänge würde auch für P300 gelten, würde der Schnittholzsammler von Kuhn kein normkonformes Material erzeugen (3 Holzstücke >35 cm), der Perfect Mäh-Ladewagen dagegen schon. Die Klassen mit höheren Anforderungen im Vergleich zu P300 (P16-P200) kann das Schnittholz nicht erfüllen. Da die meisten Heizungshersteller auf die ÖNORM M7133 verweisen, bzw. eine Mindestanforderung der CEN/TS 14961-1 P100 oder P63 fordern, ist der Einsatz von Schnittholz als Brennstoff nicht uneingeschränkt möglich. Soll Schnittholz, welches durch die vorgestellten Maschinen bereitgestellt wurde, in Verbrennungsanlagen eingesetzt werden, muss deren Zuführung auf die Längenverteilung ausgelegt werden. Eine Aufbereitung der Biomasse durch stationäre oder mobile Häcksler ist allerdings denkbar, sodass das Material normkonforme Partikelgrößen aufweist.

Neben dem Vergleich der Größenverteilung von gesammeltem Schnittholz mit den entsprechenden Normen konnten auch zwischen den beiden Bergetechniken Unterschiede festgestellt werden. Die Längenverteilung der gesammelten Biomasse mit dem Perfect Mäh-Ladewagen zeigte eine stärkere Zerkleinerung des Materials als bei dem Kuhn Gerät. Beide Techniken besitzen grundsätzlich dasselbe Zerkleinerungsorgan in Form eines Mulchers. Weiterhin sind die Schlegel auf der Rotorwelle beider Maschinen gleich ausgeformt. Zunächst kann vermutet werden, dass die Rotordrehzahl bei beiden Geräten verschieden ist und dadurch der Unterschied in der Zerkleinerungsintensität auftritt. In den Versuchen zur Drehzahlvariation des Kuhn Schnittholzsammlers konnte gezeigt werden, dass eine Zapfwellendrehzahlerhöhung von $450 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ auf $540 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ eine höhere Zerkleinerungsintensität zur Folge hatte. Bei dem Gerät der Firma Kuhn beträgt die Rotorwellendrehzahl bei eingestellter Zapfwelle auf $540 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ $2600 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ (KUHN, 2009). Dagegen weist der Perfect Mulcher bei gleicher Zapfwellendrehzahl eine Rotordrehzahl von $2100 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ auf. Damit zeigte der Perfect Mäh-Ladewagen bei einer geringeren Drehzahl eine stärkere Zerkleinerungsintensität. Der einzige verbleibende Unterschied zwischen den beiden Zerkleinerungsorganen besteht in der Drehrichtung des Schlegelrotors. Dieser dreht bei dem Kuhngerät mit der gleichen Drehrichtung, wie die Schlepperreifen. Bei dem Perfect Mäh-Ladewagen ist die Drehrichtung entgegengesetzt des Gutstromes. Genau diese entgegengesetzte Drehrichtung hat eine höhere Zerkleinerungsintensität zur Folge (BLOCK, 154

2004). Steigt die Zerkleinerungsintensität des Materials steigt der nötige Energieaufwand maschinenspezifisch an (BLOCK, 2004).

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Maschinen ist, dass die Bergetechnik der Firma Kuhn vor dem Zerkleinerungsorgan eine Pick-up Einrichtung besitzt, die das Schnittholz aus dem Schwad aufnimmt und zum Mulcher transportiert. Dies hat einen positiven Einfluss auf die mit aufgenommenen Störstoffe und die Massenverluste durch nicht aufgesammelte Biomasse. Der Perfect Schnittholzsammler wies Nicht-Holzbestandteile von 10% der Gesamtmasse auf. Dagegen wurde bei dem Kuhn Gerät nur ein Nicht-Holzbestandteil von 5% ermittelt. Diese bestehen aus Gras, Moos und Blättern, welche einen negativen Einfluss, wie oben beschrieben, auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften besitzen. Weiterhin konnten signifikant geringere Biomasseverluste von 1,1% im Vergleich zur Perfect Maschine mit 2,1% ermittelt werden. Beim Mäh-Ladewagen wurde also mehr Schnittholz durch das Mulchaggregat nicht erfasst und verblieb in den Fahrgassen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Zerkleinerungsorgan in Form eines Mulchers nicht die hohen Materialqualitäten erzeugt, wie beispielsweise bei einem Hackorgan. Eine Pick-up Einrichtung zur Aufnahme des Schnittholzes aus dem Schwad erwies sich als vorteilhaft. Anhand dieser Feststellungen können am Markt Maschinen gesucht werden, welche diese Eigenschaften besitzen. Bei der eigenen Marktanalyse konnte ein Rebholzhäcksler der Firma Stoll gefunden werden (Abbildung 5-1).

Dieser wird in die Fronthydraulik von Schmalspurtraktoren angebaut (siehe Abbildung 5-1) und hydraulisch angetrieben. Er besteht aus einem zentralen Hackorgan in Form eines Scheibenradhackers mit Auswurfgebläse und Piepe. Somit kann das



Abbildung 5-1: Rebholzhäcksler Winnicut der Firma Stoll (Bildquelle: STOLL, 2012)

Hackgut auf einen dahinter fahrenden Anhänger oder Auffangbehälter übergeladen werden. Laut Hersteller zeichnen sich die produzierten Hackschnitzel durch eine hohe Homogenität und Größenverteilung von drei bis sechs Zentimeter aus. Vor dem Hackorgan ist eine Pick-up Einrichtung verbaut, die die Biomasse über Vorpresswalzen dem Hacker zuführt. Weiterhin sind vor der Pick-up Einrichtung zwei seitliche Bürsten angebaut, die das Schnittholz aus dem Schwad noch einmal zusätzlich zusammenführt (STOLL, 2012). Die Maschine ist seit Herbst 2011 in der Testphase und wurde dabei in Weinbergen für Rebholz getestet. Für die Zerkleinerung von Schnittholz aus Obstplantagen musste das Hackorgan, die Vorpresswalzen und die Pick-up optimiert werden. Ein Prototyp für Obstschnittholz soll ab Herbst 2012 verfügbar sein und im Frühjahr 2013 getestet werden (PETER, 2012).

Eine vollkommen andere Entwicklung zur Nutzung von Schnittholz ist die Ballenpresse der Firma Caeb International. Diese in Abbildung 2-4 vorgestellte Maschine presst das Schnittholz in Rundballen, wie sie aus der Strohernte oder vom BioBaler bekannt sind. Allerdings sind die Biomasseballen im Durchmesser kleiner. Sie verfügt vor dem Pressorgan ebenfalls über eine Pick-up Einrichtung. Die Ballen können sowohl mit Sisalgarn als auch mit Sisalnetzen gebunden werden. Besonderer Vorteil dieser Maschine ist, dass die Ballen besonders gute Trocknungseigenschaften besitzen (siehe dazu auch Kapitel 5.3) (VON GLISCZYNSKI, 2011).

Abbildung 5-2 zeigt die einfache kombinierte Lagerung und Trocknung. Die Schnittholzbündel werden im Frühjahr gepresst und können bereits, optimale Trocknungsbedingungen vorausgesetzt, im darauffolgenden Winter verbrannt werden. Die Nutzung erfolgt in handbeschickten Verbrennungsanlagen, in die ein Ballen manuell zugeführt wird (EICHING, 2012). Bisher wird diese Maschine ebenfalls nur in Weinberganlagen genutzt. Eine Nutzung für Schnittholz aus Obstplantagen muss getestet werden.



Abbildung 5.2: Lagerung von Schnittholzbällen, welche mit dem Schnittholz-sammler der Firma Caeb produziert wurden

Zusammenfassend kann zur Beantwortung der eingangs aufgestellten Arbeitshypothese folgendes festgehalten werden: Die Schnittholzpoteziale in der Obstertragsphase von modernen Apfeldichtpflanzungen auf der Unterlage M9 sind im Durchschnitt mit $1,2 \text{ t TM} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ anzugeben. Durch die Nutzung der Schnittholzpoteziale aus Apfelplantagen können in Deutschland ca. 7.500 Haushalte mit Energie versorgt werden, ohne in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu stehen. Weiterhin wurden die wichtigsten brennstofftechnischen Eigenschaften von Schnittholz untersucht. Diese wiesen in der Obstertragsphase ebenfalls homogene Merkmale in den verschiedenen Varianten auf. Der Wassergehalt konnte nach einer Vortrocknung in der Fahrgasse der Plantagen zwischen dem Ertragsschnitt und der Bergung mit 35-41% ermittelt werden. Vor einer thermischen Nutzung besteht daher ein Trocknungsbedarf. Der Aschegehalt erwies sich durch einen hohen Rindenanteil im Brennstoff als relativ hoch (3,8-4,8%). Dabei sind zusätzliche exogene Verunreinigungen des Materials wahrscheinlich. Der Brennwert liegt dementsprechend niedrig bei $18,7\text{-}19,1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Mit den untersuchten Schnittholzammeltechniken konnte kein normkonformes Material nach ÖNORM M7133 bzw. CEN/TS 14961-1 hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung bereitgestellt werden. Bei zukünftigen Neuentwicklungen von Schnittholzsammlern können höhere Zerkleinerungsintensitäten erwartet werden. Für die Schnittholzammlung erwies sich weiterhin ein Vorschalten eines Pick-up-Systems als positiv, da die Aufnahme von Störstoffen reduziert wurde und die Biomasseverluste durch zurückbleibende Äste sanken. Die besonderen brennstofftechnischen Eigenschaften von Schnittholz müssen bei der Planung, Auslegung und dem Betrieb von Verbrennungsanlagen einkalkuliert werden.

5.2 Rodungsholzpoteziale und deren Brennstoffeigenschaften, sowie die technische Analyse der Bereitstellungskette

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Rodeverfahren für Baumobstbestände entwickelt. Dieses war nötig, da bisherige Verfahren die Biomasse nicht bzw. kaum nutzten. Die modernen Dichtpflanzungen in Obstplantagen werden, aus den in Kapitel 2.2.3

genannten Gründen, nach 10-15 Jahren gerodet. Die in diesem Kaskadensystem anfallende Holzmenge und deren technische Bereitstellung konnte anhand der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Ergebnisse charakterisiert werden. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse anhand der Arbeitshypothese „Mit dem zu entwickelten Baumroder „RB 60 Klein-Altendorf“ können in einem mechanisierten Arbeitsschritt Baum und Pfahl aller klassisch angebauten Kernobstbäume gerodet und zu einem biogenen Festbrennstoff weiterverarbeitet werden“ diskutiert. Dazu werden analog zum Schnittholzthemenkomplex zunächst die Rodungsholzpoteziale quantifiziert und die Qualitätsmerkmale des Brennstoffs bewertet. Ebenfalls müssen die analysierten Kenngrößen der neu entwickelten Bereitstellungskette diskutiert werden.

Rodungsholzpoteziale

Die **Rodungsholzmasse** von Apfeldichtpflanzungen auf der Unterlage M9 nach einer Standzeit von 10-15 Jahren konnte mit $10,5-22,9 \text{ t TM*ha}^{-1}$ ermittelt werden. Durch die Analyse der Einzelbaumgewichte verschiedener Apfelsorten wurde eine Abhängigkeit zwischen der Rodungsholzmasse und der angebauten Sorte festgestellt. Damit ist die Biomasse nicht nur abhängig von der gewählten Unterlage der Obstbestände, sondern auch das jeweilige Edelreis hat Einfluss auf die Wüchsigkeit. Dies wird ebenfalls aus der beschreibenden Sortenliste „Kernobst“ des Bundessortenamts deutlich. In dieser werden den Sorten Wuchsstärken in einer Skala von 1 (sehr schwacher Wuchs) bis 9 (sehr starker Wuchs) ohne Einfluss der Unterlage zugeordnet (BSA, 2000). In den eigenen Untersuchungen zeigten die Sorten Boskoop, Topaz und Elstar ein hohes Biomasseaufkommen ($15,3- 21,7 \text{ t TM*ha}^{-1}$), die Sorten Pinova, Golden Delicious und Gala ein niedriges ($10,5-12,3 \text{ t TM*ha}^{-1}$). Dies deckt sich mit den angegebenen Wuchsstärken des Bundessortenamts (Tabelle 5-1). Dabei besitzt die Sorte Elstar die höchste Wuchsstärke mit dem Skalenwert 9 (BSA, 2000). Dies kann durch die Trockenmasseerträge der im 11. und 14. Standjahr stehenden Elstarbäume mit $21,7$ bzw. $19,5 \text{ t TM*ha}^{-1}$ bestätigt werden. Die niedrigste Rodungsholzmenge in den Versuchen wurde in der Apfelsorte Pinova mit $10,4 \text{ t TM*ha}^{-1}$ ermittelt. Diese besitzt nach Bundessortenamt eine Wuchsstärke von 5 (BSA, 2000). Die Sorte Topaz weicht allerdings von den getroffenen Aussagen ab. Die in der beschreibenden Sortenliste mit 5 angegebene Wuchsstärke der Sorte Topaz zeigt das dritt höchste Biomasseaufkommen mit $17,8 \text{ t TM*ha}^{-1}$ (Tabelle 5-1). Die ermittelte Ausnahme könnte an

der besonderen Wuchsform der Sorte liegen. Diese bildet kurze aber dicke, oft büschelartige Triebenden und Fruchttäste, weswegen eine Auslichtung der Bäume erforderlich ist (BSA, 2000). Obwohl der Baum eher klein und schwachwüchsig ist, wird durch die dickeren Äste aber mehr Holzmasse gebildet. Dennoch kann die beschreibende Sortenliste für Äpfel des Bundessortenamts als Grundlage zur Abschätzung von Rodungsholzmengen herangezogen werden.

Dabei ist weiterhin noch der physiologische Zustand der Plantage zu beachten. Der TM-Ertrag der Sorte Elstar ist im 11. Standjahr mit $21,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ höher als der Ertrag der Sorte Elstar im 14. Standjahr mit $19,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Tabelle 5-1). Dies ist durch den Krankheitsdruck in der Elstar-Plantage im 14. Standjahr zu erklären. Diese Plantage war stärker mit Obstbaumkrebs befallen. Dadurch wurde die Krone stärker geschnitten, um den Pilz einzudämmen. Weiterhin führte der Pilz zu einem allgemein schlechten Habitus, wodurch der Minderertrag zu erklären ist. Der unterschiedliche Krankheitsdruck der beiden Plantagen könnte auch mit Standorteffekten zusammenhängen. Der Standort Dick 10 liegt rund 70-90 m höher über NN als der Standort Klein-Altendorf. Auch die Bodenpunkte der Standorte differieren um rund 10-15 Punkte (Klein-Altendorf 80-90; Dick 10 70-75). Der Standort Dick 10 befindet sich in der Übergangslage zum Mittelgebirge der Eifel. Standorteffekte, wie eine kürzere Vegetationszeit, tiefere Jahresdurchschnittstemperaturen und Bodeneinflüsse haben einen großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum (DIEPENBROCK ET AL., 2005). Die Einflüsse der Standorte sind auch in den vorgestellten Untersuchungen wahrscheinlich, sodass in Klein-Altendorf allgemein bessere Standortbedingungen für die Biomasseproduktion zu finden sind.

Die Abhängigkeit der ermittelten Trockenmasseerträge und den angegebenen Wuchsstärken des Bundessortenamts können aus Tabelle 5-1 entnommen werden. Dazu sind die Apfelsorte, das Standjahr, der TM-Ertrag und die Wuchsstärke nach Bundessortenamt aufgelistet. Zu beachten ist, dass die beschreibende Sortenliste nur für Apfelplantagen auf der Unterlage M9 einen Anhaltspunkt der zu erwartenden Rodungsholzmasse in Abhängigkeit der Wuchsstärke geben kann.

Tabelle 5-1: Vergleich der ermittelten Trockenmasseerträge mit den vom Bundessortenamt angegebenen Wuchsstärken in Abhängigkeit der Sorte

Sorte	Standjahr	TM-Ertrag [t*ha ⁻¹]	Wuchsstärke nach Bundessortenamt
Elstar	11	21,7	9
Pinova	11	10,5	5
Topaz	11	17,8	5
Gala	14	12,3	6
Golden Delicious	14	11,3	5
Jonagored	14	13,8	6
Boskoop	14	15,3	6
Elstar	14	19,6	9

(Wuchsstärke: 1=sehr schwach, 3=schwach, 5=mittel, 7=stark, 9=sehr stark)

Obstplantagen werden meist in sogenannten Blöcken angelegt. Dies bedeutet, dass in einem Block eine bestimmte Sorte angebaut wird. Da die meisten Sorten selbststeril sind, benötigen sie zur Befruchtung der Blüte eine Pollenquelle von einer anderen bestimmten Sorte. Diese Befruchtungssorten werden in den Block integriert. Dies erfolgt entweder mit einer Außenreihe an der windzugeneigten Seite oder durch einzelne Befruchterbäume in den Baumreihen (DOLEGA UND LINK, 2002). Nach der Nutzungsperiode werden die ganzen Blöcke getauscht. Dadurch kommt es zu einer Sortenmischung, die bei der Abschätzung der Rodungsholzmasse berücksichtigt werden muss. Anhand von Flächenplänen und Sortenanteilen in einem Bestand kann dieses in die Ertragserwartungen, bspw. zur Planung der Lagerraumkapazität, einkalkuliert werden.

Ein weiterer Faktor besteht in der aus dem Nachbau von Apfel nach Apfel entstehenden Bodenmüdigkeit und der daraus resultierenden Wuchsdepression. Ist diese stärker ausgeprägt, sinkt die zu erwartende Rodungsholzmasse ab (KALIEß, 2008). Zudem schwankt der Ertrag, ähnlich wie bei der Schnittholzmenge, abhängig von Schnitt- und Pflegemaßnahmen, Standorteinflüssen, sowie vom physiologischen Zustand der Plantagen durch bspw. Schadorganismen oder der Alternanz (DIEPENBROCK ET AL., 2005; SNYDER UND MELO-160

ABREU, 2005). Die Einflüsse von Standorteffekten und Schadorganismen auf die Holzerträge wurden schon zuvor diskutiert und belegen die Zusammenhänge.

Weiterhin zu berücksichtigen ist das Unterstützungsgerüst der Plantagen. Auf der Praxisversuchsfläche Dick 10 wurde im 14. Standjahr ein Rodungsholzanfall von 14,6 t $\text{TM} \cdot \text{ha}^{-1}$ ermittelt. Auf der Fläche H2/H1 dagegen war der Ertrag mit 22,9 t $\text{TM} \cdot \text{ha}^{-1}$ deutlich höher. Ein Teil des Mehrertrags ist durch den Birnenbestand auf der Fläche H1, der mit aufgenommen wurde, zu erklären. Die Birnen waren bereits im 24. Standjahr, sodass durch die längere Standzeit und ihren allgemein stärkeren Wuchs, bei gleichzeitig geringem Flächenanteil, ihr Massenanteil in der Rodungsholzmenge ansteigt (siehe dazu auch Kapitel 4.2.4). Allein durch die Birne ist der Ertragszuwachs von 8,3 t $\text{TM} \cdot \text{ha}^{-1}$ nicht zu erklären. Die Standortunterschiede wurden bereits angesprochen, sind jedoch vermutlich auch nicht in dieser Größenordnung einflussnehmend.

Ein deutlicher Unterschied besteht im Unterstützungsgerüst und der Verwertung dessen bei der Rodung. Auf der Fläche Dick 10 wurden alle Pfähle auf Grund der Teerölimprägnierung nach der Rodung manuell heraus gesammelt und fließen daher im Biomasseanfall nicht ein. Auf der Fläche H2 wurde eine Drahtrahmenunterstützung mit Robinien- oder Tonkinstäbe gewählt. Diese Stäbe sind nicht behandelt und wurden daher mit in die Rodungsholzmasse aufgenommen, da sie als Brennstoff geeignet sind. Dadurch stieg die Rodungsholzmasse in dem Praxisversuch H2/H1 deutlich an. Daher ist eine eventuelle Verwertung des Unterstützungsgerüsts bei der Planung der Rodungsholzmassen mit 13,8-27,9% Mehrertrag zu berücksichtigen. Genaue Untersuchungen nach der Etablierung und Nutzungsperiode der ersten Drahtrahmenunterstützungsgerüste mit Robinien- oder Tonkinstäbe müssen die endgültigen Holzerträge aus diesem Anbausystem bestätigen. Festzuhalten ist, dass das jeweilige Anbausystem einen Einfluss auf die Rodungsholzerträge hat.

Für die Rodungsholzmenge aus Apfelplantagen wird analog zum Schnittholz eine **Potenzialabschätzung** im Folgenden angefertigt. Aus den ermittelten Massen und dem durchschnittlichen Brennwert von 18,1 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ für einen kompletten Apfelbaum kann eine theoretische Wärmemenge von 181.000 bis 416.300 $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ errechnet werden. Dies entspricht einem Heizöläquivalent von ca. 4.250 – 9.750 Litern pro Hektar nach einer Standzeit von 10-15 Jahren. Daraus ergibt sich ein jährliches Heizöläquivalent von 425 - 975 Litern pro Hektar. Hochgerechnet auf die Apfelanbaufläche in Deutschland ergibt dies ein

jährliches Einsparpotenzial von ca. 15 – 35 Mio. Litern Heizöl. Im Mittel der Jahre kann in Deutschland von einem Heizölsubstitut von 25 Mio. Liter ausgegangen werden, mit dem rund 10.000 Haushalte ihren Wärmebedarf decken könnten. Von dieser theoretischen Wärmemenge bzw. dem Heizöläquivalenten müssen Abschläge, wie bereits bei den Schnittholzpotezialen (Kapitel 5.1) angegeben, zwischen 15-17% angerechnet werden (LWF, 2011; BRÜGGER 2013).

Brennstoffeigenschaften

Die Rodungsholzmasse setzt sich aus verschiedenen Baumsegmenten mit jeweils charakteristischen Brennstoffeigenschaften zusammen. Es konnte ermittelt werden, dass der Schaft mit 52% der Frischmasse den größten Massenanteil und auch das qualitativ hochwertigste Baumsegment in Bezug auf den Aschegehalt (4,08%) und Brennwert (18,3 MJ*kg⁻¹) darstellt. Im Gegensatz dazu wiesen die Wurzel und das Reisig schlechtere Aschegehalte (bis 10%) und Brennwerte (unter 17,3 MJ*kg⁻¹) auf. Beim Aschegehalt fiel besonders die Wurzel mit knapp 10% anorganischem Anteil negativ auf. Aber auch das Reisig und der Schaft zeigten mit knapp 7 und 4% im Vergleich zu Buchen- (0,5%) oder Fichtenholz (0,6%) einen erheblich erhöhten anorganischen Anteil (HARTMANN, 2009c). In der Wurzel kann dieser aufgrund von noch anhaftenden mineralischen Bestandteilen des Bodens erklärt werden. Dass mineralische Verschmutzungen den Aschegehalt erhöhen, zeigten bereits WIINIKKA ET AL. (2007) (siehe dazu auch Kapitel 5.1 Brennstoffeigenschaften). Teilweise können Bodenbestandteile von der Rhizodermis und besonders von der Wurzelhaarzone eingeschlossen werden, was den Aschegehalt stark erhöht. Aus demselben Grund war vermutlich der anorganische Rückstand bei der Rodungsholzmasse aus den Praxisversuchen der Flächen H2/H1 und Dick 10 mit 7,1 bzw. 4,9% erhöht. Besonders auf der Fläche H2/H1 war die Siebeinrichtung des Rodepflugs noch nicht ausgereift, sodass mehr anhaftender Oberboden an der Wurzel verblieb. Dieser Anteil haftete auch während der Weiterverarbeitungskette am Material an und wurde bei dem Zerkleinerungsprozess zum Teil in die Fasern der Holzstücke gepresst. Mit verbessertem Siebrost auf der Fläche Dick 10 sanken der Erdanteil von rund 21 auf 13% und damit auch der Aschegehalt um mehr als 2%. Leichte Verunreinigungen durch den Oberboden und damit höherer Aschegehalt sind verfahrensbedingt und müssen daher einkalkuliert werden (siehe dazu „Technische Analyse der Bereitstellungskette“, Kapitel 5.2). Einen positiven Einfluss auf den Aschegehalt könnte

eine Verwertung des Rodungsholzes zusammen mit dem Unterstützungsgerüst haben. Die Mehrerträge durch eine Verwertung des Unterstützungsgerüsts wurden bereits aufgezeigt. Bei einer Umstellung auf Akazienpfähle im Drahtrahmengerüst können die Aschegehalte sinken, da die Akazienpfähle aufgrund ihrer Entrindung einen Aschegehalt von 0,5 bis maximal 2% erwarten lassen (KHIDER UND ELSAKI, 2012). Weitere Untersuchungen müssen diese Vermutung in Zukunft überprüft.

Weiterhin hat der erhöhte Rindenanteil von Obstbäumen einen Einfluss auf den Aschegehalt. Dies wurde auch schon im selben Zusammenhang beim Schnittholz diskutiert (Kapitel 5.1 Brennstoffeigenschaften). Die Baumsegmente weisen kleinere Querschnitte im Vergleich zu Buchen- oder auch Fichtenstämmen auf. Dadurch ist der Rindenanteil erhöht (KENNEY ET AL., 1990). Dass dieser besonders hohe Aschegehalte von 10-18% aufweist, konnte in den Analysen von reinem Holz und Rinde nachgewiesen werden. Gleiche Aussagen tätigten auch FILBAKK ET AL. (2011) und können bestätigt werden. Dagegen konnte im Stammholz nur ein anorganischer Rückstand von ca. 0,8% analysiert werden. Dies deckt sich ebenfalls mit den Untersuchungen von FILBAKK ET AL. (2011), in denen Aschegehalte von reinem Holz zwischen 0,5-0,7% ermittelt wurden. Der rund 0,1-0,3% höhere Aschegehalt beim Obstkernholz ist durch die höheren Nährstoffkonzentrationen, wie es in 5.1 diskutiert wurde, zu erklären und durch die Elementaranalysen nachgewiesen.

Ebenfalls konnte mit den Untersuchungen zu den Brennstoffeigenschaften der negative Einfluss eines hohen Aschegehalts auf den Brennwert nachgewiesen werden. Bei der getrennten Analyse von Holz und Rinde (Abbildung 4-18) wurde gezeigt, dass das Holz im Mittel über alle Varianten einen Aschegehalt von 1,4% besitzt und der Brennwert dabei zwischen 19,23 und 19,43 MJ*kg⁻¹ schwankt. Der signifikant höhere anorganische Anteil der Rinde (im Mittel 13,84%) hatte auch einen signifikant geringeren Brennwert zwischen 15,95-17,02 MJ*kg⁻¹ zur Folge. Diese Tatsache wird auch durch die Elementaranalysen von Holz und Rinde bestätigt. Darin wurde gezeigt, dass die Rinde einen 3-6% geringeren Kohlenstoffgehalt im Vergleich zum Holz besitzt (Tabelle 4-7). Da nach HARTMANN (2009c) der Kohlenstoffgehalt die bei der Oxidation freigesetzte Energiemenge maßgeblich bestimmt, ist der allgemeine Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Brennwert auch für Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen zu vermuten. Um den Zusammenhang von Aschegehalt und Brennwert für Obstholz zu verallgemeinern, wurden alle Ergebnisse dieser Arbeit, in denen

Aschegehalt und Brennwert bestimmt wurden, zu einer Regression zusammengefasst.

Abbildung 5-3 zeigt diese:

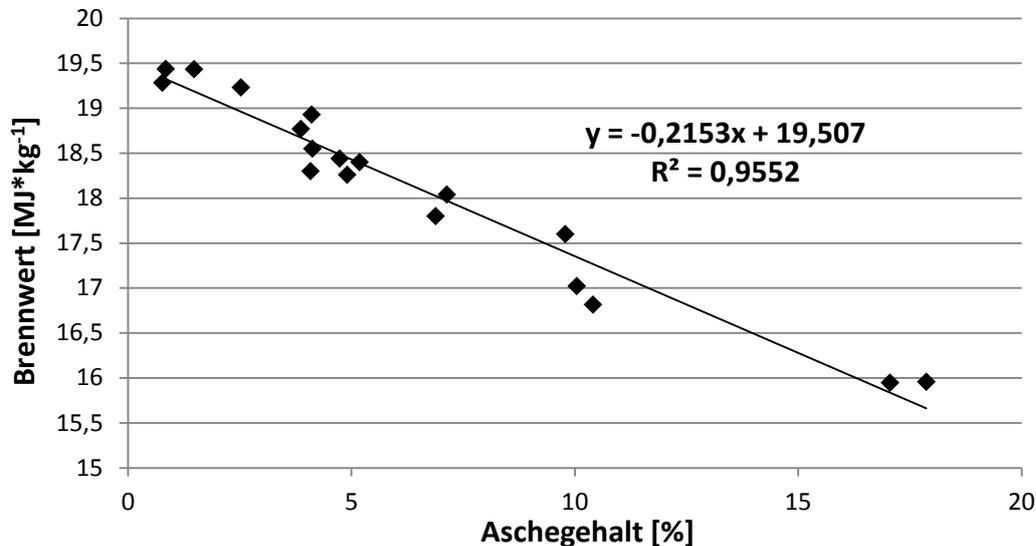


Abbildung 5-3: Regression zwischen Aschegehalt und Brennwert von Obstholz.

Ordinate schneidet die Abszisse bei 15 MJ*kg⁻¹ (n=18)

Das Bestimmtheitsmaß R^2 , das den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen den Merkmalen angibt, ist mit 0,9552 hoch. Dies bedeutet, dass die Merkmale in einer relativ sicheren linearen Beziehung zueinander stehen. Somit ist der Zusammenhang allgemein für Kernobstholz nachgewiesen. Das besondere in dem Kontext der Brennstoffeigenschaften ist, dass sich mit der in Abbildung 5-3 angegebenen Formel ($y = -0,2153x + 19,507$) aus jedem ermittelten Aschegehalt der Brennwert abschätzen lässt. Dabei ist zu beachten, dass die Formel nur für Kernobstholz und für Aschegehalte die auf Trockenbasis ermittelt wurden gilt. Weiterhin darf in der Rinde der Hölzer kein Harz enthalten sein, da dieses Einfluss auf den Brennwert hat (WHITE, 1987) (Kapitel 5.1 Brennstoffeigenschaften). Mit der angegebenen Formel kann der Brennwert, ohne diesen mit aufwendiger Analysetechnik zu messen, mit einer relativ einfachen Aschegehaltsbestimmung abgeschätzt werden. Diese Abhängigkeit beschreiben auch HARTMANN (2009c), sowie GÜNTHER ET AL. (2012). Die Regression ist weiterhin mathematisch bedingt, da beide Größen auf die Trockenmasse bezogen werden. Da der anorganische Anteil keinen thermischen Energiegehalt besitzt, muss der Brennwert bezogen auf die Masse mit höherem Aschegehalt sinken.

Auch beim Rodungsholz konnten weitere Zusammenhänge zwischen dem Aschegehalt und der elementaren Zusammensetzung beobachtet werden. Die Calciumanteile in den Baumsegmenten Wurzel, Schaft und Reisig wurden mit 2,590, 1,331 und 1,920% ermittelt. Im Holz konnten im Mittel 0,414% Calcium gemessen werden, in der Rinde 4,628%. Damit wurden in reinem Apfelholz ähnliche Calciumwerte analysiert, wie sie auch von WIINIKKA ET AL. (2007) angegeben werden. Insgesamt und besonders in der Rinde wurden dagegen extrem hohe Werte mit 3,5-5,8% Calcium nachgewiesen (Tabelle 4-7). Die positiven Aspekte des Erdalkalis bei der thermochemischen Umwandlung und die negativen auf den Aschegehalt wurden bereits in Kapitel 5.1 Brennstoffeigenschaften erläutert.

Auch für die Schwermetallkonzentrationen an Kupfer, Eisen und Zink gelten die getroffenen Aussagen aus Kapitel 5.1. Weiterhin wurden auch wiederholt die negativen Eigenschaften von hohem Rindenanteil im Brennstoff auf die Schwermetallkonzentrationen deutlich. Diese lagen in der Rinde um rund eine Zehnerpotenz höher als im Holz.

Die Schwermetalle Kupfer, Eisen und Zink zeigten darüber hinaus bei einer vertikalen Betrachtung der Stammachse ein Gefälle der Analysewerte. Bodennahe Baumsegmente wiesen höhere Metallgehalte auf als höher gelegene Baumkompartimente. Eine Ausnahme bildet dabei der hohe Kupfergehalt des Reisigs von 11,7%. Aus diesen Erkenntnissen heraus kann vermutet werden, dass diese Elemente durch exogene Einflüsse auf die Biomasse gelangen. Diese Schwermetallakkumulation ist für Kupfer durch die Kupferapplikation als Fungizid bereits beschrieben worden (Kapitel 5.1 Brennstoffeigenschaften). Denkbar ist, dass diese Schwermetalle von außen auf die Pflanze aufgetragen werden. Durch Niederschläge waschen diese von den relativ glatten Stammteilen ab und akkumulieren sich in der grobscholligen Rinde des Veredelungsknoten. Dieser besitzt durch die Veredelung undifferenziertes Kallusgewebe (SCHERR, 2002b). Dies hat knorriges, verworfenes Gewebe und eine grobe Rinde zur Folge. Dort kann sich der Niederschlag, der am Stamm herunterläuft, sammeln und akkumuliert so die Schwermetalle.



Abbildung 5-4:
Veredelungsknoten mit
Stammstück (Sorte Gala)

Die Abbildung 5-4 verdeutlicht die unterschiedliche Obstflächenstruktur von Stamm (oben im Bild) und Veredelungsknoten (unten). Damit werden die Brennstoffeigenschaften von pflanzenspezifischen Eigenschaften, wie z.B. der Rindenbeschaffenheit, beeinflusst.

Ebenfalls konnten pflanzenspezifische Unterschiede im Aschegehalt in Abhängigkeit der untersuchten Obstsorten und -arten festgestellt werden. Als Beispiel sollen die Birnensorte Alexander Lucas und die Apfelsorten Gala und Boskoop herausgestellt werden. Bei dem Versuch zeigte die Sorte Boskoop ein signifikant höheren anorganischen Anteil in der Trockenmasse (5,18%) als die Sorte Gala (3,86%) und die Birnensorte A. Lucas (4,1%). Auch hierbei kann der höhere Aschegehalt zum Teil mit der Rindenbeschaffenheit erklärt werden. Die Apfelbäume der Sorte Boskoop besitzen mit zunehmenden Alter eine gröbere, schollige Rinde, dagegen die Sorte Gala eine sehr glatte, wie sie auch am oberen Stammteil der Abbildung 5-4 zu sehen ist. Durch die Oberflächenstruktur ist der Rindenanteil der Sorte Boskoop höher, wodurch der höhere Aschegehalt begründet ist. Der Zusammenhang zwischen Rinden- und Aschegehalt wurde bereits dargestellt. Weiterhin können sich Fremdstoffe aus der Luft, wie z.B. Stäube, in der Rinde ablagern. Zu gleichen Aussagen kamen auch WIINIKKA ET AL. (2007), die ebenfalls Staub- und Sandanhaftungen als Begründung für hohe Siliciumgehalte in der Asche und damit auch einem hohen anorganischem Rückstand nach der Verbrennung anführen. Eine ähnlich grobe Rinde kann bei Birnenbäumen entdeckt werden. Dennoch zeigte die Birnensorte einen relativ niedrigen anorganischen Rückstand (4,1%). Dies ist durch die erhöhte Standzeit (24 Jahre) der Birne begründet. Bei den älteren Birnenbäumen war das sekundäre Dickenwachstum des Holzkerns ausgeprägter und daher der Holzanteil in Relation zu Rinde größer. Auch KENNEY ET AL. (1990) zeigten in ihren Untersuchungen zur Biomassequalität von Pappeln und Weiden, dass mit zunehmenden Schaftdurchmessern der Rindenanteil abnimmt.

Die gesamten gemessenen Brennwerte von Obstholz lagen zwischen 16 und 19,5 MJ*kg⁻¹. Im Mittel über alle Werte kann ein Brennwert für Obstholz mit 18,1 MJ*kg⁻¹ angegeben werden. Damit liegt dieser im Bereich von typischen Strohstoffen und ca. 1,0-1,5 MJ*kg⁻¹ unter dem von Holzbrennstoffen (HARTMANN, 2009c). Nach HARTMANN (2009c) wiesen diese Holzbrennstoffe jedoch auch Aschegehalte von 0,5-2% auf. Bei einer rein theoretischen Annahme, dass der Aschegehalt von Obstholz auf 0,5-2% abzusinken wäre, ergibt sich ein aus der oben genannten Formel ($y = -0,2153x + 19,507$) errechneter Brennwert von 19,1-19,4

MJ*kg⁻¹, der mit einem Niveau von Holz aus Kurzumtriebsplantagen vergleichbar ist. Daher kann als oberstes Ziel für Brennstoffe aus Obstplantagen abgeleitet werden, dass diese möglichst sauber und ohne Fremdstoffe bereitgestellt werden sollten.

Technische Analyse der Bereitstellungskette

Im folgenden Teil werden die technischen Kenngrößen der Bereitstellungskette von Rodungsholz aus Obstplantagen diskutiert. Dazu werden die in Kapitel 2.2.3 aufgestellten Anforderungen an ein neues Verfahren zur Obstbaumrodung herangezogen, um das entwickelte Verfahren zu bewerten.

Grundsätzlich konnte mit den Versuchen gezeigt werden, dass das Rodeverfahren mit dem Rodepflug „RB 60 Klein-Altendorf“ praxistauglich ist. Mit diesem Verfahren wurde erstmals eine Alternative zur herkömmlichen Brandrodung oder der forstlichen Rekultivierung vorgestellt. Als erstes Kriterium für ein Rodeverfahren für Obstbaumbestände wurde die Notwendigkeit der vollständigen Nutzung der Biomasse aufgestellt. Hauptkritikpunkt an bisherigen Rodeverfahren ist die eingeschränkte bzw. nicht vorhandene Nutzung der Rohstoffpotenziale. Mit dem RB 60 wurde gezeigt, dass eine Bergung und Nutzung des gesamten Obstbaumes aus modernen Dichtpflanzungen technisch realisierbar ist. Aus den Versuchen ging hervor, dass Apfelbäume auf der schwachwachsenden Unterlage M9 in jedem typischen Bestandesalter zwischen 10 und 18 Jahren gerodet werden konnten. Auch eine Birnenplantage im 24. Standjahr auf der Unterlage Quitte C, sowie eine wurzelechte Holunderanlage im 9. Standjahr konnte mit der Maschinen als kompletter Baum mit Wurzel und Pfahl aus dem Erdreich geborgen werden. Eine technische Grenze des Verfahrens wurde ebenfalls aufgezeigt. Dabei konnten Quittenbäume auf der Unterlage Quitte A im 7. Standjahr nicht ohne Beschädigungen des Rodepflugs verarbeitet werden. Aus diesem Versuch kann geschlossen werden, dass auch anderen Obstarten mit stärker wachsenden Unterlagen oder großkronigen Bäumen mit dem RB 60 nicht zu roden sind. Als klassisches Beispiel sind dabei Süß- und Sauerkirschbestände zu nennen. Diese stehen bis heute zumeist auf der stark wachsenden Unterlage der Vogelkirsche (*Prunus avium*) und weisen aufgrund der langen Standzeit von bis zu 50 Jahren einen massiven Habitus auf (BALMER, 2002). Dagegen kann bei klassischen Kernobstanlagen auf schwachwachsenden Unterlagen von einer Praxisreife ausgegangen werden.

Als weiteres Kriterium für ein Rodeverfahren wurde ein hoher Mechanisierungsgrad festgelegt. Dieser ist beim RB 60 gegeben, da bis auf die Vorbereitung der Plantagen, d.h. entfernen aller Bewässerungseinrichtungen sowie Draht- und Betonbestandteile, alle Arbeitsschritte der Verfahrenskette maschinell durchgeführt werden können. Bei allen anderen Rodeverfahren sind die Vorbereitungsschritte ebenfalls manuell durchzuführen. Es kann daher von einer vollmechanisierten Verfahrenskette mit den Abschnitten Roden, Poltern und Aufbereiten gesprochen werden. Bei dem Verfahrensabschnitt der Aufbereitung konnte die Variante mit dem BioBaler BW55 als nicht erfolgreich identifiziert werden. Eine Bereitstellung der Apfelholzmasse in Form von Ballen ist bisher technisch nicht realisierbar (Abbildung 4-14). Eine Ausformung der Biomasseballen war wahrscheinlich aufgrund der geringen Elastizität und der dickeren Schaftdimensionen der Apfelbäume nicht möglich. Der Habitus von Obstbäumen unterscheidet sich dabei zu stark von Bäumen aus Kurzumtriebsplantagen und dem Jungaufwuchs in Rückegassen oder unter Leitungstrassen, für die der BioBaller konstruiert ist (VON GLISCZYNSKI, 2011). Die Aufbereitungskette mit Schreddern und Siebanlage erwies sich dagegen als generell einsatztauglich. Die Kosten des gesamten Aufbereitungsschritt belaufen sich auf $7,50 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$. Dies entspricht ca. 30% des zu erzielenden Verkaufspreises, bei einem angenommenen Preis für Hackschnitzel von $25 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ (PRANGENBERG, 2011). Mit dem ersten Zerkleinerungsschritt wurden die Bäume grob zerkleinert. Dabei wurde gleichzeitig ein Großteil der noch anhaftenden Erde von den Wurzeln gelöst. Durch den zweiten Aufbereitungsschritt, dem Sieben, wurde die Erde von den Hackschnitzeln separiert. Dieser Schritt ist zum Entfernen der Erde unbedingt erforderlich, da die Schredderware nach der Grobzerkleinerung noch zu ca. 10% der Rodungsholzmasse aus Erde besteht. Die 10% Erdanteil beziehen sich dabei auf die letzte Bauform des Rodepflugs RB 60, mit der schon ein erheblicher Teil der Erde abgetrennt wurde. Bei ersten Prototypen des RB 60 wurden Erdanteile von bis zu 21% der Rodungsholzmasse bei der Siebung separiert. Die Verringerung des Erdanteils nach dem Roden von 21% auf 10% ist auf die konsequente Optimierung der Siebeinrichtung, bis hin zum im Anhang befindlichen Baumuster, zurückzuführen. Der unterschiedliche Erdanteil in der Rodungsholzmasse in den Einzelbaumversuchen im Vergleich zu den Praxiswerten ist durch das Poltern und Zwischenlagern zu erklären. Während der Erdanteil bei den Einzelbaumuntersuchungen direkt nach dem Roden gemessen wurde, wurde in den Praxisversuchen der Erdanteil nach dem Schreddern und Sieben des Materials bestimmt.

Demnach werden durch das Poltern und Lagern der Bäume rund 3-7% Erde vor der Aufbereitung von den Wurzeln abgetrennt (Abbildung 4-22).

Dennoch kann anschließend mit dem Aufbereitungsschritt der Siebung der noch verbleibende Erdanteil nicht vollständig entfernt werden. Durch die grobe Oberflächenstruktur der Holzstücke nach dem Schreddern, bedingt durch die schlagende Zerkleinerung, verbleibt ein kleiner Anteil mineralischer Bestandteile am Holz. Dies hat wie oben erwähnt Einfluss auf den höheren Aschegehalt. Beim Vergleich der Analysen zum anorganischen Anteil zeigten die Hackschnitzel aus den Praxisversuchen einen 1-3% höheren Aschegehalt, als die Biomasse aus den Einzelbaum- und Sortenuntersuchungen. Daraus wird deutlich, dass verfahrensbedingt 1-3% Asche zusätzlich einkalkuliert werden müssen. Weiterhin hat das Schreddern einen Einfluss auf die Größenverteilung der Holzstücke. Diese weisen keine normativen Eigenschaften nach ÖNORM M 7133 auf.

Ähnlich wie es beim Schnittholz diskutiert wurde (Kapitel 5.1 Schnittholzbergetechnik), kann aufgrund der Ausreißer in der Länge das Rodungsholz nicht in die Größenklasse G100 eingestuft werden. Es konnten mehrere Holzstücke mit einer Überlänge von >250 mm gemessen werden, was ein Ausschlusskriterium nach der ÖNORM M 7133 darstellt. Damit kann die aufgestellte Anforderung an ein neues Rodeverfahren, dass die Aufbereitung des Rohstoffes zu einem hochwertigen Festbrennstoff möglich sein muss, nur bedingt erfüllt werden. Durch die Erdanteile des Wurzelholzes kann nur eine Schreddertechnik eingesetzt werden. Eine getrennte Aufbereitung von unter- und oberirdischen Baumteilen wäre daher zu überlegen. In einem solchen Fall könnte der oberirdische Teil der Obstbäume mit Hackertechnik (definierter Schnitt mit scharfen Werkzeugen) zerkleinert werden. So würden zwei Biomassesortimente erstellt werden; eines aus dem Kronen- und Schaftholz mit höherwertigen brennstofftechnischen Eigenschaften und normkonformer Stückgeometrie sowie eines aus dem Wurzelholz. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine solche Trennung erst nach dem Roden durchgeführt werden sollte, da durch die Gesamtbergung Vorteile entstehen. Zum einen sind dabei die Pfähle des Unterstützungsgerüsts und zum anderen die aus dem Erdreich entfernte Wurzelmasse zu nennen.

Die Pfähle des Unterstützungsgerüsts können mit dem Rodeverfahren RB 60 zu mehr als 97% ohne Beschädigungen mit den Bäumen zusammen geborgen werden. Dies hat den Vorteil, dass diese für eine Neuanlage von Obstplantagen wiederverwandt werden können. Bei

Pfahlkosten von 0,70 – 2,50 € je Pflanzplatz ist dies ein klarer positiver ökonomischer Effekt (SCHERR, 2002a; HILBERS, 2012). Weiterhin werden die negativen ökotoxikologischen Wirkungen von abgebrochenen und verwitternden Pfahlspitzen, welche von LEPSIS UND BLANKE (2007) nachgewiesen wurden, vermindert. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der entfernten Wurzelholzmasse aus dem Boden im Bezug auf die Bodenmüdigkeit und die Wirkung der Holzrückstände für Folgekulturen. Die Wirkung des Rodeverfahrens RB 60 auf die Bodenmüdigkeit wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Durch die Bergung der Wurzelholzmasse wird aber die mikrobielle Aktivität vermindert und dem Wirkkomplex der Bodenmüdigkeit so entgegengewirkt (NAEF ET AL., 2012). Außerdem entsteht ein tief gelockerter Pflanzstreifen in den einfach und schnell neue Obstbäume gepflanzt werden können. Der positive Effekt einer schnellen Pflanzung nach der Rodung im Bezug zur Bodenmüdigkeit wurde bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert. Weitere spezifische Untersuchungen zu dem Themenkomplex der Bodenmüdigkeit in Abhängigkeit zum Rodeverfahren sind jedoch in Zukunft nötig.

Die Wirkung von Holzrückständen für Folgekulturen wurde dagegen in dieser Arbeit im Kapitel 3.3.1 nachgewiesen. Dabei zeigte sich ein eindeutig negativer Einfluss von zunehmenden Holzanteilen auf die Keimrate von Kressesamen. Bei einer Holzbeimischung in die Erde sank die Keimrate nach 3-8 Wochen auf unter 50%. Dagegen lag diese in der 0-Variante im gesamten Versuchszeitraum bei rund 93%. Effekte des Holzeintrags waren auch noch nach 33 Wochen mit einer verminderten Keimrate von ca. 75% signifikant. Dies ist durch die bei der Zersetzung aktiven Mikroorganismen und Umsetzungsprozesse zu erklären. Durch das schon erwähnte hohe Kohlenstoff- zu Stickstoffverhältnis in Holzbiomassen von ca. 300:1 wird bei den Umsetzungsprozessen Stickstoff fixiert. Weiterhin sinkt in der Anfangsphase der Rotte, bei der hauptsächlich leicht abbaubare Substanzen aufgespalten werden, der pH-Wert ab (ALBURQUERQUE ET AL., 2006). Die Bodentemperatur steigt dagegen kurzfristig an. Dies erklärt die niedrigen Keimraten, die mit zunehmenden Abbau des Holzes und damit abnehmender mikrobieller Aktivität wieder zunimmt. Durch das schwer abbaubare Lignin im Holz sind die Effekte jedoch über einen relativ langen Zeitraum von mehr als 33 Wochen ersichtlich. Dies zeigt die Notwendigkeit, die Holzbestandteile möglichst vollständig aus dem Ackerland zu entfernen. Der hohe Eintrag der Rodungsholzmasse ist neben der Rohstoffvernichtung der stärkste Nachteil der forstlichen Rekultivierungsmethode von Obstplantagen. Aus diesen vorgenannten Gründen entfällt die Möglichkeit den

oberirdischen Baumteil zu ernten und das Wurzelwerk im Boden mittels Wurzelstockfräsen zu zerkleinern. Diese Aussage wird durch die Untersuchungen der anteiligen Rodungsholzmasse der Baumsegmente Reisig, Schaft und Wurzel eines Apfelbaumes unterstützt. In der konnte gezeigt werden, dass eine schwachwachsende Unterlage M9 etwa 30% der gesamten Rodungsholzmasse ausmacht. Somit würden bei einem Verbleib der Wurzelmasse im Boden ca. 3-6,6 t TM*ha⁻¹ im oberen Bodenhorizont von ca. 30 cm eingearbeitet werden.

Aus den vorhergegangenen Ausführungen wird die Wichtigkeit der aufgestellten Anforderung an ein neues Rodeverfahren, der weitgehenden Entfernung der Wurzelmasse und der Stützpfähle, deutlich. Dies wird nur vom neuentwickelten Rodeverfahren RB 60 erfüllt.

Ein weiteres Einsatzgebiet des Rodepflugs RB 60 „Klein-Altendorf“ könnte in der Rekultivierung von Kurzumtriebsplantagen gesehen werden. Diese Kulturen werden nach einer Nutzungsperiode von 20-40 Jahren oder zur anderweitigen Ackernutzung entfernt. Die abgeernteten Stöcke werden bisher mit Wurzelstockfräsen zerkleinert und verbleiben auf dem Acker (FNR, 2012). Eine Bergung der Wurzeln mit dem Rodepflug wäre denkbar und aus oben genannten Gründen auch sinnvoll. Versuche zu diesem Themengebiet wurden bislang nicht durchgeführt, sollten aber in Zukunft bearbeitet werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das neu entwickelte Rodeverfahren „RB 60 Klein-Altendorf“ alle definierten Kriterien grundsätzlich erfüllt. Geringe Qualitätsverluste in der Brennstoffqualität, bedingt durch die Weiterverarbeitungskette, müssen beim Einsatzziel in Verbrennungsanlagen berücksichtigt werden. Die Stückigkeit des Brennstoffes (Schredderware ≠ G100) muss bei den Eintragungssystemen der Heizungen eingeplant werden. Der um 1-3% erhöhte Aschegehalt durch verfahrensbedingte mineralische Anhaftungen, zusammen mit den anorganischen Rückständen aus der Rinde, sind bei der Planung der benötigten Brennstoffmengen, der Leistungsberechnung der Anlagen und der Systeme zur Ascheaustragung aus der Verbrennungsanlage sowie der Ascheverwertung zu kalkulieren. Daher eignet sich das Material aus der Rodung von Obstplantagen, gerodet mit dem System RB 60 und aufbereitet mit Schreddern und Sieben, besser für Biomasseverbrennungsanlagen mit groß dimensionierten Eintragungssystemen für den Brennstoff. Für kleinere Anlagen wäre eine derzeit zu realisierende Alternative die

Abtrennung der Wurzel nach dem Rodevorgang. Nach diesem werden die Pfähle aus den gerodeten Plantagen heraus gesammelt. Anschließend wird die Unterlage unterhalb des Veredelungsknoten mit Hilfe von Motorsägen abgetrennt. Im letzten Schritt können mittels Radlader mit Reissgabel die Sortimente getrennt gepoltet werden. Der aufzuwendende Arbeits- und Zeitaufwand steigt dabei an. Jedoch kann aus dem Schaft- und Reisholz mittels Hacktechnik ein sehr hochwertiger Festbrennstoff für Verbrennungsanlagen mit kleinen Leistungsklassen erzeugt werden. Das Wurzelholz wird getrennt mit der bekannten Schreddertechnik aufbereitet und in Großanlagen verwertet.

Aus den gesamten Ausführungen zum Thema Rodungsholz ist zusammenfassend festzuhalten, dass die in Kapitel 2.2.3 aufgestellte und oben zitierte Arbeitshypothese als bestätigt anzusehen ist. Die Holzpotenziale aus der Rodung von Obstplantagen sind energetisch interessant. Eine Bereitstellung dieser aus klassisch angebauten Kernobstbeständen ist mit dem Rodeverfahren RB 60 praxistauglich. Ein weiterer Vorteil des entwickelten Verfahrens besteht in der vollständigen Holzbergung mit wenigen Rückständen auf dem Acker und der Möglichkeit zur Wiederverwendung von Stützpfehlen. Bei der Brennstoffverwertung müssen dessen Eigenschaften, wie die Stückigkeit, der hohe Aschegehalt und die mineralischen Anhaftungen in der Auslegung von Verbrennungsanlagen berücksichtigt werden. Das Rodeverfahren bietet darüber hinaus die Möglichkeit die Wurzeln, die als problematisches Baumsegment identifiziert wurde, nach der Rodung manuell abzutrennen und separat von Schaft und Reisig weiterzuverarbeiten. Somit kann ein hochwertiger biogener Festbrennstoff aus dem oberirdischen Holz aufbereitet werden.

5.3 Trocknung von Schnitt- und Rodungsholz

In den Diskussionen zur Bereitstellung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen wird ersichtlich, dass die erzeugten Brennstoffe sich teilweise von typischen Festbrennstoffen unterscheiden. Besonders in der Korngrößenverteilung und Stückgeometrie sind die Biomassen nicht mit normativen Eigenschaften versehen. Diese Voraussetzung implementiert, dass bei den Trocknungseigenschaften nicht uneingeschränkt auf Kenngrößen aus Standardverfahren zurückgegriffen werden kann. Weiterhin wird in den Analysen zum Wassergehalt der Festbrennstoffe deutlich, dass diese für eine sinnvolle thermische Nutzung getrocknet werden müssen. Die in Kapitel 2.3 verfasste Arbeitshypothese, „Aufgrund verfahrenstechnischer Gegebenheiten der jeweiligen Bereitstellungsketten sind die Trocknungsverfahren für die unterschiedlichen Obstholzpotenziale zu optimieren“, wurde mit den in Kapitel 4.3 vorgestellten Ergebnisse bearbeitet.

Zur Diskussion der Ergebnisse soll das in Kapitel 2.3.2 beschriebene Dombelüftungsverfahren in die Betrachtungen einbezogen werden. Dazu werden Untersuchungen von BÄRWOLFF UND HERING (2012) zu diesem Verfahren herangezogen. Um die untersuchten Trocknungsverfahren und die Dombelüftung zu vergleichen eignen sich als Kenngröße der Wasserentzug pro Tag und der Restwassergehalt (BÄRWOLFF UND HERING, 2012). Die Tabelle 5-2 gibt die Wasserentzüge pro Tag in Abhängigkeit der Trocknungsverfahren (Ganzbaum, Ballen, Hackschnitzel und Dombelüftung) und Holzarten (Obst, Pappel und Weide) an. Weiterhin sind die Trocknungsdauer, sowie der Restwassergehalt übersichtlich dargestellt.

Tabelle 5-2: Übersicht des Wasserentzugs pro Tag mit Trocknungsdauer und Restwassergehalt, sowie die verwendete Holzart für die untersuchten Trocknungsvarianten, ergänzt durch die Domtrocknung (verändert nach BÄRWOLFF UND HERING, 2012)

Trocknung	Holz	Trocknungsdauer [d]	Restwassergehalt [%]	Wasserentzug* d^{-1} [%]
Ganzbaum	Obst	59	32,95	0,186
Ganzbaum	Obst	274	36,72	0,021
Ganzbaum	Pappel	202	32,00	0,079
Ganzbaum	Weide	202	25,00	0,124
Ballen	Weiden	202	12,3	0,197
Ballen	Pappel/Weide	159	15,1	0,240
Hackschnitzel (Dach)	Obst	451	28,83	0,010
Hackschnitzel (Vlies)	Obst	216	26,50	0,032
Dombelüftung	Pappel/Weide	176	21,5	0,193

Ein Vergleich aller Verfahren und Varianten kann nicht uneingeschränkt erfolgen, da diese nicht in gleichen Zeiträumen und mit gleichen Anfangswassergehalten erfolgten. Ein Beispiel dafür ist, dass die Hackschnitzeltrocknung in der Miete Dach und Vlies erst erfolgte, nachdem das Holz am Stamm (Ganzbaumtrocknung) vorgetrocknet war. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben wurde, nehmen die Wasserbindungskräfte mit sinkendem Wassergehalt zu, was wiederum Einfluss auf die Trocknungsrate hat. Weiterhin nahmen im jeweiligen Untersuchungszeitraum jahreszeitlich bedingte Witterungseinflüsse Einfluss auf die Trocknungsverläufe. Dazu kann das Beispiel der Ganzbaumtrocknung Obst mit einer Versuchszeit von 274 Tagen herangezogen werden. Der Restwassergehalt wurde am Ende der Versuchszeit im Herbst ermittelt. Eine Wiederbefeuchtung des Holzes ist daher anzunehmen. Auch NORD-LARSEN ET AL. (2011) stellten in ihren Untersuchungen zur Trocknung von Scheitholz fest, dass es im Herbst und Winter zu einer Wiederbefeuchtung und damit verminderten Trocknungsrate kommt.

Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass in der Trocknungsvariante Ballen die niedrigsten Restwassergehalte von 12,3-15,1% gemessen wurden. Gleichzeitig sind für dieses Verfahren keine technischen Einrichtungen zur Trocknung nötig. Jedoch ist die Herstellung dieser Ballen oder Bündel nur mit speziellen Maschinen wie dem BioBaler oder Restholz Bündelaggregaten zu realisieren. Das aus Kurzumtriebsplantagen stammende Holz trocknete in den Ballen mit hohen Wasserentzugsraten von $0,240$ bzw. $0,197\% \cdot d^{-1}$ auf einen für die thermische Nutzung optimalen Wert von unter 20% Wassergehalt (LWF, 2011). Diese hohen Wasserentzugsraten wurden im Frühjahr und Sommer erzielt. Ein ähnlich gutes Ergebnis konnte bezüglich des Restwassergehalts in den eigenen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Lediglich beim Dombelüftungsverfahren können vergleichbare Restwassergehalte in ähnlichen Zeiträumen beobachtet werden, sodass ein Wasserentzug von $0,193\% \cdot d^{-1}$ erreicht werden kann. Bei der Domtrocknung muss aber im Vergleich zur Ballentrocknung ein höherer apparativer Aufwand (Zu- und Abluftkanäle, Seitenwände, Folienabdeckungen, etc.) geleistet werden. Offen bei den Untersuchungen zur Ballen- und Dombelüftungstrocknung blieb jedoch, ob die angegebenen Kenngrößen auch mit Obstholz zu beobachten sind. Aufgrund der schon mehrfach angesprochenen größeren Schaftdimensionen und Holzbeschaffenheit des Obstholzes ist von einer längeren nötigen Trocknungszeit zum Erreichen des Wassergehalts von ca. 20% auszugehen. Eine Abhängigkeit der Trocknungszeit und Wasserentzugsrate von der zu trocknenden Holzart stellten auch NORD-LARSEN ET AL. (2011) fest.

Im Vergleich der Trocknungsverfahren können auch bei der Ganzbaumtrocknung teilweise gute Wasserentzugsraten pro Tag beobachtet werden. Das Verfahren ist sehr einfach und benötigt keine technischen Einrichtungen. Jedoch sind gute Witterungsbedingungen nötig. Dies wird besonders deutlich im Vergleich der in Tabelle 5-2 aufgelisteten Versuche Ganzbaum Obst mit einer Trocknungsdauer von 59 und 274 Tagen. Während bei dem ersten Versuch nur ein relativ kurzer Zeitraum im Frühjahr und Frühsommer untersucht wurde, ist im zweiten Versuch die Trocknungsdauer länger und erstreckte sich vom Frühjahr über den Sommer bis in den Spätherbst. Im Frühjahr sind die Trocknungsraten maximal, sinken während des Sommers leicht ab und im Herbst nimmt das Holz wieder Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft und durch Niederschläge auf (HARTMANN, 2009b, NORD-LARSEN ET AL., 2011). Daher sind die Trocknungszeiträume in freien Lagern auf die Jahreszeit abzustimmen. Weiterhin fällt bei der Ganzbaumtrocknung auf, dass die Zielwassergehalte von ca. 20% nicht

erreicht werden können. Unabhängig von der Trocknungsdauer liegen die Restwassergehalte bei über 30%. Eine Ausnahme stellen die Weidenruten dar, da diese durch die Besonderheit eines erneuten Austriebs den Wassergehalt über die Transpiration der Blätter absenkten. Ähnliche Beobachtungen sind aus der Scheitholzlogistik bekannt, in der zur Absenkung des Wassergehalts von 30 auf 20% ein Spalten des Holzes vorausgesetzt wird. Durch das Spalten werden die Holzfasern aufgebrochen. Gleichzeitig wird die Oberfläche vergrößert und die Rinde wirkt nicht mehr als schwammartiger Wasserpuffer (KRÄMER UND HEISE, 2010). Eine höhere und freie Konvektion aus einem Holzstapel wird so erreicht.

Unbefriedigende Trocknungsraten wurden bei der Hackschnitzeltrocknung unter einem Satteldach und in der Feldmiete mit einer Strohschutzvliesabdeckung beobachtet. Durch die oben erwähnte Vortrocknung des Materials am Stamm sind die geringen Trocknungsraten mit zunehmender Wasserbindungskraft zu erklären. Weiterhin war eine Selbsterwärmung der Mieten aufgrund der niedrigen Startwassergehalte nicht zu beobachten. Das Material trocknete nach der Zerkleinerung, durch den erwähnten Faseraufbruch, um ca. 10% ab. Jedoch auch nach sehr langen Zeiträumen von 450 Tagen erreichte das Obstholz nicht die Zielfeuchte von 20%, sondern wies Wassergehalte von rund 29% auf. Eine Wiederbefeuchtung ist aufgrund der Vliesabdeckung bzw. der Überdachung auszuschließen. Ob eine passive Belüftung, wie sie bei der Domtrocknung realisiert wird, den gewünschten Erfolg auch bei Holz aus Obstplantagen bringt, muss in Folgeuntersuchungen geklärt werden. Das Funktionsprinzip ist aber übertragbar, sodass eine erfolgreiche Trocknung wahrscheinlich ist (BRUMMACK, 2008). Im Vergleich zur Trocknungsvariante Hackschnitzel unter Dach oder Vlies muss für die Domtrocknung nur ein geringfügig höherer technischer Aufwand mit den Luftkanälen betrieben werden, durch die eine höhere Entzugsrate und niedrigere Restwassergehalte zu erreichen sind.

Aus den Versuchen zur Trocknung lassen sich daher grundsätzlich Aussagen ableiten, die auch bei der Trocknung von Schnitt- und Rodungsholz Bestand haben. Eine grobe Struktur des Materials, wie sie in der Ballen- und Ganzbaumtrocknung vorzufinden sind, hat einen positiven Einfluss auf das Trocknungsverhalten. Ein auf- oder anreißen der Holzfasern, wie es bei der Ballentrocknung geschieht, ist auch bei der Ganzbaumtrocknung anzustreben. Die Stapel- und Lagereigenschaften dieser beiden Trocknungsvarianten ermöglichen eine stetige Luftzirkulation im Haufwerk durch einen geringen Druckverlust bei der Durchströmung. Ein

Wasserdampftransport ohne Bildung von Feuchtenestern ist so garantiert (HARTMANN, 2009b). Bei günstigen Witterungsbedingungen können so Wassergehalte erreicht werden, die für die thermische Nutzung ökonomisch sind. Gleichzeitig sind für die Ballen- und Ganzbaumtrocknung keine bis wenige technische Einrichtungen nötig, sodass diese Trocknungsverfahren sehr kostengünstig sind.

Bei einer Lagerung des Schredder- bzw. Hackguts sollte die Zerkleinerung bei Wassergehalten erfolgen, bei denen eine mikrobielle Selbsterwärmung noch möglich ist. Dies ist bei Wassergehalten über 35% in ausreichendem Maß gegeben (HARTMANN, 2009b). Setzt die mikrobielle Aktivität und damit die Selbsterwärmung ein, ist das Dombelüftungsverfahren eine effektive Option zur Trocknung, bei dem weniger Materialverluste durch Kompostierungsprozesse in Feuchtenestern auftreten, als in herkömmlichen Schüttungen (BRUMMACK, 2008). Die Hackschnitzeltrocknung bedarf jedoch in jedem Fall ein höheres Maß an apparativen Einrichtungen (befestigte Lagerplätze, Luftkanäle, Abdeckungen, etc.). Ist eine Selbsterwärmung durch zu niedrige Wassergehalte nicht mehr zu erreichen, sollte für einen schnellen Wasserentzug auf technische Trocknungsverfahren mit aktiver Belüftung und gegebenenfalls Fremdenergie zurückgegriffen werden. Eine effektive Vortrocknung am Stamm kann der technischen Trocknung vorgeschaltet werden. Die technische Trocknung ist jedoch die aufwendigste Trocknungsform und ist daher teurer. Gleichzeitig werden hohe Hackschnitzelqualitäten erreicht. Werden für großtechnische Verbrennungsanlagen niedrige Materialqualitäten aus ökonomischen Faktoren gefordert, sollte auf eine gute Belüftung der Hackgutschüttungen geachtet werden. Mit der vorgestellten Variante der Lagerung von Hackschnitzeln unter einem Dach mit Seitenwänden ist diese anscheinend nicht ausreichend. Eine Abdeckung mit Vlies scheint im Frühjahr und Sommer sinnvoll zu sein, um Niederschläge abzuhalten. Vor dem Herbst und Winter sollte das Material dann aber umgelagert werden.

Um sicher Zielwassergehalte von rund 20% bei geringen Materialverlusten (quantitativ und qualitativ) zu erreichen, sollten natürliche Trocknungsverfahren durch technische Modifikationen, wie oben beschrieben, optimiert werden. Die Tabelle 5-3 gibt eine Entscheidungshilfe, um das passende Trocknungsverfahren in Abhängigkeit verschiedener Zielsetzungen zu wählen.

Tabelle 5-3: Beurteilung von Trocknungsverfahren für Schnitt- und Rodungsholz

Trocknungsverfahren	Erreichen des Zielwasser-gehaltes	Wasserent-zugsrate	Material-qualität	Material-verluste	Bedarf an technischen Einrichtungen	Kosten
Ganzbaum	-	0/+	++	niedrig	niedrig	niedrig
Ballen	+	+	+	niedrig	niedrig	niedrig
Hackschnitzel Dach,Vlies	-	-/0	-/0	mittel	mittel	mittel
Hackschnitzel Dombelüftung	+	+	+	hoch	hoch	mittel
Hackschnitzel technische Trocknung	++	++	++	hoch	hoch	hoch

Bewertungsschema: -- = sehr schlecht; - = schlecht; 0 = neutral; + = gut; ++ = sehr gut

5.4 Anwenderoptimierte Brikettierung von

Obstbaumschnittholz

Holzbricketts werden von den Verbrauchern immer häufiger als Brennstoff in Öfen neben dem Scheitholz eingesetzt. Der größte Vorteil dieses Brennstoffs wird in dessen Normierung gesehen (DEPV, 2010). Bricketts müssen für den Einsatz in nicht-genehmigungspflichtigen Kleinf Feuerungen gemäß 1. Bundesimmissionsschutzverordnung normgerecht nach DIN 51 731 ausgeführt sein. Die neue europäische Norm CEN/TS 14 961-3 findet derzeit aus den in Kapitel 2.4.2 erwähnten Gründen keine Anwendung. Eine Anpassung der Verordnungen wird allerdings erwartet. Nicht der Norm entsprechende Bricketts dürfen nur in genehmigungspflichtigen Anlagen (ab 1.000 kW Nennwärmeleistung) eingesetzt werden (SCHÖN UND HARTMANN, 2011). In der Praxis wird jedoch ein Einsatz von Bricketts in Kleinf Feuerungsanlagen für Privathaushalten angestrebt.

Als Ausgangsmaterial für die Brikettierung diene im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend das Schnittholz aus Obstplantagen. Diese jährlich anfallende Biomasse ist ein Koppelprodukt der

Nahrungsmittelproduktion, da sie aus dem notwendigen Ertragsschnitt an Obstbäumen anfällt. Obstbaubetriebe vermarkten ihr Obst oft in der Direktvermarktung in Hofläden, Marktständen oder Verkaufswagen. Ein Energieträger in Form eines Briketts aus Obstschnittholz würde in das Sortiment einer solchen Vermarktungsstrategie hervorragend eingegliedert werden können. Neben dem hochwertigen Nahrungsmittel Obst könnte der Verbraucher einen handhabungssicheren und regenerativen Brennstoff erwerben, welcher weder in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion noch einer stofflichen Holznutzung steht. Dem Landwirt würde eine weitere Einkommensquelle am Energiemarkt geschaffen werden. Zur Verständigung der Marktpartner und zur Erlangung von Rechtssicherheit sind die Anforderungen der DIN-Norm allerdings zu erfüllen.

Aus den vorhergegangenen Erläuterungen wird ersichtlich, dass die DIN Vorgaben als Referenz für die ermittelten Brennstoffeigenschaften der im Rahmen der vorliegenden Arbeit hergestellten Schnittholzbricketts aus Obstholz herangezogen und diskutiert werden müssen. Dabei können zum einen die stofflichen und zum anderen die technischen Einflüsse auf die Brikettqualität charakterisiert und mit anderen Untersuchungen, sowie den Normen verglichen werden. Stoffliche Abhängigkeiten ergeben sich aus der eingesetzten Biomasse, dem Obstholz. Die technischen Beziehungen zwischen Anlagenkomponenten oder -einstellungen und der Brikettqualität sind beeinflussbar. Anhand der Leistungsmessung kann eine Energiebilanz der Brikettierung aufgestellt werden.

Die in Abschnitt 2.4 aufgestellte Arbeitshypothese „Durch ein innovatives Brikettierungsverfahren kann Obstschnittholz anwenderoptimiert kompaktiert werden“ wird zunächst bezüglich der stofflichen Merkmale und anschließend anhand der technischen Wirkkomplexe diskutiert.

Die Ergebnisse der Brennstoffeigenschaften der Schnittholzbricketts zeigten einen mittleren Brennwert von $17,97 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ auf Trockenbasis. Die DIN 51 731 fordert einen Heizwert von $17,5\text{-}19,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ auf wasser- und aschefreier Bezugsbasis. Für die aschefreie Bezugsbasis muss ein Aufschlag auf den Brennwert in Höhe des Aschegehaltes veranschlagt werden. Aus dieser Überlegung heraus kann der Brennwert auf $19,93 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ berechnet werden. Weiterhin liegt der Brennwert nach HARTMANN (2009c) ca. 6-7% über dem Heizwert. Dies ergibt einen Heizwert der Obstholzbricketts von $18,13 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, der damit im Bereich der Normanforderung liegt. Die Briketts würden auch dem geforderten Heizwert der CEN/TS 14

961-3 für Briketts aus Wald und Plantagenholz von $> 14,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ im Anlieferungszustand ($w = 9,83\%$) entsprechen. Durch die niedrigen Standardabweichungen der Brennwerte ist davon auszugehen, dass alle Briketts die Norm generell erfüllen. Die ermittelten Brennwerte können mit einer Untersuchung von 36 auf dem Markt befindlichen Holzbriketts durch SCHÖN UND HARTMANN (2011) verglichen werden. Dabei konnte im Mittel über alle Briketts ein Heizwert von $18,76 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ auf wasserfreier Bezugsbasis gemessen werden.

Der Wassergehalt kann vom Erzeuger der Briketts über die Trocknung des Rohstoffs einfach beeinflusst werden. Der ermittelte durchschnittliche Wassergehalt des Schnittholzes von 9,83% erfüllt die Anforderungen der DIN 51 731 und der CEN/TS 14 961-3, darüber hinaus auch die der ÖNORM M7135.

Der Aschegehalt ist weitaus kritischer zu betrachten. Den höchsten Aschewert dürfen Rindenbriketts nach der ÖNORM mit 6% besitzen. Die CEN/TS sieht einen anorganischen Rückstand für Briketts aus Wald- und Plantagenholz von maximal 3% und die DIN 51 731 von 1,5% vor. Diese Aschegehalte werden von den Schnittholzbriketts nicht erreicht. Mit fast 11% besitzen die Obstholzpresslinge einen knapp doppelt so hohen Aschegehalt, wie in der ÖNORM gefordert. Aus den Versuchen zu den Brennstoffeigenschaften von Schnittholz aus Obstplantagen ist ein mittlerer anorganischer Rückstand von 3,8% bis 4,8% bekannt. Durch den Prozess der Brikettierung kann dieser nicht erhöht werden. Es ist zu vermuten, dass der Aschegehalt von fast 11% durch einen erhöhten Rindenanteil in den Schnittholzbriketts zustande kam. Der Zusammenhang von Rinden- und Aschegehalt wurde bereits in den Kapiteln 5.1 und 5.2 ausführlich beschrieben. Der hohe Rindenanteil könnte durch die Zerkleinerungskette des Schnittholzes erklärt werden. Das Material wurde vor dem Brikettierprozess, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, mittels Scheibenradhacker zerkleinert. Anschließend wurde das Material unter 12 mm Korngröße ausgesiebt und zur Herstellung der Briketts verwendet. Bei diesem Aufbereitungsschritt ist zu vermuten, dass mehr Rindenanteil zerkleinert wurde, da sich dieser vom inneren Holzteil durch die Trocknung löste. Weiterhin ist die Rinde einfacher zu zerkleinern, sodass es zu einem erhöhten Rindenanteil und damit zu dem Aschegehalt von 10,95% kam. Die Aschegehalte der Briketts aus Akazien- (6,35%) und Paulowniaholz (2,99%) bestätigen die These, da diese als Ganzbaum ebenfalls einen weitaus geringeren Aschegehalt von maximal 2% besitzen (HARTMANN, 2009c; WENGHOEFER, 2012).

Um dieses zu verbessern muss der Aufbereitungsschritt angepasst werden. Es könnte beispielsweise das Schnittholz mittels eines Trommelhackers mit eingebauten 10 mm Korb konditioniert werden. Damit würde das gesamte Holz zerkleinert und der Siebvorgang eingespart werden. Jedoch kann der anorganische Rückstand nur bis auf den Aschegehalt des ursprünglichen Ausgangsrohstoffs reduziert werden. Dieser ist bei Schnittholz aus Obstplantagen mit 3,8 bis 4,8% Aschegehalt immer noch deutlich über der DIN und CEN/TS Normanforderung (siehe dazu auch Kapitel 5.1). Eine weitere Möglichkeit wäre die Beimischung von entrindetem Holz, wie z.B. Sägemehl oder Stammholz. Ob dies eine wirtschaftliche Variante darstellt, hängt sicherlich mit der zukünftigen Preisentwicklung von Rohholz und Briketts ab. Eine Mischbrikettvariante aus Obstholz und halmgutartigen Brennstoffen, wie z.B. Miscanthus, scheidet ebenfalls auf Grund der schlechteren wertgebenden Eigenschaften der halmgutartigen im Vergleich zu Holz aus.

In dem Brikettscreening von SCHÖN UND HARTMANN (2011) erwies sich der anorganische Rückstand ebenfalls als kritische wertbestimmende Eigenschaft. In der Untersuchung wurden 11 von 36 Briketts identifiziert, die die Normvorgaben der DIN 51 731 nicht erfüllten. Dabei zeigten sechs Presslinge einen Aschegehalt von über 3% und konnten daher die Normanforderungen der CEN/TS 14 961-3 nicht erfüllen.

Ein weiterer Punkt ist die elementare Zusammensetzung der Obstholzbriketts. Diese wurde zwar nicht speziell für die Briketts untersucht, Aussagen können aber anhand der Ergebnisse zu den Brennstoffeigenschaften von Schnittholz getroffen werden. Zu erwarten ist, dass zu mindestens der Normgrenzwert für Kupfer von den Briketts überschritten wird. Der Kupfergehalt in Schnittholz konnte mit $10,83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ analysiert werden. Dessen Herkunft aus der Kupferapplikation als Fungizid wurde bereits in Kapitel 5.1 diskutiert. Nach CEN/TS ist ein maximaler Wert von $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gefordert. Nach der DIN 51 731 darf der Kupfergehalt maximal $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ betragen. Ein Ersatz des Kupfers durch andere Fungizide wäre für die Herstellung von Briketts aus Schnittholz zielführend. Durch die Herstellung von Mischbriketts könnte die elementare Zusammensetzung der Presslinge ebenfalls verbessern werden.

Die Abriebfestigkeit und Partikeldichte sind zum einen vom eingesetzten Material abhängig, können jedoch über die eingesetzten Technikkomponenten beeinflusst werden. Bei der Abriebfestigkeit konnte beobachtet werden, dass die Montage einer Abkühlstrecke zur tendenziellen Verbesserung der Brikettqualität führte. Ein Unterschied zwischen der aktiven

und passiven Abkühlstrecke konnte dabei nur beim Obstholz festgestellt werden. Dieses zeigte im Vergleich mit den Holzarten Akazie und Paulownia allgemein leicht geringere mechanische Festigkeit, die aber durch eine zunehmende Abkühlleistung verbessert wurde. Die geringeren Abriebfestigkeiten der Obstholzbriketts könnten durch die geringeren Temperaturen am Presskanal zu erklären sein. Auch NIEDZIOLKA UND SZYMANEK (2010) zeigten in ihren Untersuchungen zur Brikettierung von Biomassen, dass beim Einsatz verschiedener Biomassen die Temperatur am Presskanal differiert. In Folge dieser wurde ebenfalls ein unterschiedlich starker Verglasungseffekt auf der Briktoberfläche beobachtet (NIEDZIOLKA UND SZYMANEK, 2010). In den eigenen Untersuchungen lagen die Temperaturen bei der Brikettierung von Obstholz um 5-7 K niedriger als beim Paulowniaholz und 10-15 K geringer als beim Akazienholz. Damit wird weniger Lignin verflüssigt und der Verglasungseffekt nimmt ab. Mit der Montage einer Abkühlstrecke wird diesem Effekt entgegengewirkt, da verflüssigtes Lignin wieder unter Druck in der Abkühlstrecke aushärten kann und so die Oberfläche glatter wird. Dennoch scheint das Obstschnittholz hinsichtlich des Verglasungseffektes nicht der optimale Rohstoff für die Brikettierung zu sein.

Für die Abriebfestigkeit wurde bisher in keiner Brikettnorm ein Wert angegeben, weswegen die ermittelten Daten nur mit denen des Brikettscreening von SCHÖN UND HARTMANN (2011) verglichen werden können. In diesem konnte eine mechanische Festigkeit im Mittel aller 36 untersuchten Briketts von 97,9% gemessen werden, wobei die geringste Abriebfestigkeit mit 90,6% und die höchste von 99,7% ermittelt wurde. Wird ein Mittel über die Abriebfestigkeiten der Briketts aus den Varianten mit aktiver und passiver Abkühlstrecke für die drei Holzarten Obst, Akazie und Paulownia gebildet, ergibt sich ein Abrieb von 97,23%. Dagegen besitzen die Varianten ohne Abkühlstrecke nur ein arithmetisches Mittel von 94,22%. Somit wird durch die Montage einer Abkühlstrecke die Abriebfestigkeit um rund 3% verbessert. Je höher die mechanische Festigkeit desto beständiger sind die Briketts gegen Abrieb und Stöße bei Handhabung und Transport (SCHÖN UND HARTMANN, 2011). Ein Grenzwert von 95% konnte mit Obstholz und Abkühlstrecke gut eingehalten werden. Für Holzpellets wurde in der europäischen Norm CEN/TS 14 961-2 ein Grenzwert von 97,5% festgelegt. Die Normvorgaben auf Pelletniveau anzuheben ist aufgrund der unterschiedlichen Handhabung von Briketts und Pellets fragwürdig. Da die Pelletindustrie mit einer automatisierten Be- und Entladetechnik arbeitet, müssen höhere Abriebfestigkeiten gefordert werden, als bei der überwiegend manuellen Handhabung von

182

Briketts. Eine weitere Verbesserung des Abriebs könnte durch einen Fallweg am Ende der Abkühlstrecke auf ein Sieb erreicht werden. Dadurch würde loses Material an der Oberfläche der Briketts abfallen. Eine weitere Optimierung könnte durch einen noch längeren Abkühlweg (hintereinander schalten von Abkühlstrecken) erreicht werden, damit das Brikett auf eine geringere Temperatur bei gleichzeitiger Formerhaltung gebracht wird.

Die Partikeldichte nimmt Einfluss auf die Brenndauer von Briketts. Nimmt diese zu, vergrößern sich die Nachlegeintervalle des Brennstoffs in den Heizanlagen (RABIER ET AL., 2006; TEMMERMAN ET AL., 2006). Die Teilchendichte von Briketts ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der Form und dem eingesetzten Material sind vor allem der Pressdruck und der Wassergehalt bei der Kompaktierung ausschlaggebend (NDIEMA ET AL., 2001; RABIER ET AL., 2006). Die Form war bei allen hergestellten Briketts dieser Arbeit einheitlich rund. Eine Materialabhängigkeit der Partikeldichte konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Mit denselben Maschineneinstellungen und Anlagenkomponenten konnten signifikant höhere Dichten bei den Obstholz- und Akazienbriketts im Vergleich zu den Paulowniapresslingen erzielt werden. Dies ist durch die verschiedenen Rohdichten der Ausgangsholzarten zu erklären. Paulowniastammholz besitzt eine Rohdichte zwischen $0,29 \text{ g*cm}^{-3}$ und $0,30 \text{ g*cm}^{-3}$ (AKYILDIZ UND KOL, 2010; PÜHL, 2012). Dagegen besitzt Apfelholz eine Dichte bezogen auf die Trockenmasse von $0,69\text{-}0,74 \text{ g*cm}^{-3}$ (MANSFELD, 1984). Damit muss Paulowniaholz mit einem höheren Druck komprimiert werden als Obstholz.

Dass der Pressdruck Einfluss auf die Partikeldichte besitzt, wurde ebenfalls in dieser Arbeit nachgewiesen. Durch eine Steigerung des Pressdrucks um 2 mPa von 12 auf 14 mPa konnte die Partikeldichte der Obstholz briketts von durchschnittlich $0,94 \text{ g*cm}^{-3}$ auf $1,08 \text{ g*cm}^{-3}$ erhöht werden. Dies entspricht einer Zunahme von fast 15%. Ein Zusammenhang zwischen dem Pressdruck und der Teilchendichte besteht jedoch nur bis zu einem bestimmten Pressdruck. Eine weitere Steigerung des Pressdruckes hat dann nur noch eine geringe Zunahme der Partikeldichte zur Folge. Diese ist jedoch wieder sehr stark materialabhängig (NDIEMA ET AL., 2001). Eine Abhängigkeit der Brikettdichte vom Wassergehalt konnte nicht direkt nachgewiesen werden. Die Quellungen und Schrumpfungen nach dem Pressvorgang veränderten sich weniger durch den Wassergehalt des Materials, als durch die Montage einer Abkühlstrecke. Durch die Abkühlstrecke und den oben beschriebenen verbesserten Verglasungseffekt nimmt die Ausdehnungsintensität nach der Kompaktierung ab. Durch die

Verbesserung der Kühlleistung mit der aktiven, wassergekühlten Abkühlstrecke konnte eine weitere tendenzielle Verbesserung der Eigenschaften der Briketts beobachtet werden. Mit den vorgestellten Untersuchungen wurde erstmals der Einfluss der Kühlleistung einer Abkühlstrecke nach dem Kompaktierungsprozess auf die Qualität der hergestellten Briketts untersucht. Daraus wurde die Idee der aktiven Abkühlstrecke entwickelt und der verbessernde Effekt auf die Brikettqualität beobachtet. Weitere spezifische Untersuchungen an verschiedenen Brikettieranlagen müssen die Ergebnisse in Zukunft absichern.

Die Brikettnormen (DIN 51 731; ÖNORM M7135; CEN/TS 14 961-3) schreiben alle eine Partikeldichte von mindestens $1,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ vor. Eine Ausnahme bildet die CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz, die eine Dichte von $>0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ vorsieht. Aus Obst- und Akazienholz konnten normkonforme Briketts hergestellt werden. Die Paulowniapresslinge erfüllen die Normanforderungen nicht. Eine Montage einer Abkühlstrecke sichert die Einhaltung der Norm mit einer Erhöhung der Partikeldichte um ca. $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$ ab.

Zusammenfassend aus den Versuchen kann festgehalten werden, dass die Briketts aus Obstholz hinsichtlich der Brennstoffeigenschaften der nach den beschriebenen Methoden hergestellten Presslinge die Normkriterien der CEN/TS 14 961-3 für Wald- und Plantagenholz nur teilweise erfüllen. Besonders die hohen Aschegehalte sind als problematisch anzusehen. Weiterhin ist eine Überschreitung des Kupfergrenzwerts wahrscheinlich. Hinsichtlich des Wassergehalts und des Brennwertes erfüllen die Briketts die Normkriterien. Auch hinsichtlich der Abriebfestigkeit und Partikeldichte konnten qualitativ hochwertige Briketts hergestellt werden. Eine Optimierung der Abkühlstrecke hatte einen positiven Einfluss auf die letztgenannten Qualitätseigenschaften. Ein Einsatz und die Vermarktung der Obstholzbriketts im Rahmen von Direktvermarktungsbetrieben an Privatkunden mit Hausbrandstätten ist nach derzeitiger Rechtslage nicht möglich, da der Brennstoff die Normkriterien nicht voll erfüllt.

Abschließend wird eine energetische Betrachtung des Brikettiervorgangs durchgeführt. Der durchschnittliche Energieverbrauch für die in dieser Arbeit eingesetzte Brikettierung konnte mit $58,40 \text{ kWh}$ pro Tonne zu kompaktierendes Material ermittelt werden. Daraus konnten Stromkosten in einer Höhe von ca. $15 \text{ €}\cdot\text{t}^{-1}$ errechnet werden (siehe Kapitel 4.4.3). Die Energiekosten zur Brikettierung belaufen sich somit auf ca. $6-7,5\%$ des Verkaufserlös, bei einem angenommenen Verkaufspreis von $200-250 \text{ €}\cdot\text{t}^{-1}$. Der Energiegehalt eines

Obstholzbriketts mit einem Brennwert von $19,97 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ beträgt $4.992 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$. Daraus ergibt sich ein Energieeinsatz für den Brikettierungsprozess von 1,17% des Brennwertes. Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert den Energieinput für die Konditionierung nicht inkludiert. Im Vergleich dazu muss mit einem Energieaufwand für den reinen Schritt der Pelletierung mit 1,5-3,8% geplant werden (HASLER ET AL., 2001). Aus diesen Betrachtungen ist ersichtlich, dass die Brikettierung grundsätzlich ein ökonomisch und ökologisch vertretbarer Veredelungsschritt von Biomassen darstellt.

Aus den gesamten vorangegangenen Ausführungen kann die eingangs aufgestellte Arbeitshypothese „Durch ein innovatives Brikettierungsverfahren kann Obstschnittholz anwenderoptimiert kompaktiert werden“ nur zum Teil als erfüllt angesehen werden. Der Rohstoff Schnittholz aus Obstplantagen ist für die Brikettierung aufgrund des hohen Asche- (3,8-4,8%) und Kupfergehalts ($10,83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) nur eingeschränkt geeignet. Für das geplante Haupteinsatzziel in nicht-genehmigungspflichtige Kleinf Feuerungsanlagen in Privathaushalten muss auf Grund der Defizite in den normativen Qualitätseigenschaften das Eingangsmaterial optimiert werden. Auch bei einer verbesserten Konditionierung muss zur Produktion von normkonformen Briketts ein zusätzlicher Holzrohstoff mit niedrigem Aschegehalt zugemischt werden. Obstbetriebe sollten daher nach derzeitigem Kenntnisstand auf die Brikettierung von Schnittholz mit dem Hintergrund der Direktvermarktung der Presslinge verzichten. Weitere Versuche sind zur Verifizierung der getätigten Vermutungen notwendig.

Durch eine Anpassung der Maschineneinstellung und die Optimierung der Anlagenkomponenten, v.a. der Abkühlstrecke nach dem eigentlichen Pressvorgang, konnten die Qualitätseigenschaften der hergestellten Briketts verbessert werden. Diese Erkenntnisse können zur allgemeinen Optimierung der Briketherstellung beitragen. Die ökonomisch, ökologische Betrachtung des Brikettiervorgangs zeigt die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens auf.

6. Zusammenfassung

Die steigende Weltbevölkerung mit neuen Ernährungsgewohnheiten bei gleichzeitiger Verknappung landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Industrie- und Siedlungsbau, sowie die Folgen des Klimawandels auf die Landbewirtschaftung und Umwelt sind die Herausforderungen für die moderne Landwirtschaft. Neben der klassischen Nahrungs- und Futtermittelproduktion werden zunehmend Flächen zur Erzeugung von Energiepflanzen zur Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion genutzt. Diese Entwicklung treibt eine in der Politik und Gesellschaft geführte „Tank oder Teller“ –Diskussion an. Mit der vorliegenden Dissertation wurde ein praxisgerechtes Modell aufgezeigt, mit dem durch Kaskadennutzung von Obstplantagen die Erzeugung von Nahrungsmitteln und Energieträgern synergetisch möglich ist.

Neben dem hochwertigen Nahrungsmittel Obst fallen in Baumobstplantagen holzartige Biomassen in einem Kaskadensystem an. Ziel der Arbeit war es, diese Biomassepotenziale quantitativ und qualitativ zu beschreiben. Weiterhin wurde die technische Erschließung der Potenziale, sowie deren Bereitstellung bis zum energetisch einsetzbaren biogenen Festbrennstoff untersucht.

Der Biomassertrag aus dem jährlich anfallenden manuellen Ertragschnitt von modernen Apfelanlagen konnte im Durchschnitt mit $1,2 \text{ t TM} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ermittelt werden. Dieser bleibt nach der Etablierung der Plantage in ihrer Ertragsphase nahezu konstant, wird aber durch Kulturführung und Witterung beeinflusst. Durch die Verwendung des Schnittholzes können jährlich ca. 530 Liter Heizöläquivalente pro Hektar moderner Apfelanlage nutzbar gemacht werden. Die Brennstoffqualität ist durch hohe Aschegehalte zwischen 3,8-4,8% gekennzeichnet. Dieser wird durch den hohen Rindenanteil und exogene Verschmutzungen, sowie Nährstoffakkumulationen in und auf der Rinde bedingt. Die brennstofftechnischen Eigenschaften wiesen in der Obstertragsphase homogene Qualitäten auf. Die getestete Schnittholzsammeltechnik erwies sich besonders in den Zerkleinerungsorganen in Form von Schlegelrotoren als nachteilig. Normkonforme Stückigkeiten des Brennstoffs konnten nicht erreicht werden. Neuentwicklungen in der Schnittholzsammeltechnik mit eingebautem Hackorgan sind dahingehend zu bevorzugen. Eine Bereitstellung des Schnittholzes in Form

von Ballen ist ebenfalls denkbar. Bei allen Techniken erwies sich eine Pick-up Einrichtung zur sauberen Aufnahme des Schnittholzes aus dem Schwad als zielführend. Bisher sind noch keine absolut praxistauglichen Geräte erprobt.

Die Rodungsholzmenge von Apfelplantagen auf der Unterlage M9 nach ihrer Nutzungszeit von 10-15 Jahren konnte sortenabhängig mit $10,5-22,9 \text{ t TM*ha}^{-1}$ bestimmt werden. Diese ist neben der angebauten Obstsorte vom Standort, dem physiologischen Zustand der Plantage, sowie dem verwendeten Unterstützungsgerüst und dessen Verwertung abhängig. Durch die Kaskadennutzung der Baumobstplantagen können 4.250-9.750 Liter Heizöl pro Hektar ersetzt werden. Zur Nutzung dieser Potenziale wurde ein neues Rodeverfahren „RB 60 Klein-Altendorf“ entwickelt. Mit diesem können auf Basis eines Seitenrodepflugs alle klassisch angebauten Kernobstbestände zusammen mit ihrer Wurzel und dem Unterstützungspfahl praxisreif geborgen werden. Ein besonderer Vorteil dieses vollmechanisierten Verfahrens stellt neben der maximalen Biomassennutzung die Möglichkeit der Wiederverwendung der Stützpfähle und die geringen Holzrückstände auf dem Acker dar. Eine Aufbereitung der Obstbäume nach der Rodung mittels Schredder- und Siebanlagen erwies sich als praxistauglich. Der bereitgestellte Brennstoff besitzt verfahrensbedingt eine grobe Stückgeometrie sowie durch den hohen Rindenanteil und mineralische Anhaftungen an der Wurzel einen Aschegehalt von 4,1-7,1%. Dieser hat einen negativen Einfluss auf den Brennwert. Durch die brennstofftechnischen Eigenschaften (grobe Stückgeometrie, hoher Aschegehalt, niedriger Brennwert, exogene Verschmutzungen) ist der Einsatz dieses Festbrennstoffs in größeren Heizanlagen vorzusehen.

Da das Schnitt- und Rodungsholz nach der Bereitstellung einen hohen Wassergehalt zwischen 40-55% besitzt, ist für eine thermische Nutzung eine Trocknung des Materials anzustreben. Bei den Trocknungsversuchen zeigte sich, dass die Trocknungsverfahren auf die jeweiligen Biomassen und betrieblichen Zielsetzungen anzupassen sind. Eine natürliche Trocknung des Brennstoffes ohne vorherige Zerkleinerung ist die einfachste Variante, besitzt aber geringe Wasserentzugsraten von $0,02-0,19\%*d^{-1}$. Zielwassergehalte von 20% können mit diesem Verfahren ebenfalls nicht erreicht werden. Wird mit speziellen Erntemaschinen, wie einem Restholzbündler oder dem BioBaler, das Schnitt- oder Rodungsholz bereitgestellt, sind durch das Aufreißen der Holzfasern höhere Trocknungsraten von 0,2-0,24% Wasserentzug pro Tag und das sichere Erreichen der Zielwassergehalte zu beobachten. Wird

die Biomasse direkt zu Hackschnitzeln verarbeitet und sind hohe Materialqualitäten gefordert, sollten technische Einrichtungen die Trocknung unterstützen. Die Trocknungsraten von Hackschnitzelschüttungen ohne technische Einrichtungen sind mit $0,01-0,03\% \cdot d^{-1}$ sehr gering.

Mit dem Schritt der Brikettierung sollte das gewonnene Schnittholz zu einem Brennstoff mit normativen Eigenschaften für die Direktvermarktung in Obstbetrieben veredelt werden. Technisch konnte der Brikettierprozess durch eine neu entwickelte, wassergekühlte Abkühlstrecke verbessert werden. Durch den Einsatz dieser Entwicklung konnten die Qualitätseigenschaften der Briketts hinsichtlich Abriebfestigkeit und Partikeldichte optimiert werden. Der nötige Energieeinsatz für den Veredelungsschritt der Brikettierung wurde für Obstholz mit 1,17% des Brennwertes ermittelt. Die brennstofftechnischen Eigenschaften der Obstholzbriketts sind für die Brikettierung allerdings nicht optimal und könnten durch die Beimischung von Festbrennstoffen mit höherwertigen Brennstoffqualitäten optimiert werden.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Biomassepotenziale aus der Kaskadennutzung von Obstplantagen zur energetischen Erzeugung genutzt werden können. Die besonderen brennstofftechnischen Eigenschaften von Obstholz sind bei der Planung von Verbrennungsanlagen zu berücksichtigen, wobei die Biomassen eher für Anlagen im oberen Leistungssegment geeignet sind. Eine Veredelung des Festbrennstoffes aus Obstplantagen durch den Schritt der Brikettierung ist nach bisherigem Erkenntnisstand nicht uneingeschränkt möglich. Für die technische Bereitstellung der Potenziale sind die grundlegenden Entwicklungen vorhanden und können mit den neuen Erkenntnissen aus der vorliegenden Arbeit optimiert werden. Die einzelnen Verfahrensschritte der Bereitstellungskette sind, genauso wie die Trocknungsverfahren, individuell auf den Betrieb abzustimmen und in ein energetisches Gesamtkonzept einzugliedern. Für Obstbaubetriebe bietet sich durch die Nutzung von Schnitt- und Rodungsholz eine energetisch interessante Alternative mit der ca. 1.000 Liter Heizöl pro Hektar und Jahr ersetzt werden können. Die regionale Wertschöpfung ist durch die Kaskadennutzung sehr hoch. Bei einem Anbauumfang von 48.000 Hektar Baumobstfläche in Deutschland können mit der Nutzung der Potenziale rund 19.000 Haushalte mit Wärmeenergie versorgt werden, ohne zusätzliche land- und forstwirtschaftliche Fläche für die Energieversorgung zu belegen.

7. Literaturverzeichnis

Normen

Deutsches Institut für Normung e.V (DIN)

Comité Européen de Normalisation (CEN)

- DIN EN 14 774-2 (2009) Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren
- DIN EN 14 775 (2009) Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes
- DIN CEN/TS 14 780 (2005) Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung
- DIN EN 14 918 (2009) Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes
- DIN CEN/TS 14961-1 (2010) Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen
- CEN 14 961-2 (2010) Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use
- DIN CEN/TS 14 961-3 (2010) Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen – Teil 3: Holzbriketts für nichtindustrielle Verwendung
- DIN CEN/TS 15103 (2010) Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte
- DIN 15 149-1 (2010) Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Teil 1: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 1 mm und darüber
- DIN 15 210-2 (2010) Feste Biomassen - Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts – Teil 2: Briketts
- DIN 51 603-1 (2011) Flüssige Brennstoffe – Heizöl – Teil 1: Heizöl EL, Mindestanforderungen
- DIN 51 731 (2010) Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung

Austrian Standards Institute (ASI)

- ÖNORM M 7133 (1998) Holzhackgut für energetische Zwecke – Anforderungen und Prüfbestimmungen
- ÖNORM M 7135 (2000) Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts – Anforderungen und Prüfbestimmungen

Literatur, Veröffentlichungen und Vorträge

- AKYILDIZ, H. UND KOL, S. (2010) Some technological properties and uses of paulownia wood. *Journal of Environmental Biology* 31, 351-355
- ALBURQUERQUE, J.; GONZÁLVES, D.; GARCIA, D.; CEGARRA, J. (2006) Effects of bulking agent on the composting of "alperujo", the solid by product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Process Biochemistry* 41-1, 127-132
- ATKINSON, D. (1983) The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. *Plant and Soil* 71, 23-25
- BAAB, G. (2011) Die Fruchtwand - Arbeitswirtschaftliche Überlegungen. *Monatsschrift Magazin für den Gartenbau-Profi* 10/11, 566-569
- BAAB, G. UND LAFER, G., (2005) *Profi-Guide Obst, Kernobst Harmonisches Wachstum – optimaler Ertrag*. AVBuch im Österreichischen Agrarverlag Druck- und Verlagsges.m.b.H Nfg. KG
- BALMER, M. (2002) Süß- und Sauerkirsche. In Link, H. (Hrsg.): *Lucas` Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 126-128
- BLOCK, A. (2004) Göttinger Mähhäcksler Tritucap und Forstmulcher – Nichtbrennende Flächenvorbereitung am Beispiel der Zona Bragantina, Nord-Ost-Amazonien, Brasilien. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften
- BMELV (2012) *Bioenergie in Regionen – Ein Ratgeber basierend auf den Ergebnissen des Wettbewerbs Bioenergie-Regionen*. BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Berlin
- BÖHM, T. (2005) Verfahren zur Bestimmung physikalischer Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes biogener Festbrennstoffe. Dissertation an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
- BRUMMACK, J. (2008) Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 63, Potsdam-Bornim, 5-20
- BSA (2000) Beschreibende Sortenliste Kernobst – Apfel und Birne. Bundessortenamt (BSA), Landbuch Verlagsgesellschaft, Hannover
- BUCHANAN-WOLLASTON V. (1997) *The molecular biology of leaf senescence*. *J Exp Bot*, 307, 181-199

- BUSCH, R. (2006) Krankheiten und Schädlinge im ökologischen Obstbau, Schadbilder, Biologie und Bekämpfung von Schaderregern. Informationsmaterial für Berufsschulen, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)
- CURTIS, L. (2002) Biomass burning: wood, leaves, grass, forests, crops and trash. Burning Issues Special Edition, Nov. 11-2002
- DESTATIS (2006) Erzeugung und Verbrauch von Nahrungsmitteln. Presse-exemplar, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- DIEPENBROCK, W.; ELLMER, F.; LEÓN, J. (2005) Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung – Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart
- DOLEGA, E. UND LINK, H. (2002) Biologische Grundlagen des Obstbaus. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 16-73
- DRESCHER, N.; FADER, B.; FRITZSCHE-MARTIN, A.; HAUG, P.; KAUER, R.; KIENZLE, J.; REINERS, E.; RÖHRIG, P. (2009) Strategiepapier zu Kupfer als Pflanzenschutzmittel unter besonderer Berücksichtigung des Ökologischen Landbaus. Obstbau – Fachzeitschrift für den Obstbauprofi, Archivmeldung-Sonderdruck
- ELLINGER, W. (2002) Obstbau weltweit, in Europa und in Deutschland. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 11-12
- ELLWEIN, U. UND MESCHENMOSE, H. (2012) Maschinelles Baumschnitt. Obstbau – Fachzeitschrift für den Obstbauprofi 3/2012, 77-80
- ENGEL, G. (1989) Der Obstbau im Rheinland. Erwerbsobstbau, 31. Jg., 13-15
- FELDWISCH (2010) Agro-Energieerzeugung in der Region Stuttgart – Chancen und Risiken. Ingenieurbüro Feldwisch; IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung; Büro für Umwelt und Regionalentwicklung; Bergisch-Gladbach, Heidelberg und Obensburg am Main
- FILBAKK, T.; JIRJIS, R.; NURMI, J.; HOIBO, O. (2011) The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. Biomass and Bioenergy 35, 3342-3349
- FIRUS, S. (1987) Rationeller Energieeinsatz bei der Zerkleinerung von Holz aus Obstplantagen. Mitteilung des Institutes für Obstforschung Dresden-Pillnitz der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR in Gartenbau 34
- FNR (2000) Leitfaden Bioenergie. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e.V. (Hrsg.), Gülzow

- FNR (2012) Energieholz aus der Landwirtschaft. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e.V. (Hrsg.), Gülzow
- FREY, M. (2012) Wärme aus dem Weinberg - Schnittholz aus Rebstöcken für umweltfreundliches Heizen. Energie Pflanzen, 16. Jahrgang Nr. 1/2012, 34-36
- GÜNTHER, B.; BEBAUER, K.; BARKOWSKI, R.; ROSENTHAL, M. BUES, C. (2012) Calorific value of selected wood species and wood products. Eur.J. Wood Production 70, 755-757
- HARTMANN, H. (2009a) Mechanische Aufbereitung. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 245-276
- HARTMANN, H. (2009b) Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 277-332
- HARTMANN, H. (2009c) Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 333-461
- HARTMANN, H. UND HERING, T. (2004) Kenngrößendefinition. In Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Thrän, D.; (Hrsg.): Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 23, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e.V. (Hrsg.) Gülzow, 29-108
- HARTMANN, H. UND WITT, J. (2009) Mechanische Aufbereitung. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 245-276
- HASLER, P.; NUSSBAUMER, T.; BÜRLI, J. (2001) Herstellung von Holzpellets – Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamt für Energie und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz; ENET, Arbon (Schweiz)
- HÄRDTLEIN, M.; ELTROP, L.; THRÄN, D. (2004) Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 23; Landwirtschaftsverlag, Münster
- HILBERS, I. (2012) Gerüstsysteme im Obstbau – Einzelpfahl oder Gerüst, Holz oder Beton. Monatsschrift Magazin für den Gartenbau-Profi, 09/12, 530-533

- HOFFMANN, M. (2009) Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- IDLER, C.; SCHOLZ, V.; DARIES, W.; EGERT, J. (2004) Quality changes of chipped short rotation coppice during storage with special emphasis on human pathogen fungi. 9th International Conference "Ecological energy resources in agriculture", Litaauen, Institut of Agriculture Engineering LUA, 117-123
- JÄGER, R.; DEFFNER, G.; GEITNER, L. (1998) Technik der Waldbewirtschaftung. In Bleymüller, H. und Kathol, G. (Hrsg.): Waldwirtschaft – Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen; BLV Verlagsgesellschaft, München u.a., 109-155
- JÖNSSON, A. (2011) Zank um Holzpotenziale. Forst und Technik – Zeitschrift für Waldarbeit, Forsttechnik und Holztransport; 12/2011
- KALIEß, D. (2008) Untersuchungen zur Ursache und Behebung der Bodenmüdigkeit in Rebschulen. Dissertation an der Freien Universität Berlin, Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie
- KALTSCHMITT, M. (2009) Biomasse als nachwachsender Energieträger. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 1-7
- KENNEY, W.; SENNERBY-FORSSE, L.; LAYTON, P. (1990) A Review of Biomass Quality Research Relevant to use of Poplar and Willow of Energy Conversion. Biomass 21 (1990), 163-188
- KHIDER, T. UND ELSAKI, O. (2012) Heat Value of Four Hardwood Species from Sudan. Journal of Forest Products and Industries, 1 (2), 5-9
- KLEISINGER, S. UND SINN, H. (2002) Maschinen und Geräte. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 324-337
- KÖPCKE, D. (2012) Qualität von Obstbaumpfählen. Obstbau – Fachzeitschrift für den Obstbauprofi 9/2012, 476-480
- KRÄMER, G. UND HEISE, K. (2010) Technische Trocknung von Scheitholz. Informationsschrift für die Brennholzwirtschaft, Institut für Brennholztechnik IBT Krämer (Hrsg.), Bad Wildungen
- KROMER, K.; MOSER, E.; RANNERTSHAUSER, J. SCHULZE LAMMERS, P.; SINN, H. (1982) Verwertung von Obst-Schnittholz. KTBL-Schrift 275; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- KTBL (2009) Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

- KTBL (2010) KTBL-Datensammlung Obstbau, Betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Kalkulationen. 4. Auflage; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- KÜHNE, S.; STRASSEMAYER, J.; ROßBERG, D. (2009) Anwendung kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel in Deutschland. Journal für Kulturpflanzen, 61 (4), 126-130
- LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NRW (2004) Obstbau in NRW 1987/88-2002 – Baumobstfläche und Baumobstbestände. Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW, Düsseldorf
- LEPSIS, J. UND BLANKE, M. (2007) Environmental Effects, Phytotoxicity and Breakdown of Tar Oil from Impregnated Tree Stakes. Acta Hort. 732
- LEWANDOWSKI, I. (2009) Biomasseentstehung. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 41-74
- LANGE, E.; HARZER, U.; BALMER M.; NIKUSCH, I.; FRIED, A. (2002) Krankheiten und Schädlinge und ihre Bekämpfung. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 272-324
- LINK, H. (2002) Pflege- und Kulturmaßnahmen. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 193-261
- LWF (2011) Der Energiegehalt von Holz. Merkblatt 12 der bayrischen Forstverwaltung, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- MANSFELD, W. (1984) Untersuchungen zur quantitativen und qualitativen Bestimmung der Dendromasse in Obstplantagen. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Forstwirtschaftliche Fakultät, Tharandt
- MOSER, E. (1981) Energiegehalte der Reststoffe aus Intensivkulturen. BMFT-Forschungsbericht ET 5319 A
- NAEF, A.; KNORST, V.; JÄNISCH, M.; MONNEY, P. (2012) Nachbauprobleme beim Apfel. Obstbau – Fachzeitschrift für den Obstbauprofi 7/2012, 379-388
- NDIEMA, C.; MANGA, P.; RUTTOH, C. (2001) Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. Energy Conversion and Management 43, 2157-2161
- NEFF, A. (2007) Aufbereitung von Hackschnitzel zur energetischen Verwendung unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Sierke Verlag, Göttingen

- NIEDZIOLKA, I. UND SZYMANEK, M. (2010)
An Estimation of Physical properties of briquettes produced from plant biomass. Department of Agricultural Machines Science, University of Life Science in Lubin, Poland, OL PAN, 2010-10, 301-307
- NITSCH, J.; NAST, M.; PEHNT, M.; TRIEB, F. (2001)
Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland. Stuttgart, Karlsruhe
- NORD-LARSEN, T.; BERGSTEDT, A.; FARVER, O.; HEDING, N. (2011)
Drying of firewood – the effect of harvesting time, tree species and shelter of stacked wood. Biomass and Bioenergy, Volume 35 (7), 2993-2998
- NULTSCH, W. (2001):
Allgemeine Botanik. 11. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart
- OBERNBERGER, I. (2009)
Feste Konversationsrückstände und deren Verwertung. In Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren. 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin (u.a.), 441-463
- OPITZ VON BOBERFELD, W. (1994)
Grünlandlehre: biologische und ökologische Grundlagen. Ulmer Verlag, Stuttgart
- OTTO, G. (1964)
Ein Beitrag zur weiteren Mechanisierung des Obstbaumschnittes. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin
- PORBATZKI, D. (2008)
Freisetzung anorganischer Spezies bei der thermochemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen
- PÜHL, J. (2012)
Perspektiven für den kommerziellen Anbau von Paulownia (*P. tomentosa*) in Deutschland. Diplomarbeit an der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
- RABIER, F.; TEMMERMAN, M.; BÖHM, T.; HARTMANN, H.; JENSEN, P.; RATHBAUER, J.; CARRASCO, J.; FERNÁNDEZ, M. (2006)
Particle density of pellets and briquettes. Biomass & Bioenergy 30, 954-963
- SCHERR, F. (1984)
Das Roden von Obstplantagen. Obst und Garten 1/1984, 32-34
- SCHERR, F. (2002a)
Errichtung einer Obstanlage. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 168-193
- SCHERR, F. (2002b)
Vermehrung und Anzucht der Obstgewächse. In Link, H. (Hrsg.): Lucas` Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 155-168

- SCHMID, M. UND PUDE, R. (2011)
Klimaschonend Energieeffizienz erhöhen. Monatsschrift
Magazin für den Gartenbau-Profi 10/11, Sonderteil Energie,
583-584
- SCHÖN, C. UND HARTMANN, H. (2011)
Charakterisierung von Holzbriketts – Brennstofftechnische,
physikalische und stoffliche Eigenschaften - eine
Marktstichprobe. Berichte aus dem TFZ Nr. 24 (Technologie-
und Förderzentrum) im Kompetenzzentrum für
Nachwachsende Rohstoffe, Straubingen
- SCHULZ, B. UND GROSSMANN, G. (2002):
Obstgehölze erziehen und schneiden. Eugen Ulmer Verlag,
Stuttgart
- STEHR, R. (1990)
Komplettröschung stehender M9-Anlagen - Bericht über eine
Maschinenvorführung. Mitteilung des OVR
(Obstbauversuchsring) Jorg, 6, 190-195
- SINN, H. UND MOSER, E. (1982) Obstbaumschnitt. In Kromer, K.; Moser, E.; Rannertshäuser, J.
Schulze Lammers, P.; Sinn, H. Verwertung von Obst-Schnittholz.
KTBL-Schrift 275; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der
Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- SNYDER, R. UND MELO-ABREU, J. (2005)
Frost Protection: fundamentals, practice an economics.
Publishing Management Service of Food and Agriculture
Organization of the United Nations (FAO), Rome
- TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2006)
Comparative study of durability test methodes for pellets and
briquettes. Biomass & Bioenergy 30 (11), 964-972
- VON GLISCZYNSKI, F. (2011)
Qualitätsbeurteilung des BioBaler in Kurzumtriebsplantagen.
Diplomarbeit an der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms
Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät,
Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
- WALKI (2011)
Abdeckplanen für Biomasse. Firmenmitteilung in Forst und
Technik – Zeitschrift für Waldarbeit, Forsttechnik und
Holztransport 6, 83
- WATSON, R.; NOBLE, I.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N.; VERARDO, D.; DOKKEN, D. (2000)
Land use, Land-use change and Forestry. Cambridge University
Press, Cambridge
- WEBER, M. (2002)
Unterlagen bei den Obstarten. In Link, H. (Hrsg.): Lucas`
Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 146-155
- WEINGARTMANN, H. (1991)
Hackguttrocknung. 178 Landtechnische Schriftenreihe des
Österreichisches Kuratorium für Landtechnik (ÖKL), Wien

- WENGHOEFER, V. (2010) Wuchsleistung von Paulownia im Vergleich zu Pappel- und Weidenklonen im ersten Kurzumtrieb. Diplomarbeit an der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
- WHITE, R. (1987) Effect of Lignin Content and Extractives on the Higher Heating Value of Wood. Wood and Fiber Science, 19 (4), 446-452
- WIINIKKA, H.; GEBART, R.; BOMAN, C.; BOSTZRÖM, D.; ÖHMAN, M. (2007) Influence of fuel ash composition on high temperature aerosol formation in fixed bed combustion of woody biomass pellets. Science Direct, Fuel 86/2007, 181-193
- WILWERDING, A. (2003) Anbau, Bereitstellung und energetische Nutzung holzartiger Biomasse. Berichterstattung der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg, Freiburg i. Br.
- WINZER, F. (2012) Vergleich von Trocknungsverfahren für Holz aus Obst- und Kurzumtriebsplantagen. Bachelorarbeit an der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät, Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
- WISSKIRCHEN, P. (1968) Zur Frage der Mechanisierung des Obstbaumschnittes. Erwerbsobstbau 1, 67-72
- WOLFF, F. (2005) Biomasse in Baden-Württemberg – ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Resource Holz als Energieträger. Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH)
- ZABELTITZ C. (1984) Verbrennung von Obstbaumschnittholz, Erwerbsobstbau 26, 19-20

Online Quellen

- ALT, F. (2012) Die Gier nach Fleisch ist das Problem, nicht Biosprit
<http://www.sonnenseite.com/Erneuerbare+Energien,Die+Gier+nach+Fleisch+ist+das+Problem-+nicht+Biosprit,5,a23079.html>; 17.09.2012
- AHWI (2012)
<http://www.ahwi.com/de/verfahren/mulchen>; 17.07.2012
- BÄRWOLFF UND HERING (2012)
www.bioenergie-portal.info/fileadmin/bioenergie-beratung/thueringen/dateien/Vortraege_Fachgespraeche/02_B%C3%84RWOLFF_Trocknung_verfahren.pdf; 26.02.2012
- CAEB (2011) Produktinformationen zur Quickpower Rundballenpresse für Gehölz- und Baumschnitt, Firma Caeb International, Petosino di Sorisole, Italien
<http://www.caebinternational.it/w/lang3/aufsammeln.html>; 08.11.2011
- ENERGY.EU (2012)
<http://www.energy.eu/#Domestic-Elec>; 03.09.2012
- GYSEL, W. (2012) Agro-Dienstleistungen,
<http://www.farmer.ch/maschinen/>; 17.07.2012
- HELU (2012) Grundformeln Starkstromtechnik. Formelsammlung der Firma Helu Kabel
http://www.helukabel.de/pdf/german/technik/X_105_Grundformeln_Starkstromtechnik.pdf; 15.06.2012
- HÖCKER POLYTECHNIK (2012)
http://www.hoecker-polytechnik.de/images/produkte/produkt_bild_9_3_gr.jpg; 28.06.2012
- KUHN (2012)
[HTTP://WWW.KUHN.DE/IMGCATALOG.NSF/0/EA1E909C9671A0CCC125796B00396925/\\$FILE/TRP-RT-PT.JPG?OpenElement](http://www.kuhn.de/imgcatalog.nsf/0/EA1E909C9671A0CCC125796B00396925/$FILE/TRP-RT-PT.JPG?OpenElement); 14.08.2012
- LWF, (2011) Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft;
<http://www.lwf.bayern.de/waldbewirtschaftung/holz-logistik/energie-aus-holz/scheitholz/index.php>; 07.10.2012
- OBSTWEIN-TECHNIK (2012)
http://www.obstwein-technik.eu/App_Upload/Galleries/reihenputzer.jpg;07.06.2012
- RECHT.NRW (2012) Ministerium für Inneres und Kommunales
https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=7129&bes_id=3620&aufgehoben=N&menu=1&sg=0#det256049; 24.07.2012
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012)
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Land/Forstwirtschaft/Bodennutzung/Tabellen/Baumobstanbauerhebung.html>;
17.07.2012

STÜHMER (2012)

<http://www.stuehmer-gmbh.de/forstfraesen.0.html>; 10.07.2012

TERRA (2012)

http://www.terra.com.gr/images/products/Katastrofeas_Kuhn_TPR145RT.jpg; 26.07.2012

WEISSER (2012)

<http://www.lu-weisser.de/Webseiten/DienstleistungenForstmulchen.htm>;
10.07.2012

Sonstige Quellen

- ANONYMUS (2012) Dem Autor vorliegendes Angebot für die Rodung von Obstplantagen
- AUMÜLLER GRUBER, C. (2012) Zur Verfügung gestelltes Bildmaterial durch Frau C. Aumüller-Gruber von der Firma CEA+ - Bericht, Reportagen, Portraits
- BAUERNBLATT (2011) Wenn der Boden müde wird – Besuch der Ministerin in Ellerhoop. Bauernblatt vom 22. Oktober 2011, Bauernblatt Verlags-GmbH, Hamm
- BERCHTHOLD, W. (2012) Zeichnungen der Baugruppe Rodepflug „RB 60 Klein-Altendorf“ mit dem Programm „computer-aided design“ (CAD), Herr W. Berchthold, Mitarbeiter der wissenschaftlichen Werkstatt, Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- BRÜGGER, E. (2013) Mitarbeiter der Landwirtschaftskammer NRW, Spezialberater Wärme aus Biomasse, mündliche Mitteilung vom 24.01.2013
- DEPV (2010) Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V., Pressemitteilung: Holzbriketts eine beliebte Alternative zum Beifeuern in Holzheizungen, 14.10.2012
- DRÖPPELMANN, T. (2010) Zur Verfügung gestelltes Bildmaterial vom „Rodepflug RB60 Klein-Altendorf“ durch den Geschäftsführer T. Dröppelmann der Firma Agrartechnik Dröppelmann
- EICHING, M. (2012) mündliche Mitteilung vom 21. Juni. 2012; Landwirt der Schnittholzballenpresse der Firma Caeb International zur Nutzung von Rebschnittholz einsetzt
- HEYN, N. (2010) Mitarbeiter des Instituts für Bodenökologie der Universität Kassel, Email vom 04. März 2010
- HÖCKER POLYTECHNIK (2009) Brikettierung C200. Betriebsanleitung der Firma Höcker Polytechnik, Hilter im Teuteburger Wald
- IKA, (2010) C200. Bedienungsanleitung zum Kalorimetersystem C200, IKA, Staufen
- JENZ (2011) BioBaler BW 55. Werbeprospekt von Maschinen und Fahrzeugbau Jenz GmbH
- KUHN (2009) Kuhn TRP 120 RT H. Datenblatt des Herstellers Kuhn
- MARKELI, C. UND SCHRÖDER, M. (2012) Einfluss von Holzeintrag in Boden nach Rekultivierung von Obst- und Kurzumtriebsplantagen auf das Wachstum von Kulturpflanzen. Ausarbeitung des Seminarvortrags im Rahmen des Mastermoduls „Projekt work and seminar renewable resources“ am Forschungsbereich für Nachwachsende Rohstoffe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

- MOLLEKOPF, N. UND BRUMMACK, J. (2011) Apparatefreie Trocknung von Hackgut. Vortrag durch Prof. Dr. Mollekopf und Dr. Brummack im Rahmen einer Studienreise an die Technische Hochschule Dresden, Institut für thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
- MÜTEK (2012) Brikettieranlagen. Informationsprospekt der Firma Mütek Systemtechnik, Filderstadt
- NOGA, G. (2009) Grundlagen im Obstbau. Vorlesungsbegleitende Unterlagen zu Grundlagen im Obstbau OBS 100, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät, Studiengang Agrarwissenschaften
- PENSEL, T. (2012) mündliche Mitteilung vom 11.06.2012; Herrn Pensel Leiter des Umweltamt der Stadt Mainz
- PERFECT (2010) Zur Verfügung gestelltes Bildmaterial, sowie Datenblätter und Bedienungsanleitungen vom Mäh-Ladewagen MLC, Firma Perfect Van Wamel BV, Beneden-Leeuwen, Niederlande
- PETER, C. (2012) Rebholzhäcksler Winnicut mach Rebholz zu Heizgut. Schriftliche Mitteilung der Geschäftsführerin der Firma Stoll Landschaftspflege-Technik, Kirchberg-Gaggstatt
- PRANGENBERG, R. (2011) Dem Autor vorliegendes Angebot der Firma UP International für die Zerkleinerung und Aufbereitung von Obstbäumen, Überreicht durch Herrn R. Prangenberg
- PUDE, R. (2010) mündliche Mitteilungen, sowie zur Verfügung gestelltes Bildmaterial von Prof. Dr. Ralf Pude, Leiter der Lehr- und Forschungsstation AGE Campus Klein-Altendorf der Landwirtschaftlichen Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- RAMPEREZ, M. (2012) mündliche Mitteilung vom 23.05.2012; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Campus Klein-Altendorf der Landwirtschaftlichen Fakultät an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- STOLL (2012) Senken Sie Ihre Heizkosten mit dem Rebholzhäcksler „Winnicut“. Werbeprospekt der Firma Stoll Landschaftspflege-Technik, Kirchberg-Gaggstatt
- VAN WAMEL (2012) Informationsbroschüre zum Mäh-Lade Wagen MLC, Firma Perfect Van Wamel, Niederlande – Beneden-Leeuwen
- WENGHOEFER, W. (2012) mündliche Mitteilung vom 12.09.2012, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Campus Klein-Altendorf der Landwirtschaftlichen Fakultät an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Anhang

Tabelle 8-1: Briketteigenschaften aus dem Vorversuch ohne Abkühlstrecke (1. Serie)(n=10)

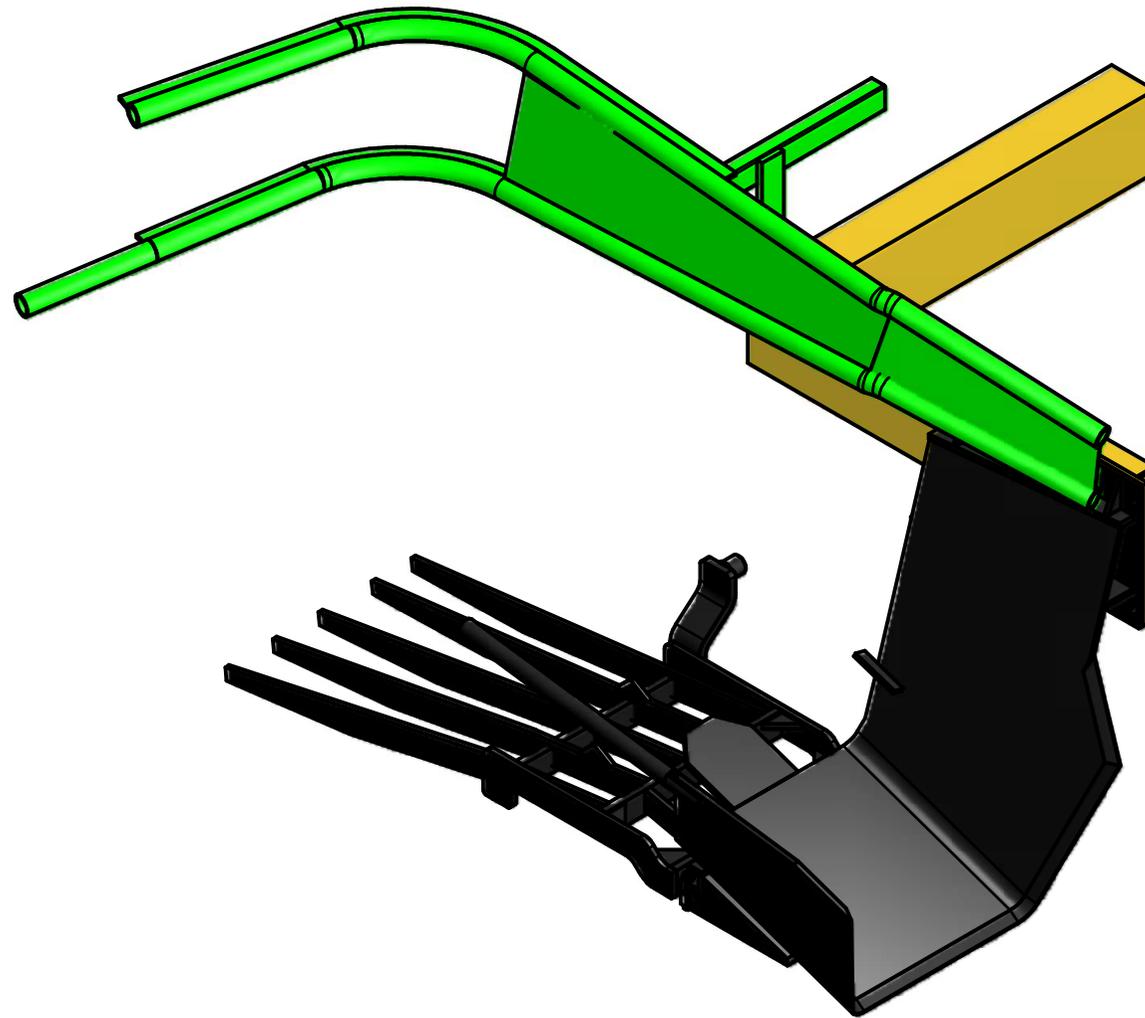
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standard- abweichung	Wertebereich
Länge	[mm]	59,88	8,09	48 - 77
Durchmesser	[mm]	68,48	0,51	68 - 69
Brikettgewicht	[g]	194,56	26,62	156,5 - 263,3
Partikeldichte	[g*cm ⁻³]	0,88	0,03	0,80 - 0,91
Wassergehalt	[%]	12,5	0,26	12,1 - 12,7

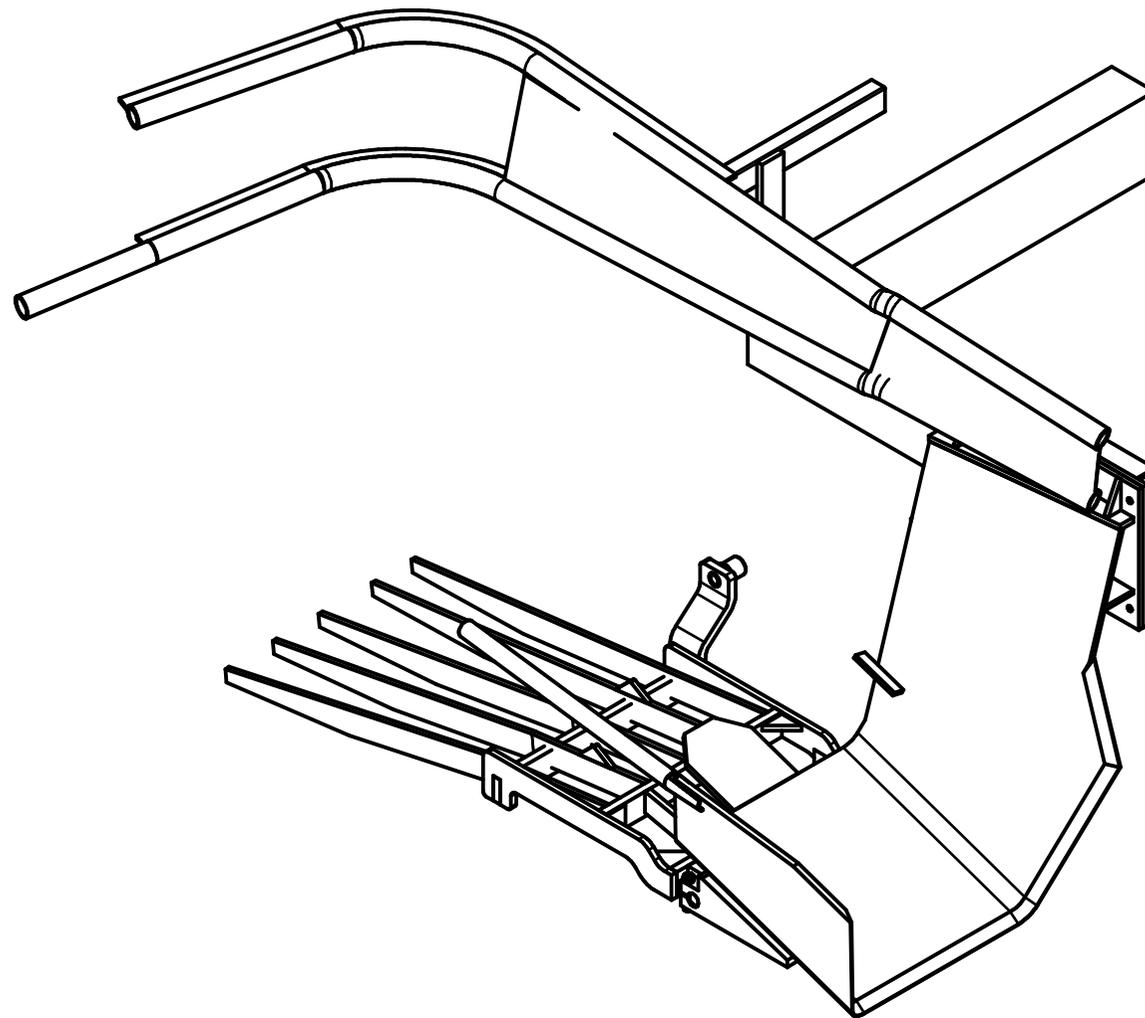
Tabelle 8-2: Briketteigenschaften aus dem Vorversuch mit Abkühlstrecke (2. Serie) (n=10)

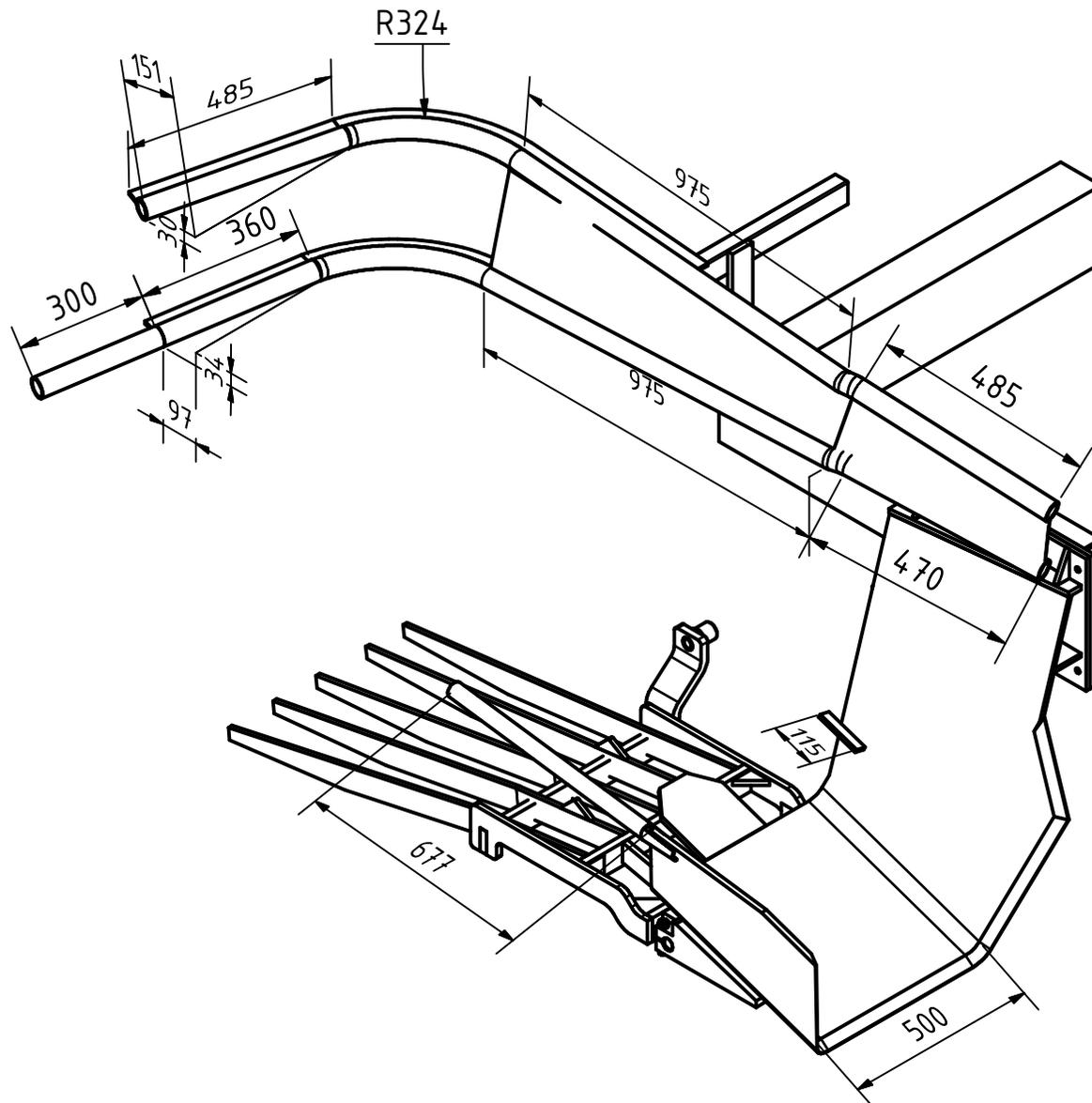
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standard- abweichung	Wertebereich
Länge	[mm]	60,31	7,79	49 - 77
Durchmesser	[mm]	67,21	0,29	67 – 68
Brikettgewicht	[g]	187,12	22,12	125 – 234
Partikeldichte	[g*cm ⁻³]	0,94	0,03	0,90 – 0,98
Wassergehalt	[%]	12,5	0,27	12,2 – 12,7

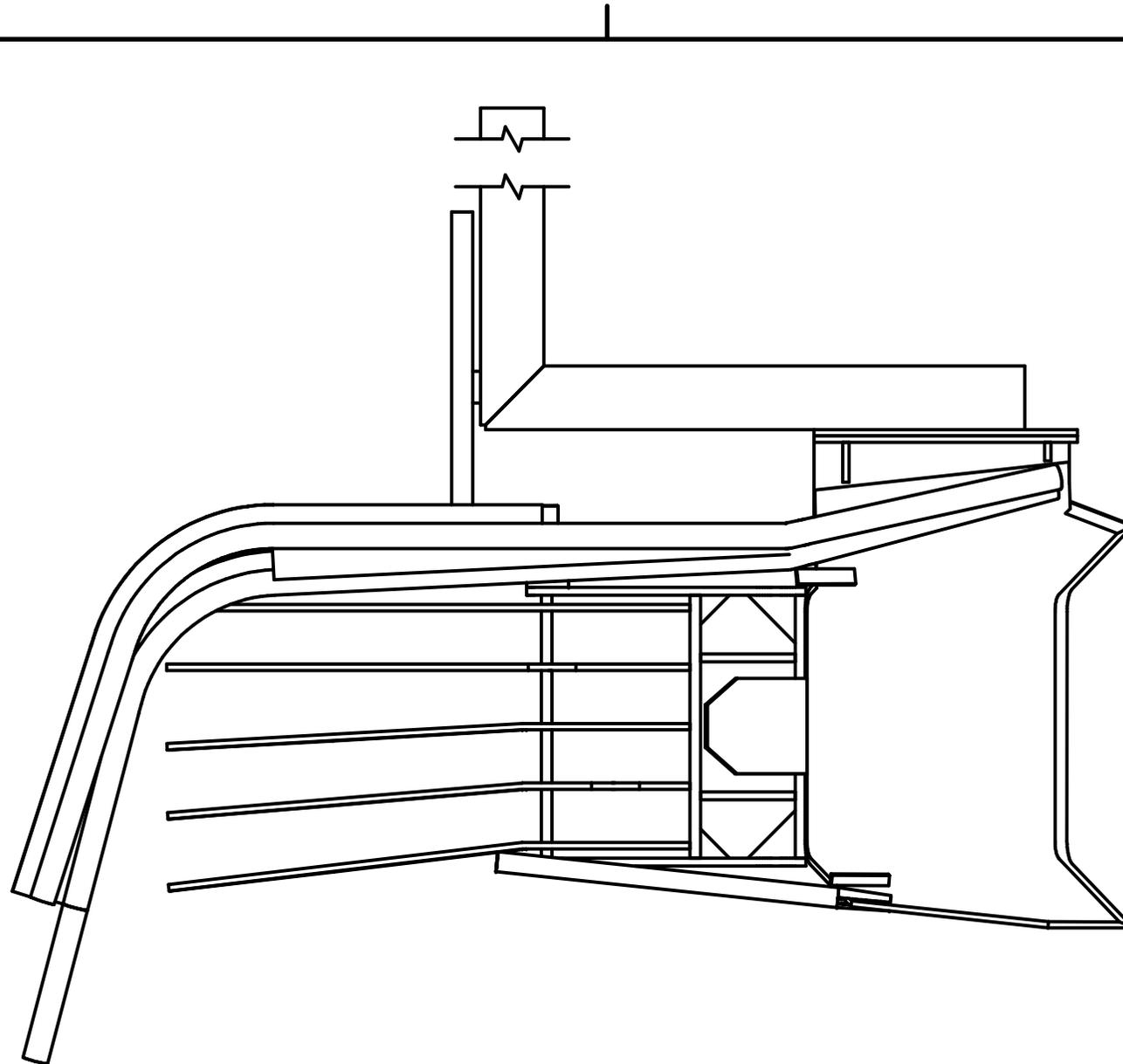
Tabelle 8-3: Briketteigenschaften aus dem Vorversuch mit Abkühlstrecke (3. Serie) (n=10)

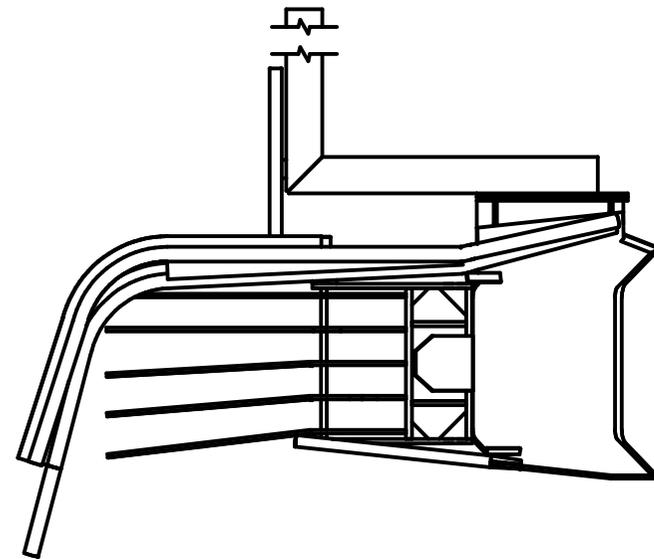
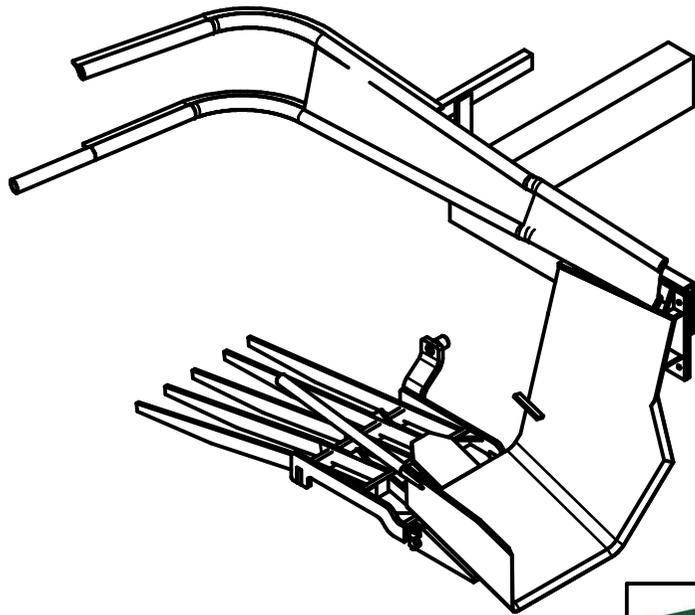
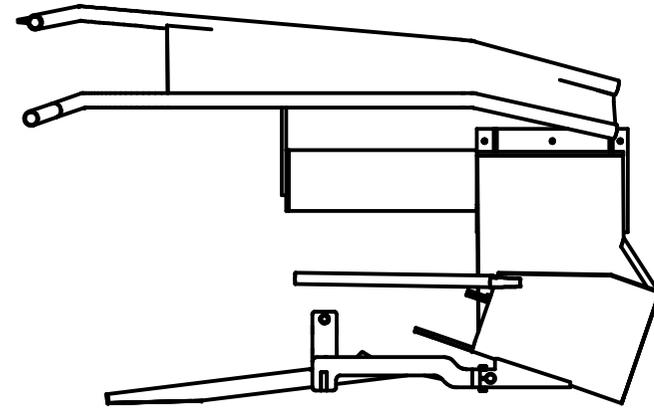
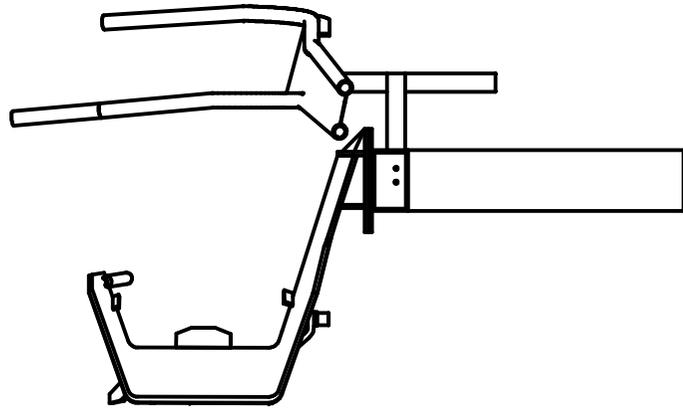
Parameter	Einheit	Mittelwert	Standard- abweichung	Wertebereich
Länge	[mm]	59,48	7,88	48 – 77
Durchmesser	[mm]	67,22	0,28	67 – 68
Brikettgewicht	[g]	195,04	20,25	144,2 – 229,2
Partikeldichte	[g*cm ⁻³]	0,94	0,03	0,90 – 0,98
Wassergehalt	[%]	12,5	0,26	12,2 - 12,6

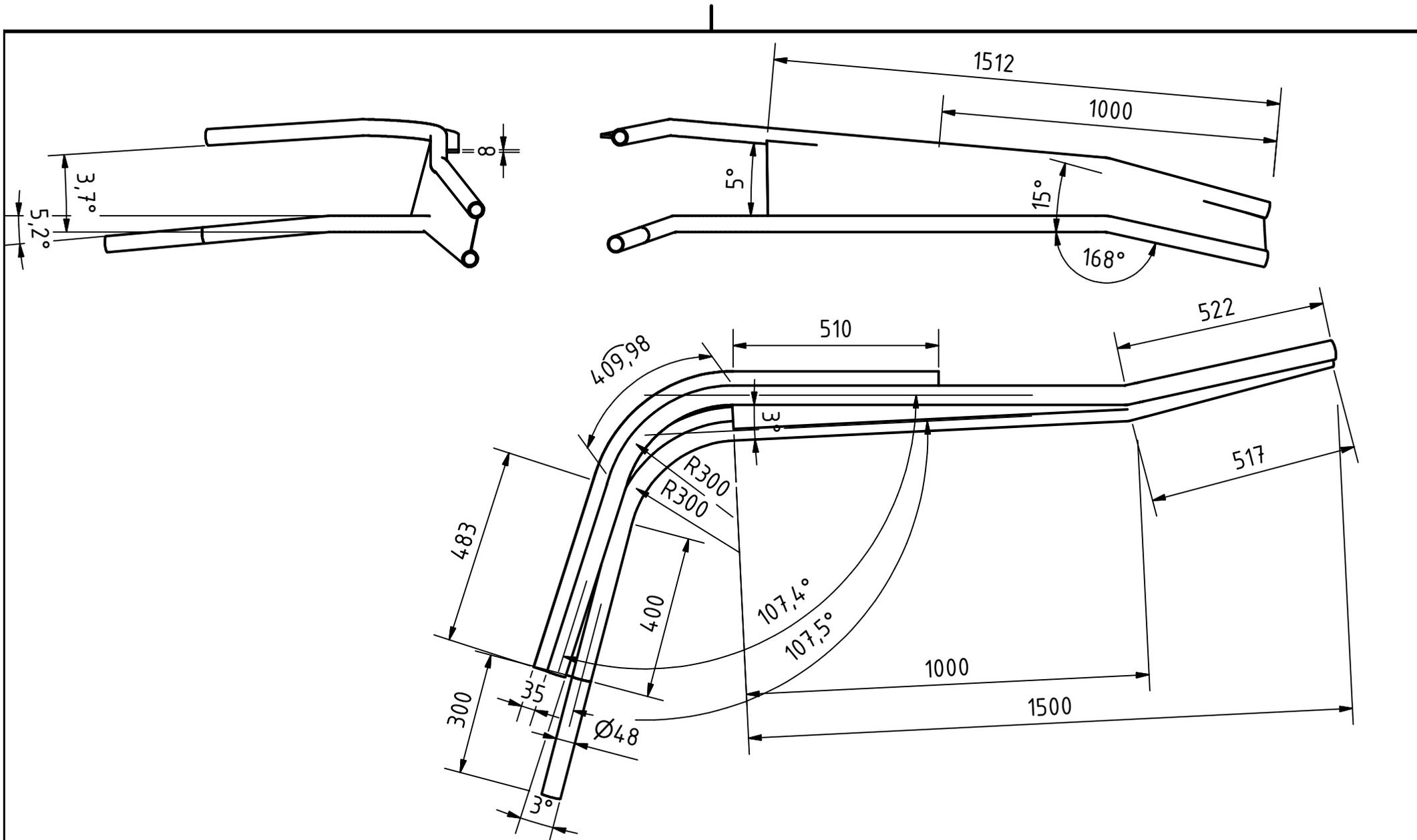


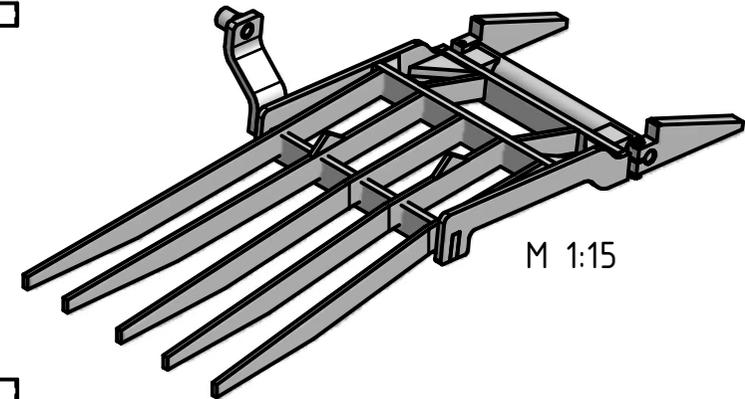
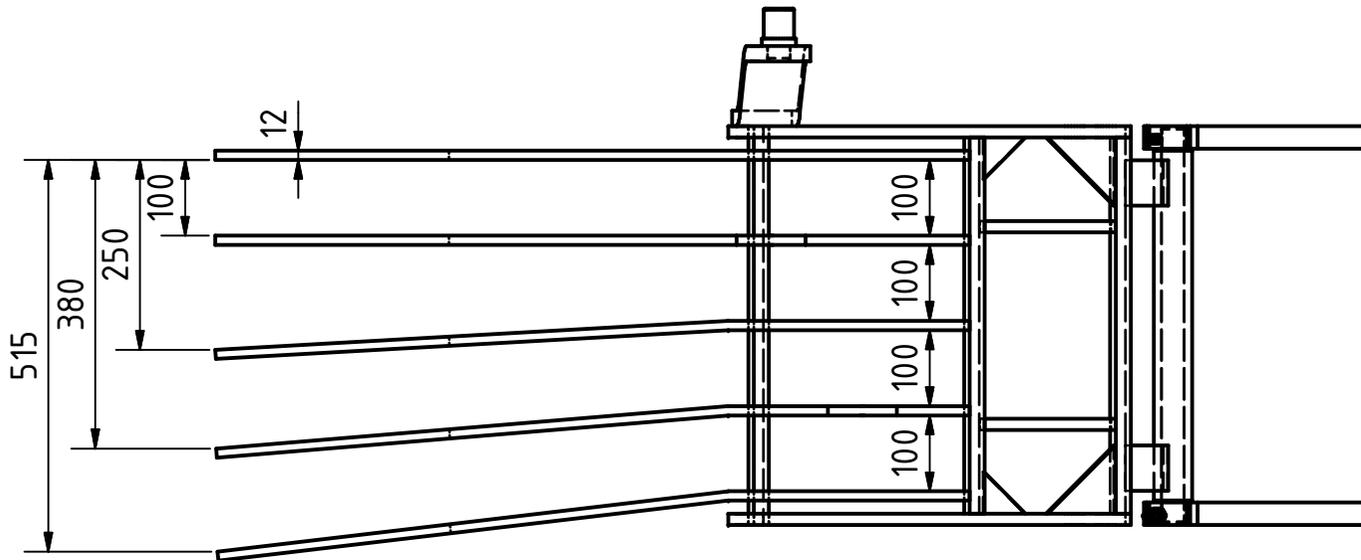
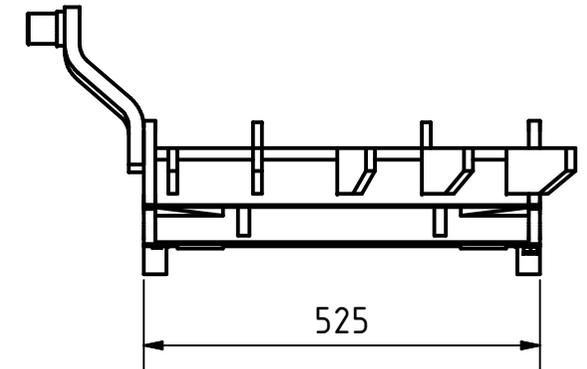
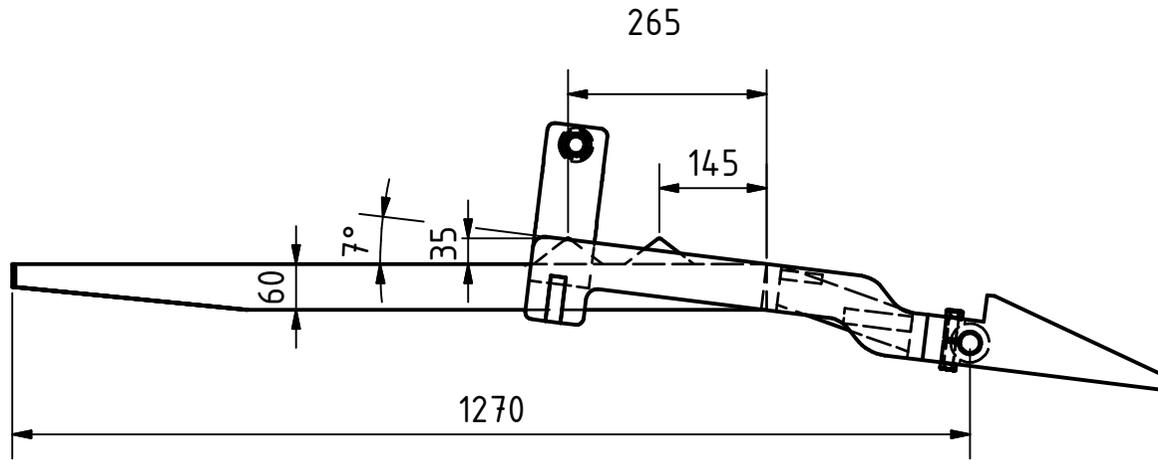




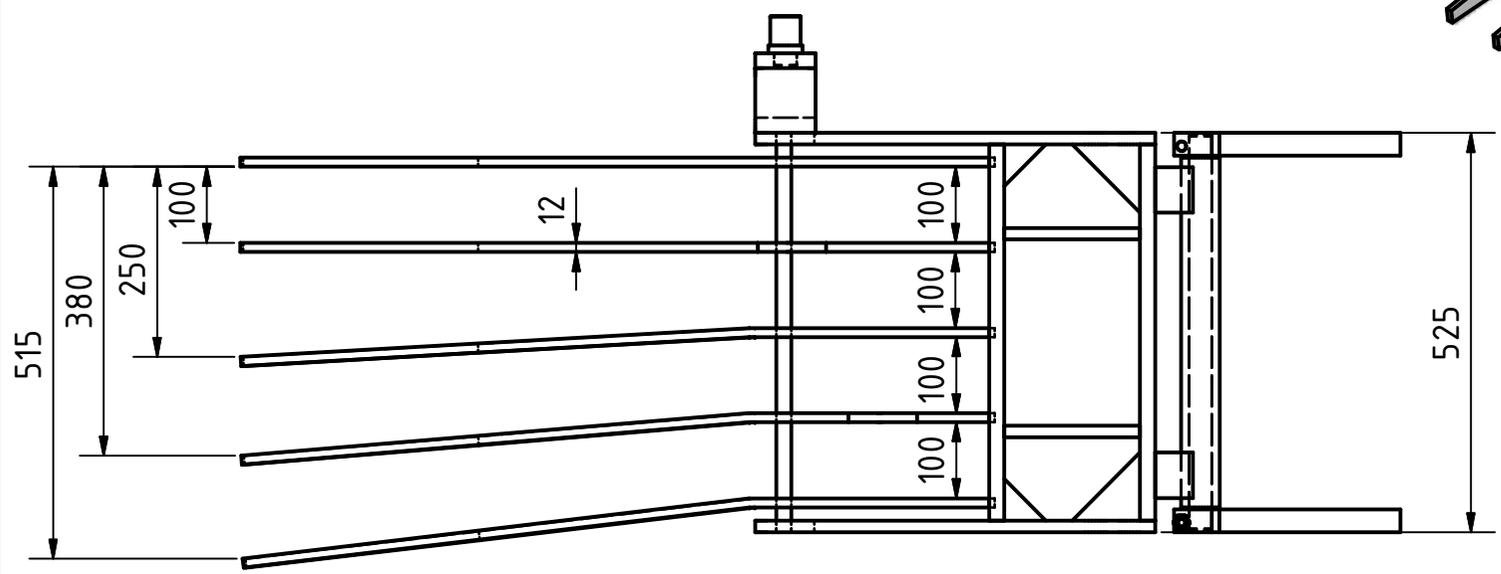
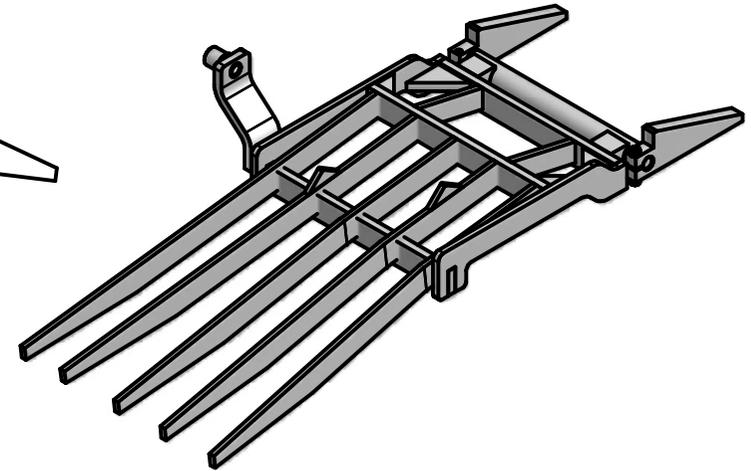
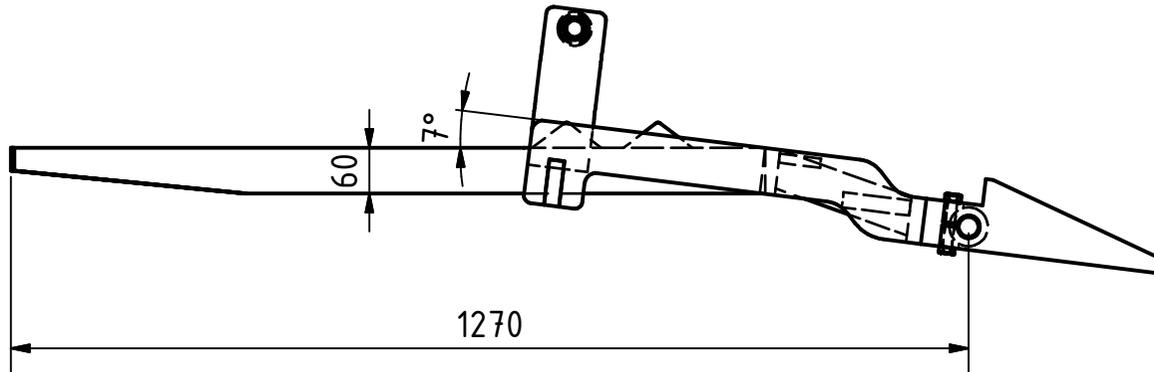








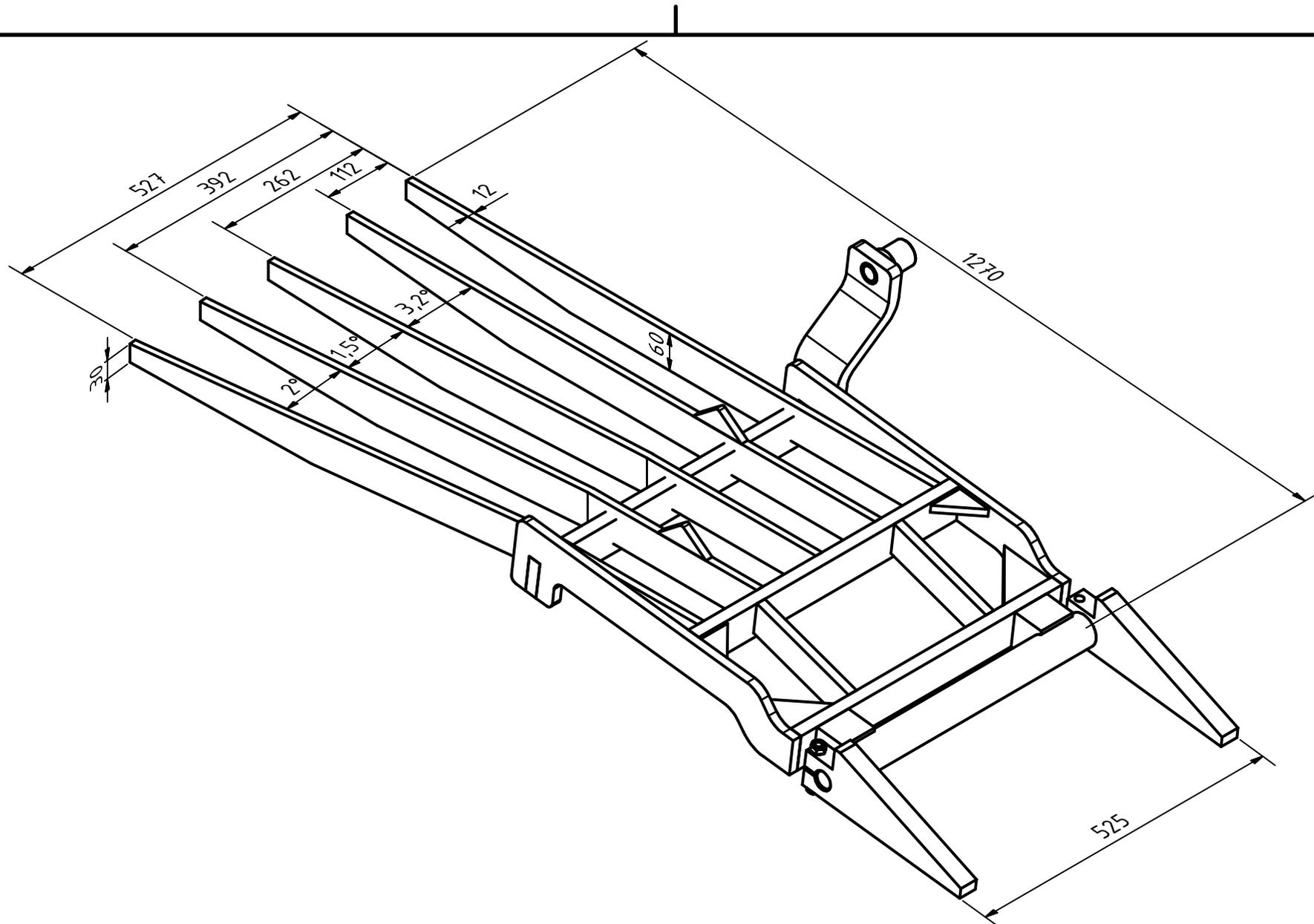
M 1:15



Benennung:
 Siebrost von Rodepflug
 RB60 Klein-Altendorf

Name: W.Berchtold
 Datum: Stand 2012
 Campus Klein-Altendorf
 Martin Schmid

Maß
 stab:



Benennung:
 Siebrost von Rodepflug
 RB60 Klein-Altendorf

Name: W.Berchtold	Maß
Datum: Stand 2012	stab:
Campus Klein-Altendorf Martin Schmid	

