

Campus Klein-Altendorf
Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe

Entwicklung einer optimierten Produktion von Miscanthus-Mischpellets für Kleinfeuerungsanlagen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Grades eines
Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich- Wilhelms- Universität

zu

Bonn

von Dipl.-Ing. agr.

Volker Christian Wenghoefer

Referent: Prof. Dr. agr. Ralf Pude

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2013

Erscheinungsjahr: 2014

Entwicklung einer optimierten Produktion von *Miscanthus*-Mischpellets für Kleinfeuerungsanlagen

Die umweltverträgliche „low-input“-Kultur *Miscanthus x giganteus* ist einer der ertragsstärksten und am vielfältigsten einsetzbaren nachwachsenden Rohstoffe. Ziel der Dissertation war es zu prüfen, welche Faktoren die Brennstoffqualität von *Miscanthus x giganteus* beeinflussen und ob die Baumart *Paulownia tomentosa* eine geeignete Kultur zur Rohstoffherzeugung für die *Miscanthus*-Mischpelletproduktion ist. Weiterhin wurde untersucht, ob der Pelletierungsprozess durch neuartige Zerkleinerungsverfahren für halm- und holzartige Biomassen, optimiert werden kann. Zusammenfassend wurde geprüft, ob die Mischpellets aus technischer und rechtlicher Sicht in Kleinfeuerungsanlagen (KFAs) verbrannt werden dürfen und ob diese ökonomisch rentabel produziert werden können.

Von unterschiedlichen *Miscanthus x giganteus*-Typen wurde der Aschegehalt, als Indikator für verbrennungstechnisch problematische Elemente (N, S und Cl), untersucht. Die Aschegehalte betragen 1,6 bis 3,3 M.-% und werden durch die Faktoren Bestandesalter, Genotyp, Standort und Jahreswitterung beeinflusst. Um eine möglichst gute Brennstoffqualität zu garantieren sollte *Miscanthus* erst Ende März / Anfang April geerntet werden. Zusätzlich gilt für die Mischpelletproduktion zu beachten, dass der *Miscanthus*-Anteil an die jährlich wechselnde Brennstoffqualität des Ernteguts angepasst werden sollte. Weiterführend wurden die Pelletierungseigenschaften von *Miscanthus* in Mischpelletform mit holzartiger Biomasse geprüft. Die Mischpellets hielten die Norm-Grenzwerte der DIN_EN 14961-2(A2) ein.

Die Brennstoff- und Pelletierungseigenschaften der neuen ertragsstarken KUP-Kultur *Paulownia tomentosa* (bis zu 13 t ha⁻¹ a⁻¹) wurde als potentieller Mischungspartner für die Pelletproduktion untersucht. Aufgrund der geringen Asche- (0,8 M.-%), N-, S-, Cl-Gehalte und der guten Pelletierbarkeit ist *Paulownia*-Biomasse als Rohstoff für die Mischpelletproduktion zu empfehlen.

Zur Optimierung des Pelletierungsprozesses wurden alternative Zerkleinerungsverfahren geprüft und bewertet. Aufgrund des niedrigeren Energiebedarfes und der guten physikalischen Pelletqualität (Schüttdichte > 600 kg m⁻³ und Abriebfestigkeit > 97,5 M.-%) verbessert die Kollermühle den Pelletierungsprozess gegenüber der meist gebrauchten Hammermühle. Weiterführende Arbeiten müssen das Optimierungspotential an großtechnischen Anlagen noch quantifizieren.

Zusammenfassend wurde die brennstofftechnische und physikalische Qualität der *Miscanthus*-*Paulownia*-Mischpellets geprüft und die Wirtschaftlichkeit der Produktion in einem Planszenario analysiert. Mit Ausnahme des Cl- und S-Gehaltes erfüllten die Mischpellets die Anforderungen der DIN_EN 14961-2 (A2). Die Beimischung von 0,3 M.-% Kaolin zu *Miscanthus* und *Paulownia* erhöhte dabei die Ascheerweichungstemperatur um 200°C auf über 1.100°C. Der Presshilfsstoff Traubentrester konnte als Substitut für Stärke identifiziert werden. Zukünftig könnten *Miscanthus*-Mischpellets eine kostengünstige Alternative zu Holzpellets werden.

Die Produktion von *Miscanthus*-Mischpellets bietet eine Möglichkeit, um die Produktpalette für den nachhaltig und umweltverträglich erzeugten Rohstoff *Miscanthus* zu erweitern. Neben positiven Aspekten für die Umwelt und die Landwirtschaft bietet die Produktion von *Miscanthus*-*Paulownia*-Mischpellets eine Möglichkeit Haushalte dezentral mit Energie zu versorgen und somit einen Teil zur Energiewende auf regionaler Ebene beizutragen.

Development of an optimized production of miscanthus mixed pellets for small combustion plants

The environmental compatible low input culture *Miscanthus x giganteus* is one of the most productive renewable biomasses. One objective of this dissertation was to determine the factors, which define the fuel quality of *Miscanthus x giganteus*. Furthermore the suitability of *Paulownia tomentosa* as a feedstock for the miscanthus mixed pellet production was examined. In addition new biomass size reduction technologies were tested for their potential to optimize the pellet production process. The conclusive aim of this study was to prove, that miscanthus mixed pellets fulfilled the technical and regulatory requirements of small combustion plants and that their production is economically reasonable.

The ash content of different *Miscanthus x giganteus* types, as an indicator for the amount of combustion interfering elements (N, S, Cl), was analysed. The ash contents varied between 1.6 and 3.3 M.-% depending on stand age, genotype, location of growth and annual weather conditions. To guarantee a high fuel quality for the mixed pellet production the miscanthus should be harvested at the end of march / beginning of april. In addition to that recommendation, should the miscanthus portion of the mixed pellets be adjusted according to the fuel quality of the harvested biomass. Furthermore the pelletizing test with mixtures of miscanthus and different kinds of wood showed that miscanthus mixed pellets correspond to the physical standards of the DIN EN 14961-2(A2).

The fuel and pelletizing properties of the novel high yield ($13 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) short rotation coppice species *Paulownia tomentosa* were analyzed to assess its quality, as a biomass component for the mixed pellets. Due to the low ash- (0.8 M.-%), N-, S-, Cl-content and the good pelletizing properties Paulownia is an appropriate biomass for the miscanthus mixed pellet production.

To optimize the pellet production process, new biomass size reduction systems were evaluated. Due to the lowest energy consumption and the good physical pellet quality (bulk density $> 600 \text{ kg m}^{-3}$ and abrasion resistance $> 97.5\%$) the "Kollermühle" is the most appropriate substitute for the widely used hammer mill to optimize the pellet production process.

Conclusively the fuel and physical quality of the miscanthus paulownia pellets were tested and the economic success of the pellet production was evaluated. With the exception of the Cl- and S content the pellets met all standards of the DIN_EN 14961-2(A2). In particular the addition of 0.3 M.-% kaolin raised the ash deformation temperature from 915°C up to over $1,100^\circ\text{C}$. Furthermore pomace of grapes, as a pressing aid, was identified to be an adequate substitute for starch. In the future miscanthus mixed pellets could become a profitable alternative to wood pellets

The miscanthus mixed pellet production is an opportunity to extend the product range of miscanthus, which can be produced sustainable and in an environmentally sound manner. Apart from those positive aspects for the agricultural environment and the environment in general the miscanthus mixed pellets can help to supply household decentralized with heat. Therefore those pellets may become part of an opportunity for the turnaround in energy policy on a regional level.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	6
2.1 Anforderungen an Qualitätspellets für Kleinf Feuerungsanlagen	6
2.1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	6
2.1.2 Technische Anforderungen.....	7
2.2 Grundlagen der Pelletproduktion.....	8
2.2.1 Grundlagen der Rohstoffwahl	10
2.2.1.1 Klassische Rohstoffe.....	10
2.2.1.2 Alternative Rohstoffquellen	11
2.2.2 Technische Grundlagen des Prozessschrittes der Pelletierung	16
2.2.2.1 Aufbau und maschinenbautechnische Unterschiede von Pelletpressen	17
2.2.2.2 Wirkungsweise und physikalische Grundprinzipien	18
2.2.2.3 Einfluss der Matrizengeometrie	19
2.2.2.4 Einfluss des Materials	21
2.2.3 Grundlagen und Vergleich der Zerkleinerungstechnik	23
2.2.4 Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion	28
2.3 Greening.....	29
3. Material und Methoden.....	31
3.1 Versuche zur Eignung von <i>Miscanthus x giganteus</i> als Pelletrohstoff	32
3.1.1 Brennstoffeigenschaften	32
3.1.2 Tastversuche zur Pelletierung von Miscanthus-Mischpellets	33
3.1.2.1 Leistungsbedarf und spezifischer Energiebedarf	34
3.1.2.2 Physikalische Pelletqualität	34
3.1.2.3 Wassergehalt.....	36
3.1.2.4 Presskanallänge	37
3.1.2.5 Durchsatzmasse	37
3.2 Eignung von <i>Paulownia tomentosa</i> als KUP-Kultur	38
3.2.1 Vergleichende Ertragserfassung.....	38
3.2.2 Brennstoffeigenschaften	40
3.2.3 Pelletierbarkeit.....	40
3.3 Zerkleinerungsversuche.....	42

3.3.1 Energiebedarf	43
3.3.2 Pelletierungseigenschaften von <i>Miscanthus</i> in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens	47
3.3.2.1 Korngrößenverteilung	47
3.3.2.2 Energiebedarf	48
3.4 Qualität und Produktion der <i>Miscanthus</i> - <i>Paulownia</i> -Mischpellets	49
3.4.1 Brennstoffeigenschaften	49
3.4.2 Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur durch Kaolin	49
3.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe	49
3.4.4 Pelletierungsversuch unter Praxisbedingungen	50
3.4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse eines <i>Miscanthus</i> - <i>Paulownia</i> -Mischpelletproduktions- Modelles	52
3.4.5.1 Gewinn und interne Rendite der <i>Miscanthus</i> - <i>Paulownia</i> Mischpelletproduktion	52
3.4.5.2 Kostenposten der Produktion	53
3.4.5.3 Gewinn und interne Rendite	56
3.4.5.4 Sensitivitäts-Analyse der <i>Miscanthus</i> -Mischpelletproduktion	57
3.5 Statistische Auswertung	57
4. Ergebnisse	58
4.1 Eignung von <i>Miscanthus x giganteus</i> für die Mischpelletproduktion	58
4.1.1 Einfluss ausgewählter kulturtechnischer Faktoren auf die Brennstoffqualität	58
4.1.1.1 Aschegehalte	58
4.1.1.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften von <i>Miscanthus x giganteus</i>	61
4.1.2 Einfluss ausgewählter Faktoren auf den Prozessschritt der Pelletierung	63
4.1.2.1 Wassergehalt	63
4.1.2.2 Presskanallänge der Matrize	65
4.1.2.3 Durchsatz	67
4.2 Eignung von <i>Paulownia tomentosa</i> für die Mischpelletproduktion	70
4.2.1 Biomasseertrag	70
4.2.2 Brennstoffeigenschaften	72
4.2.2.1 Aschegehalt	72
4.2.2.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften	72
4.2.3 Pelletierungseigenschaften	73
4.3 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren	75
4.3.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von <i>Miscanthus</i>	75
4.3.1.1 Hammermühle und Zerfaserung	75
4.3.1.2 Kollermühle	76
4.3.1.3 Prallreaktor	80

4.3.1.4 Vergleich des spezifischen Energiebedarfs der Zerkleinerung von <i>Miscanthus</i>	80
4.3.2 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Pelletierungsprozess	81
4.3.2.1 Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung	82
4.3.2.2 Physikalischen Eigenschaften der Mischpellets	82
4.3.2.3 Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte	83
4.3.2.4 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die physikalische Pelletqualität	84
4.3.3 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse	85
4.3.3.1 Hammermühle	85
4.3.3.2 Kollermühle	86
4.4 Eigenschaften der Mischpellets und deren Produktion	89
4.4.1 Brennstoffeigenschaften der Mischpellets	89
4.4.2 Einfluss von Kaolinzugaben auf die DT der Mischpellets	90
4.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe	91
4.4.4 Pelletierungspraxisversuch	92
4.4.4.1 Tastversuch	93
4.4.4.2 Hauptversuch	95
4.4.5 Wirtschaftlichkeit der <i>Miscanthus</i> - <i>Paulownia</i> -Mischpelletproduktion	97
4.4.5.1 Gewinn und interne Rendite	97
4.4.5.2 Sensitivitätsanalyse	99
5. Diskussion	103
5.1 Eignung von <i>Miscanthus x giganteus</i> für die Mischpelletproduktion	103
5.1.1 Einfluss ausgewählter kulturtechnischer Faktoren auf die Brennstoffqualität	103
5.1.1.1 Aschegehalt	103
5.1.1.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften	108
5.1.2 Pelletierungseigenschaften	111
5.1.2.1 Wassergehalt	112
5.1.2.2 Presskanallänge	113
5.1.2.3 Durchsatzmasse	114
5.1.2.4 Zwischenfazit	115
5.1.3 Fazit	115
5.2 Eignung von <i>Paulownia tomentosa</i> für die Mischpelletproduktion	116
5.2.1 Biomasseertrag	116
5.2.2 Brennstoffeigenschaften	118
5.2.2.1 Aschegehalt	118
5.2.2.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften	120
5.2.3 Pelletierungseigenschaften	122

5.2.4 Fazit	123
5.3 Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens für die Mischpelletproduktion.....	124
5.3.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus.....	124
5.3.1.1 Hammermühle und Zerfaserung.....	124
5.3.1.2 Kollermühle.....	126
5.3.1.3 Prallreaktor	129
5.3.1.4 Zwischenfazit	130
5.3.2 Pelletierbarkeit der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens.....	132
5.3.2.1 Energiebedarf der Pelletierung.....	132
5.3.2.2 Physikalische Eigenschaften.....	134
5.3.2.3 Zwischenfazit	135
5.3.3 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse.....	136
5.3.3.1 Hammermühle	136
5.3.3.2 Kollermühle.....	137
5.3.3.3 Zerfaserung	138
5.3.3.4 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren.....	138
5.3.4 Fazit	139
5.4 Gesamtbeurteilung der Miscanthus-Paulownia-Mischpellets.....	141
5.4.1 Brennstofftechnische Eignung für den Einsatz in KFAs	141
5.4.1.1 Brennwert, Asche-, N-, S- und Cl- Gehalt.....	141
5.4.1.2 Ascheschmelzverhalten	142
5.4.1.3 Zwischenfazit	143
5.4.2 Einfluss von Kaolinzugaben auf die DT	144
5.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe.....	146
5.4.4 Pelletierungspraxisversuch.....	147
5.4.4.1 Tastversuch	148
5.4.4.2 Hauptversuch.....	149
5.4.5 Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion.....	153
5.4.5.1 Gewinn und interne Rendite.....	153
5.4.5.2 Kosten als Schlüsselfaktoren	154
5.4.5.3 Erlös als Schlüsselfaktor	157
5.4.5.4 Zwischenfazit	159
5.4.6 Perspektiven der optimierten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion.....	160
6 Zusammenfassung.....	162
LITERATURVERZEICHNIS.....	XV
Literatur, Veröffentlichungen und Vorträge.....	XV

sonstige Quellen	XXIX
unveröffentlichte Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten	XXXIII
Normen und Richtlinien.....	XXXIV
ANHANG.....	XXXV

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
AfA	Absetzung für Abnutzung
BDI	Bundesverband Deutscher Industrie
BHD	Brusthöhendurchmesser
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
CH ₃ -Gruppe	Methoxyl- Gruppe
CKA	Campus Klein-Altendorf
dGZ_a	durchschnittlicher jährlicher Gesamtzuwachs
D_{Loch}	Lochdurchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKH	Dikopshof
DT	Ascheerweichungstemperatur
EN	Europäische Norm
E_m	Energiebedarf pro Versuchsmasse
$E_{spez.}$	Spezifischer Energiebedarf
EU	Europäische Union
Fi	Fichte
FM	Frischmasse
(g)	Aggregatzustand gasförmig
G	Gewinn
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
Ho	Brennwert
H ₂ O	Wasser
Hu	Heizwert
HV	Viekers Härte
i	Zinssatz
i*	interne Rendite
IBM	Biomasse des Individuums
K	Gesamtkosten
K_{Bau}	Kosten für Gebäudebau
$K_{Betrieb}$	betriebsgebundene Kosten
$K_{Kap.}$	kapitalgebundene Kosten

$K_{\text{sonst.}}$	sonstige Kosten
$K_{\text{Tech.}}$	Kosten für gesamte Anlagentechnik
K_{Vorrat}	Kosten für Pelletsvorratshaltung
Ka	Kaolin
KFA	Kleinfeuerungsanlage
KUP	Kurzumtriebsplantage
LEM	Leitzsches Erhitzungsmikroskop
$L_{\text{Presskanal}}$	Presskanallänge
L_{Kante}	durchschnittliche geometrische Kantenlänge
M	Masse
m	Versuchsmasse
m_E	Erntemasse
m:	Massedurchsatz
<i>M. x g.</i>	<i>Miscanthus x giganteus</i>
n	Anzahl
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
n.s.	nicht signifikant
OH-Gruppe	Hydroxyl- Gruppe
ÖNORM	Norm vom Austrian Standards Institute
opt.	optisch bestimmt
ÖVF	ökologische Vorrangflächen
p	Signifikanzniveau
P_{Koller}	Kollerdruck
PP	Pflanzplatz
<i>P. t.</i>	<i>Paulownia tomentosa</i>
(s)	Aggregatzustand fest
t	Zeit
T_g	Ligninerweichungstemperatur
T_p	Pellettemperatur
TBM	Triebbiomasse
TM	Trockenmasse
TZ	durchschnittliche Anzahl der Triebe
U	Umdrehungen
ÜR	Überlebensrate
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Nr.	Seite
1: Schaubild des Pelletierungsprozesses von Holz nach ANONYMUS 1 (2011)	-9-
2: Anteile der verschiedenen Kostenarten der Pelletsproduktion in industriellen Pelletwerken (in %) und Energieverbrauch pro produzierter t Pellets nach Angaben von THEK und OBERNBERGER (2001); DI GIACOMO und TAGLIERI (2009); PIRRAGLIA, (2009)	-9-
3: Skizze von Matrizenpressen, links: Ringmatrize und rechts: Flachmatrize (nach THEK und OBERNBERGER, 2009)	-17-
4: Aufbau und Wirkungsweise einer Pelletpresse mit Flachmatrize (STERNOWSKY, 2007)	-17-
5: Skizze des Presskanals einer Lochmatrize und deren geometrischer Größe	-20-
6: Skizze von Presskanälen mit unterschiedlichen Presskanallängen, Lochdurchmesser, Schluck und Teilung	-20-
7: Schematischer Aufbau einer Hammermühle (ANONYMUS 2, 2011)	-24-
8: Trockenzerfaserung 22/600 der FH Köln, links: Außenansicht und rechts: Innenansicht	-25-
9: Skizze der Geometrie von einem Presskanal einer Matrize für die Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts)	-26-
10: Prototyp eines Prallreaktors im Technikum der Firma Schäfer (SCHÄFER, 2011)	-27-
11: Beispielpellets für die unterschiedlichen Noten der visuelle Pelletqualität	-35-
12: Prüfgerät für Pelletabrieb (nach DIN_EN_ 15210-1)	-36-
13: Prozessschritte der geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion	-53-
14: Aschegehalte von 3, 4 und 5- jährigen <i>Miscanthus x giganteus</i> -Typen am Standort CKA (bezogen auf TM) in Abhängigkeit vom Erntejahr in Relation zum Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)	-59-
15: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener <i>Miscanthus x giganteus</i> -Typen aus dreijährigen Beständen, die im April 2011 geerntet wurden in Abhängigkeit von Genotyp und Standort (CKA/Kenn) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)	-60-
16: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener <i>Miscanthus x giganteus</i> -Typen des gleichen Genotyps in Abhängigkeit von Bestandsalter, Erntejahr und Standort (CKA, Kenn und DKH) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)	-60-
17: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener <i>Miscanthus x giganteus</i> - Typen in Abhängigkeit von Standort, Bestandsalter, Genotyp und Erntejahr in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) ($n=6$)	-61-

Nr.	Seite
18: Vergleich der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte von <i>Miscanthus x giganteus</i> in Abhängigkeit von Standort, Genotyp und Erntejahr in Relation zur Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (n=2)	-62-
19: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrizze und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges eines Biomassegemisches aus <i>M. x g.</i> (34 Kenn 8. J.) und <i>Paulownia</i> mit Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-63-
20: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der <i>Miscanthus-Paulownia</i> -Pellets mit einem Wassergehalt von 12, 13, 14, 15 und 16 M.-%, in Relation zu dem Norm-Grenzwert (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-64-
21: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrizze und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus <i>M. x g.</i> (34 Kenn 8. J.) und <i>Paulownia</i> bzw. <i>M. x g.</i> und Fichte, mit Wassergehalten von 14 und 15 M.-% (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-65-
22: Einfluss der Presskanallänge mit 6 mm Lochmatrizen auf die Durchsatzmasse und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Gemisches aus <i>M. x g.</i> (34 Kenn 8. J.) und Fichte mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei gleichbleibendem Leistungsbedarf (n=2)	-66-
23: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung eines <i>Miscanthus-Fichten</i> -Gemisches, das mit zwei 6 mm Lochmatrizen unterschiedlicher Presskanallängen pelletiert wurde (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-66-
24: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der <i>Miscanthus-Fichten</i> -Pellets, die mit zwei 6 mm Lochmatrizen unterschiedlicher Presskanallängen pelletiert wurde, in Relation zum Norm-Grenzwert (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-67-
25: Spezifischer Energiebedarf, Leistungsbedarf und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines <i>Miscanthus-Paulownia</i> -Gemisches und einem Tresterzuschlag von 1% mit 14% Wassergehalt in Abhängigkeit des Durchsatzes (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-68-
26: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der <i>Miscanthus-Paulownia</i> -Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Norm-Grenzwert (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-69-
27: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtwuchs von <i>Paulownia tomentosa</i> (5.000 Pflanzen ha ⁻¹) im Vergleich zu der Pappelsorte "Max 1" und Weidensorte "Inger" (11.111 Pflanzen ha ⁻¹), die nach drei Jahren auf dem Standort Klein-Altendorf geerntet wurden (Signifikanz: ANOVA, Scheffe-Test, ($p \leq 0,05$), n \geq 48)	-70-
28: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtwuchs von <i>Paulownia tomentosa</i> (10.000 Pflanzen ha ⁻¹) der ersten fünf Bestands-/Vegetationsjahre auf der Zusatzparzelle des Standortes Klein-Altendorf (n = 40)	-71-
29: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtwuchs von <i>Paulownia tomentosa</i> nach den ersten 4 Bestandsjahren auf dem Standort Tornow in Abhängigkeit der Pflanzdichte (n \geq 100)	-71-
30: Aschegehalte (bezogen auf TM) ausgewählter Biomassearten in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=6)	-72-

Nr.	Seite
31: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung von Miscanthus mit einem Wassergehalt von 9,6 M.-% in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Versuchsjahr 2011) (n=1)	-75-
32: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens und des Wassergehaltes zu den Versuchsreihen 2011/2012 (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), ns = nicht signifikant, n=1 für 2011, n=4 für 2012)	-76-
33: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) von Miscanthus-Fichten- Mischpellets, deren Miscanthusanteil mit verschiedenen Lochmatrizendurchmessern in der Kollermühle zerkleinert wurde, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-78-
34: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (Versuchsjahr 2012) (n=1)	-79-
35: Vergleich des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Versuchsjahre 2011 und 2012). (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=1 für 2011, n=4 für 2012)	-81-
36: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung von Miscanthus- Fichten- Gemischen in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-82-
37: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der Miscanthus-Fichten-Pellets in Abhängigkeit vom Zerkleinerungsverfahren für Miscanthus, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm DIN_EN 14961-2 (A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-83-
38: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der Miscanthus-Fichten-Pellets, deren Miscanthus- Partikelgröße einheitlich eingestellt wurde, in Abhängigkeit zum Zerkleinerungs-verfahren für den Miscanthusanteil (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-85-
39: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Hammermühle in Abhängigkeit der Biomasseart und L_{Kante} (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-86-
40: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (n=1)	-87-
41: Spezifischer Energie- bzw. Leistungsbedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes der Zerkleinerung von Paulownia und Miscanthus mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuchsjahr 2012) (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-88-
42: Ascheerweichungstemperaturen (bestimmt nach Formfaktor- und optischer Methode) von <i>Paulownia tomentosa</i> , <i>Miscanthus x giganteus</i> (34 Kenn 8. J.) und Mischpellets aus den beiden Biomassen (n=2)	-90-

Nr.	Seite
43: Ascheerweichungstemperaturen (bestimmt nach optischer Methode) von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN _{plusA2} Pellets (n=2)	-91-
44: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus <i>M. x g.</i> und Paulownia mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei Zugabe von 0 M.-% und 1 M.-% Traubentrester (Signifikanz: t-Test, (p≤0,05), n=4)	-92-
45: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der Miscanthus-Paulownia- Pellets ohne und mit 1 M.-% Traubentrester (Signifikanz: t-Test, (p≤0,05), n=4)	-92-
46: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung des Gemisches <i>M. x g.</i> (34 Kenn 8. J.) und <i>P. tomentosa</i> mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin bei verschiedenen Durchsätzen (n=1)	-94-
47: Optimierte Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die unter den in Tabelle 11 (Versuchsnummer 4) dargestellten Bedingungen, während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden	-94-
48: Miscanthus-Fichten-Mischpellets, die unter den in Tabelle 11 (Versuchsnummer 9) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden	-95-
49: Spezifischer Energiebedarf der Pelletierung und Pellettemperatur der in Tabelle 23 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl (n=1)	-96-
50: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m ⁻³) der in Tabelle 23 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl in Relation zu dem Norm-Grenzwert. (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, (p≤0,05), n=4)	-97-
51: Gewinn der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von konstanten Gesamtkosten und variierendem Erlös in Relation zu dem Planszenario	-98-
52: Interne Rendite der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit des jährlichen Gewinnes	-98-
53: Anteil der verschiedenen Kostenpositionen an den Gesamtkosten der geplanten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion	-99-
54: Ermittlung des kritischen Wertes (Gewinnschwelle) des Planszenarios der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von variierenden Rohstoffkosten und einem konstanten Erlös	-100-
55: Gesamtkosten der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit der elektrischen Energiekosten bei konstantem Erlös	-100-
56: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Preisverhältnisses Mischpellets / EN _{plusA1} -Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion	-101-
57: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN _{plusA1} -Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion	-102-
58: Korrelation zwischen Aschegehalt und Summe der Gehalte von Schwefel, Stickstoff und Chlor von verschiedenen <i>Miscanthus x giganteus</i> Typen	-109-

Nr.	Seite
59: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN _{plusA1} -Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion bei unterschiedlichen Kostenszenarien	-159-
A1: Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus. Links: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 590 kg h ⁻¹ , Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts: Geringfügig anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 625 kg h ⁻¹ , Wasserzugabe: 0 M.-%)	-XXXV-
A2: Vergleich der Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus, der Versuchsjahre 2011 und 2012. links oben: aus 2011 (Ausgangsfeuchte: 9,6 M.-%), rechts unten: aus 2012 (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%)	-XXXV-
A3: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Oben: Hammermühle, unten links: Zerfaserung und unten rechts: Kollermühle)	-XXXVI-
A4: Skizze einer Matrize mit Angabe der Orientierung der Partikel (nach HOLM et al. 2006)	-XXXVI-
A5: Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Paulownia. Oben: Sehr stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 510 kg h ⁻¹ , Wasserzugabe: 0 M.-%) Links unten: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 550 kg h ⁻¹ , Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts unten: Anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 600 kg h ⁻¹ , Wasserzugabe: 3 M.-%)	-XXXVII-
A6: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Paulownia, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Links: Hammermühle und rechts: Kollermühle	-XXXVII-
A7: Verschlackung der Asche während eines ersten Verbrennungsversuches von Miscanthus-Mischpellets (50 M.-% Miscanthus / 50 M.-% Paulownia) durch die FH Köln (Bild: Steinbüchel, 2011)	-XXXVIII-
A8: Miscanthus-Ernteverfahren „Luxemburger Modell“ (Quelle: ANKEN et al. 2012)	-XXXVIII-

TABELLENVERZEICHNIS

Nr.	Seite
1: Stickstoff-, Schwefel-, Chlor- und Aschegehalte von Sägespäne ohne Rinde, Fichten- und Buchenholz und Rinde von Nadelhölzern verglichen mit den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2 A1 und A2	-11-
2: Schüttdichten verschiedener Holzhackschnitzel, Miscanthus-Häcksel und Norm-Pellets	-16-
3: Physikalische Größen und deren Einflussfaktoren, welche die Qualität der Pelletierung bestimmen (abgeändert nach STERNOWSKY, 2007)	-19-
4: Versuchsabfolge und Zuordnung der Untersuchungsparameter zu den einzelnen Versuchen	-31-
5: Herkunft, Standort, Pflanzjahr und Erntejahre der untersuchten <i>Miscanthus x giganteus</i> -Typen	-33-
6: Mischungsverhältnis und Matrizentemperatur der Versuchsvarianten zur Bestimmung der Pelletierbarkeit von Paulownia	-41-
7: Auswahl der Rohstoffe und Zerkleinerungsverfahren für die Erfassung des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung	-43-
8: Auswahl der Lochmatrizen, die während der ersten Versuchsreihe mit der Kollermühle (Typ 33/390) genutzt wurden	-45-
9: Versuchsparameter und Maschineneinstellungen des Versuchs zur Energiebedarfs-ermittlung des Prallreaktors	-47-
10: Zusammensetzung und Feuchtegehalt der Biomassegemische (Varianten), die im Praxisversuch pelletiert wurden	-50-
11: Darstellung der Varianten des Vorversuches, die im Rahmen des Pelletierungs-Praxisversuches bei der Firma Amandus Kahl durchgeführt wurden	-51-
12: Jährliche Gesamtkosten einer Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion (10.000 t a ⁻¹) unterteilt in kapitalgebundene, verbrauchsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten in Anlehnung an THEK und OBERNBERGER (2004)	-54-
13: Aschegehalt und Brennwert von <i>Miscanthus x giganteus</i> in Abhängigkeit von Erntejahr, Genotyp und Standort (n=6 für Aschegehalt, n=2 für Brennwert)	-62-
14: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT (bestimmt nach optischer Methode) von <i>Paulownia tomentosa</i> in Abhängigkeit des Untersuchungslabors im Vergleich zu <i>Miscanthus x giganteus</i> (34 Kenn 8. J.) (n=2)	-73-
15: Visuelle und physikalische Pelletqualität verschiedener Biomassen in Rein- und Mischform in Relation zu den Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) (n=4)	-74-
16: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Kollermühle in Abhängigkeit des Lochdurchmessers und des Presskanalverhältnisses der eingesetzten Matrize (Versuchsjahr 2011) (n=1)	-77-

Nr.	Seite
17: Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von <i>Miscanthus</i> mittels Prallreaktor in Abhängigkeit der Maschineneinstellungen (n=1)	-80-
18: Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte von <i>Miscanthus</i> (34 Kenn 8. J.) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)	-84-
19: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT von Mischpellets mit einem <i>Miscanthus</i> - und <i>Paulownia</i> - Gehalt von jeweils 50 M.-% und einem Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester im Vergleich zu der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2), *Umrechnung Heizwert (Hu) zu Brennwert nach KALTSCHMITT et al. (2009) (n≤4)	-89-
20: Aschegehalte der Additive Melasse, Traubentrester und Stärke (n=6)	-91-
21: Visuelle Qualität und Temperatur der Pellets (T_p) aus den beiden Gemischen von <i>M. x g.</i> und <i>Paulownia</i> bzw. <i>Miscanthus</i> (34 Kenn 8. J.) und Fichte mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin, die während des Vorversuches produziert wurden, in Abhängigkeit von Durchsatz bzw. Presskanalverhältnis bei einem d_{Loch} von 6 mm (n=1)	-93-
22: Vergleich der Einflussfaktoren, auf den Aschegehalt von <i>Miscanthus x giganteus</i> der eigenen Untersuchungen mit Literaturwerten	-107-
23: Vergleich der Literaturwerte für den Aschegehalt von <i>Paulownia tomentosa</i> mit dem eigenen Analysewert	-119-
24: Vergleich der ermittelten N-, S- und Cl-Gehalt von <i>Paulownia</i> mit Literaturangaben, in Relation zu den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2(A2)	-121-
25: Elastizitätsmodule verschiedener Biomassearten unterschiedlicher Literaturangaben	-122-
A1: Ergebnis der Befragung zur Marktsituation von <i>Miscanthus</i> (n = 6)	-XXXIX-
A2: Anforderungen an EN _{plus} -Pellets nach EN _{plus} -Zertifizierung (Quelle: ANONYMUS 1, 2013)	-XXXIX-
A3: wichtigste Anforderungen an Pellets nach DIN_EN 14961-6	-XL-
A4: Benotungsskala der visuellen Qualität von Pellets	-XL-
A5: Detaillierte Maschineneinstellungen während der ersten Zerkleinerungsversuchsreihe mit der Kollermühle, vorgenommen durch die Firma Amandus Kahl	-XLI-
A6: Versuchsvarianten der Teilversuche des zweiten Zerkleinerungsversuches mittels Kollermühle aus dem Jahr 2012	-XLI-
A 7: Einstellungen der Pelletpresse unter welchen die Pellets während des Praxisversuches bei Amandus Kahl pelletiert wurden	-XLII-
A8: Druck- und Biegefestigkeit von <i>Paulownia</i> -, Fichten- und Pappelholz nach diversen Literaturangaben	-XLII-
A9: Si-, K- und Ca- Gehalte [M.-% (TM)] von <i>Miscanthus x giganteus</i> (Typ 34 Kenn 8. J.) (1), <i>Paulownia tomentosa</i> (2) und Mischpellets aus (1) und (2) (nach RÖHRIG, 2012)	-XLII-

1 Einleitung

Mitte der 1990er Jahre wurde damit begonnen in größerem Maß Abfälle der Sägeindustrie zu Holzpellets zu veredeln. Von 2000 bis 2012 ist der Bestand an Pelletheizungen in Deutschland von 3.000 auf 280.000 gestiegen (ANONYMUS 1, 2013). Somit gelang es innerhalb von 12 Jahren aus einem Abfallprodukt einen hochwertigen handelsfähigen Brennstoff zu erzeugen, der auf dem Brennstoffmarkt fest etabliert werden konnte. 97% dieser Pelletheizungen haben eine Nennwärmeleistung von unter 50 kW und sind somit als Kleinfeuerungsanlagen (KFA) einzustufen.

In den letzten Jahren ist die Kompaktierung von alternativen Biomassen - als Substitute für Holzpellets - für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen zu einem bedeutenden Schwerpunkt der Biomasseforschung geworden. So wurde zum Beispiel das Europäische Projekt Mixbiopellets, welches in Deutschland durch das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) in Leipzig bearbeitet wird, ins Leben gerufen (ANONYMUS 2, 2013). Des Weiteren förderte die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) bis Anfang 2013 das Projekt C₄-Kompakt, welches die Entwicklung von Miscanthus-Mischpellets für KFAs < 50 kW zum Ziel hatte (WENGHOEFER et al., 2012). Beide Projekte beschreiben Miscanthus aufgrund der hohen Biomasseproduktionsleistung als einen geeigneten Rohstoff für die Produktion von Pellets für Kleinfeuerungsanlagen.

Im Jahr 2012 wurden in Deutschland neben 4.500 ha Kurzumtriebsplantagen (KUP) (ANONYMUS 3, 2013) 3.500 ha Miscanthus (PUDE, 2012) angepflanzt. Ebenso wie Pappeln und Weiden, die in KUPs angebaut werden, ist Miscanthus eine Low-input Kultur, die nur ein geringes Maß an Kulturmaßnahmen (Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz und Düngung) erfordert (LEWANDOWSKI et al., 2000; LEWANDOWSKI und SCHMIDT, 2006; DONNELLY et al., 2011). Im Gegensatz zu KUPs, die durchschnittlich einen Biomasseertrag von 8 - 15 t (TM) ha⁻¹ aufweisen, produzieren Miscanthusbestände (*Miscanthus x giganteus*) zwischen 10 und 20 t (TM) ha⁻¹ (siehe Befragung Tabelle A1). Aus dieser Befragung unter Miscanthusanbauern ging hervor, dass lediglich 50% des Miscanthus einer thermischen Verwendung zugeführt werden, wobei die anderen 50% stofflich genutzt werden (z. B. Pferdeeinstreu oder Verbundwerkstoffe). Obwohl 2012 der Marktpreis (ab Hof) von Miscanthus bei 100 bis 120 € t⁻¹ (15 M.-% H₂O) lag, und Miscanthus einen Deckungsbeitrag von 600 bis 800 € ha⁻¹ erzielt (SIEVERDINGBECK et al., 2010), gaben viele Miscanthus-Produzenten an, dass sie die Produktion von Miscanthus aufgrund von zu hohen Pachtpreisen und mangelnden Distributionskanälen nicht weiter ausbauen können.

Dabei ist der entscheidende Faktor für den Mangel an Distributionskanälen meist die zu lange Wegstrecke vom Landwirt zum Endkunden, der die Kosten für den Transport des meist losen Schüttgutes Miscanthus bestimmt.

Trotz dieser Hemmnisse gelingt es den Landwirten derzeit dennoch den produzierten Miscanthus zu vermarkten.

Aufgrund des hohen Marktpreises erscheint es unter Berücksichtigung des aktuellen Marktpreises für Industrieholz (90 € t⁻¹) (ANONYMUS 4, 2013), welches bereits als Rohstoff in der Pelletproduktion eingesetzt wird, als nicht sinnvoll Miscanthus-Pellets zu produzieren. Der relativ hohe Marktpreis von Miscanthus ist auf die im Vergleich zum Angebot, welches durch die limitierte Anbaufläche begrenzt ist, zu hohe Nachfrage zurückzuführen. Damit eine Miscanthus-Mischpelletproduktion sinnvoll würde, müsste das Angebot an Miscanthus deutlich erhöht werden.

Im März 2013 beschloss die Europäische Union (EU), dass ab 2015 30% der Direktzahlungen für Landwirte an „Greening“- Maßnahmen gekoppelt werden sollen (ANONYMUS 5, 2013). Laut ANONYMUS 6 (2013) sollen im Rahmen dieses „Greenings“ bis zu 7% der Betriebsfläche als ökologische Ausgleichsflächen genutzt werden. Derzeit wurden jedoch noch keine konkreten Maßnahmen benannt, wie diese Ausgleichsflächen bewirtschaftet werden sollen. Nach ANONYMUS 7(2013) sind in der EU Agrarumweltmaßnahmen solche, welche den Klima-, Boden- und Gewässerschutz verbessern, die biologische Vielfalt erhalten oder verbessern und den Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln verringern. Dazu beschreiben LIEBHARD (2010) und STOLZENBURG (2010), dass Miscanthus C im Boden akkumuliert, die Bodenstruktur verbessert und den Austrag von Nitrat in das Grundwasser reduziert. Des Weiteren konnten JØRGENSEN (2006), LEWANDOWSKI und SCHMIDT (2006) und DONNELLY et al. (2011) aufzeigen, dass der Anbau von Miscanthus allein in der Etablierungsphase ein geringes Maß an Pflanzenschutzmaßnahmen erfordert und in der Ertragsphase einen reduzierten Düngebedarf aufweist.

Im Rahmen der kommenden EU Agrarreform, bei der auch „Greening“-Maßnahmen eingeführt werden, wäre der Anbau von *Miscanthus x giganteus* möglicherweise eine geeignete Maßnahme, welche die Anforderungen der derzeitigen EU Agrarumweltmaßnahmen erfüllt (HORIX, 2013) und zusätzlich aufgrund des hohen Deckungsbeitrages wirtschaftlich rentabel ist. Falls dieses Szenario eintreten würde, könnte die Anbaufläche von Miscanthus und anderen schnell wachsenden „low-input“-Kulturen innerhalb weniger Jahre wachsen. Durch diesen Flächenzuwachs würde auch das Angebot an Miscanthus ansteigen, sodass es vermutlich zu einer Senkung des Marktpreises kommen würde.

Zusätzlich zu dem möglicherweise geringeren Marktpreis könnten unzulänglichen Distributionskanäle zu einem Problem des ausgeweiteten Miscanthusanbaus werden. Eine Möglichkeit um die Vermarktung von größeren Miscanthus-Mengen zu gewährleisten, könnte die Produktion von transportwürdigen Miscanthus-Pellets für den regionalen Markt sein.

In Bezug auf den regionalen Pelletmarkt sind in besonderem Maß Kleinfeuerungsanlagen < 50 kW von Interesse, da 97% der installierten Pelletheizungen in Deutschland eine Nenn-

wärmeleistung von unter 50 kW haben (ANONYMUS 1, 2013). Diese KFAs stellen sowohl aus emissionsrechtlicher als auch aus verbrennungstechnischer Sicht hohe Ansprüche an die zu verbrennenden Pellets (WITT und LENZ, 2007).

In der DIN 51731 werden die stofftechnologischen Eigenschaften definiert, damit Holzpellets in dem Geltungsbereich der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) in KFAs verbrannt werden dürfen. Im Jahr 2011 wurde die DIN 51731 durch die DIN_EN 14961-2 ersetzt, wobei diese neue europäische Norm im Vergleich zu der alten deutschen Norm verschärfte Anforderungen an Pellets stellt. Anhand dieser neuen EN-Norm orientiert sich das europäische Pelletzertifizierungssystem EN_{plus} (siehe Anhang, Tabelle A2), nach dessen Vorgaben 2012 bereits 2,2 Mio. t Pellets für KFAs produziert wurden (ANONYMUS 1, 2013). Dabei ist diese Norm in drei Gruppen gegliedert (A1, A2 und B), wobei lediglich Holzpellets aus der Gruppe A1 und A2 in KFAs verbrannt werden dürfen. Eine der bedeutendsten Anforderungen der A2-Pellets, welche eine etwas niedrigere Qualität aufweisen als die A1-Pellets, ist, dass der Aschegehalt 1,5 M.-% nicht überschreiten darf.

Neben Holzpellets dürfen nach Absatz 8, §3 (Brennstoffe) der 1. BImSchV auch reine Miscanthuspellets in KFAs verbrannt werden. Da aber nach KALTSCHMITT et al. (2009) bei der Verbrennung in Pelletöfen Brennraumtemperaturen von 800 bis 1.300°C vorherrschen, ist Miscanthus jedoch aufgrund der niedrigen Ascheerweichungstemperatur (DT) von unter 1.100°C (KALTSCHMITT et al., 2009; BAXTER et al., 2012; KARAMPINIS et al., 2012) für die Verbrennung in Pellet- KFAs ungeeignet.

Damit Miscanthus in Pelletform in KFAs verbrannt werden kann, sollte zum einen eine, auf die verbrennungstechnischen Stoffeigenschaften ausgerichtete optimierte Bestandsführung erfolgen (RAMPEREZ-CARRASCO et al., 2010). Zum anderen könnte Miscanthus weiteren Biomassen mit hochwertigeren Brennstoffeigenschaften beigemischt werden, um die schlechteren Eigenschaften von Miscanthus ausgleichen zu können.

Obwohl 2012 die DIN_EN 14961-6 (siehe Tabelle A3, Anhang) für Mischpellets eingeführt wurde, ist diese Norm noch nicht in der 1. BImSchV verankert, sodass Mischpellets, welche dieser Norm entsprechen, noch nicht in KFAs verbrannt werden dürfen, da diese Norm keine Rechtsgrundlage ist. Damit sollten Miscanthus-Mischpellets mindestens die DIN_EN 14961-2(A2) erfüllen, da die DIN_EN 14961-6 noch nicht in der 1. BImSchV verankert ist.

Nach SCHWARZ et al. (1994) CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002), und MCKENDRY (2002) hat *Miscanthus x giganteus* in der Regel einen Aschegehalt von 2 bis 3 M.-%. Um mindestens DIN_EN 14961-2(A2) konforme Mischpellets produzieren zu können, die einen Miscanthus-Anteil von minimal 50 M.-% aufweisen, müssten somit die Mischungspartner einen Aschegehalt von unter 1 M.-% aufweisen. Dieser Aschegehalt, der ein Indikator für weitere verbrennungsproblematische Elemente (N, S und Cl) ist (FRITZ und FORMOWITZ, 2009), wird unter anderem durch die Faktoren Erntezeitpunkt, Standort, Bestandsalter und

Genotyp beeinflusst (CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI, 2000; LEWANDOWSKI und HEINZ, 2003; BAKKER und ELBERSON, 2005). Als geeigneter Mischungspartner, der die negativen Stoffeigenschaften von *Miscanthus* ausgleichen kann, kommt nur holzartige Biomasse in Frage mit Aschegehalten unter 1 M.-%. Gegenüber holzartiger Biomasse haben halmgutartige Biomassen wie Stroh, Switchgrass oder Riesenknöterich (*Reynoutria bohemica*) deutlich höhere Aschegehalte als 1 M.-% aufzuweisen (LEMUS et al., 2002; MCKENDRY, 2002; STRAŠIL und KÁRA, 2010).

In Bezug auf die *Miscanthus*-Mischpelletproduktion, die für den regionalen Markt ausgelegt sein soll, ist es von besonderem Interesse die Wertschöpfungskette auf landwirtschaftlicher Ebene zu belassen. Daher bietet es sich an Holz von KUPs, die auf landwirtschaftlichen Flächen angelegt wurden, zu nutzen.

MEIER und VETTER (2004), GARCIA et al. (2011), VILLANUEVA et al. (2011) und KARAMPINIS et al. (2012) stellen heraus, dass das Holz der schnellwachsenden Baumart *Paulownia tomentosa* mit < 1 M.-% Aschegehalt deutlich bessere Stoffeigenschaften hat als Pappel- und Weidenholz (Aschegehalt > 2 M.-%), welches klassischerweise auf KUPs angebaut wird. Damit erfüllt *Paulownia* im Gegensatz zu Pappeln und Weiden die Anforderungen an den Aschegehalt.

Außer den verbrennungsrelevanten Stoffeigenschaften wurde bisher die Eignung von *Paulownia* für die Pelletproduktion noch nicht untersucht. Dennoch stellten diese Autoren fest, dass *Paulownia* ein enormes ertrags- und verbrennungstechnisches Potential aufweist. Ein weiterer Aspekt, der den Erhalt der Wertschöpfungskette der *Miscanthus*-Mischpelletproduktion auf landwirtschaftlicher Ebene garantiert, ist die eigenständige Mischpelletproduktion durch Landwirte. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses dar. Dabei unterliegen in besonderem Maß Kleinproduzenten von Pellets (Produktionsmenge < 10.000 t a⁻¹) einem starken Kostendruck (MANI et al., 2006a).

Neben der Rohstoffauswahl und der Konditionierung liegen derzeit in Bezug auf die Optimierung der Pelletproduktion besondere Schwerpunkte auf der Zerkleinerungstechnik (ESTEBAN und CARRASCO, 2006; BITRA et al., 2009; SITZMANN und BUSCHHART, 2009) und der Additivwahl (Presshilfsstoffe) (PICHLER und GOLSER, 2009). Das in der Pelletproduktion gängige Zerkleinerungsverfahren mit der Hammermühle ist ein sehr energieaufwändiges Verfahren, dessen Substitution durch andere Verfahren bis zu 10% der gesamten elektrischen Energiekosten des Pelletierungsprozesses einsparen kann (BITRA et al., 2009). Eine Weiterentwicklung der Zerkleinerungstechnik könnte somit einen Beitrag zur Optimierung des gesamten Prozesses der *Miscanthus*-Mischpelletproduktion darstellen.

Zielsetzung

Aus den vorher beschriebenen Grundbedingungen und der daraus resultierenden Problemstellung ergibt sich für die vorliegende Arbeit folgende Zielsetzung:

- Ein Ziel dieser Arbeit ist es zu prüfen, welche Einflussfaktoren die Brennstoffqualität von *Miscanthus x giganteus* beeinflussen, um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Rohstoffqualität für die Mischpelletproduktion empfehlen zu können.
- Des Weiteren soll untersucht werden, ob die Kultur *Paulownia tomentosa* aus KUPs zur Erzeugung eines stofftechnologisch hochwertigen Mischungspartners für die Miscanthus-Mischpelletproduktion geeignet ist.
- Zusätzlich werden neuartige Zerkleinerungsverfahren in Hinblick auf deren ökonomisches Optimierungspotential für die Pelletproduktion aus halm- und holzgutartigen Biomassen analysiert.
- Zusammenfassend soll die vorliegende Arbeit aufzeigen, ob Miscanthus-Mischpellets aus technischer und rechtlicher Sicht für die Verbrennung in KFAs geeignet sind und ob deren Herstellung nach wirtschaftlichen Aspekten rentabel ist.

Arbeitshypothesen

Anhand der Zielsetzung werden für die Untersuchungen folgende Arbeitshypothesen aufgestellt:

1. Die „low input“- Kultur *Miscanthus x giganteus* ist aufgrund des hohen Biomassepotentials für die Produktion von Mischpellets, die in KFAs verbrannt werden sollen, geeignet.
2. Das Holz der Kurzumtriebsbaumart *Paulownia tomentosa* ist eine optimale Komponente für Qualitätsmischpellets.
3. Die für den Pelletierungsprozess bisher praxisübliche energieintensive Aufbereitung von halm- und holzgutartigen Biomassen per Hammermühle kann mittels neuartiger Zerkleinerungssysteme optimiert werden.
4. Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia sind für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen geeignet und können ein ökonomisch konkurrenzfähiges Produkt zu Holzpellets darstellen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In dem Kapitel wird dargestellt, welche Anforderungen Qualitätspellets erfüllen sollten, damit diese in KFAs verbrannt werden können. Weiterhin wird der Ablauf der Pelletproduktion erläutert. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Rohstoffauswahl und der Zerkleinerungstechnik. Des Weiteren wird in Bezug auf den Prozessschritt der Pelletierung erläutert, welche Faktoren die prozesstechnologische Qualität beeinflussen. In dem dritten Abschnitt werden die Grundlagen der Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion aufgezeigt und deren Berechnungsgrundlage vorgestellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels behandelt die „Greening“-Maßnahmen, welche die EU vorsieht, um eine umweltverträglichere Landwirtschaft in Europa zu fördern. Diese Erkenntnisse sind für die Diskussion der Produktion und Verwendung von Miscanthus-Mischpellets notwendig.

2.1 Anforderungen an Qualitätspellets für Kleinf Feuerungsanlagen

Damit in Deutschland Pellets in KFAs verbrannt werden dürfen, müssen diese sowohl rechtliche als auch technische Anforderungen erfüllen. Nachfolgend wird dargestellt, welche rechtlichen Rahmenbedingungen zu beachten sind und welche technischen Anforderungen die Pellets erfüllen müssen, damit diese in KFAs eingesetzt werden können.

2.1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

In Deutschland regelt das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) das Immissionsschutzrecht. Dabei unterteilt das BImSchG Feuerungsanlagen in genehmigungspflichtige und genehmigungsfreie.

Auf rechtlicher Grundlage des BImSchG (§ 22-25) regelt die 1. BImSchV nähergehend den Betrieb von genehmigungsfreien Anlagen (Kleinf Feuerungsanlage). Laut BEHNKE (2011) sind genehmigungsfreie- bzw. Kleinf Feuerungsanlagen solche, die für die Verbrennung von Holz unter einer Nennwärmeleistung von 1 MW bzw. Stroh oder andere ähnliche landwirtschaftliche Rohstoffe mit einer Nennwärmeleistung von 100 kW ausgelegt sind.

Der § 3 der 1. BImSchV definiert dazu, welche Brennstoffe (Regelbrennstoffe) für den Einsatz in KFAs zugelassen sind. Nach § 3 Absatz 5a sind Pellets als Regelbrennstoff einzuordnen, wenn diese aus naturbelassenem Holz sind und der DIN 51731 entsprechen. Zusätzlich zu Holzpellets dürfen nach § 3 Absatz 8 auch Stroh und andere ähnliche Stoffe in Pelletform verbrannt werden.

In Bezug auf die Zulassung als Regelbrennstoffe können Mischpellets nicht eindeutig in die Brennstoffarten nach § 3 eingeteilt werden, da es sich weder um Holz noch um die in Absatz 8 aufgeführten Brennstoffe handelt. Dennoch wurde 2012 die DIN_EN 14961-6 für Mischbrennstoffe verabschiedet.

Allerdings wurden diese Mischbrennstoffe – zu denen auch Miscanthus-Mischpellets zählen – noch nicht als Regelbrennstoffe in der 1. BImSchV aufgenommen. Somit existiert derzeit ein rechtlicher Handlungsbedarf zur genaueren Einordnung von Mischbrennstoffen. Neben dieser rechtlichen Fragestellung führte die Einführung der neuen europäischen Pelletnorm DIN_EN 14961-2, welche seit 2012 die DIN 51731 ersetzt, zu weiteren rechtlichen Unklarheiten. Obwohl mit dieser neuen Norm verschiedenste Änderungen bezüglich der Anforderungen an Pellets für KFAs einhergehen, wurde diese noch nicht in die 1. BImSchV verankert. Aufgrund dieser Tatsachen hat diese Norm noch keinen rechtlich bindenden Charakter, sodass zukünftig noch näher festgelegt werden muss, welche Pelletnormen für die Verbrennung in KFAs erfüllt werden müssen.

2.1.2 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen an Pellets, die sich in den EN Normen DIN_EN 14961-2 bzw. -6 widerspiegeln, können in zwei Bereiche unterteilt werden.

Zum einen müssen Pellets bestimmte physikalische Eigenschaften aufweisen, damit diese problemlos transportiert, gelagert und in Anlagen verbrannt werden dürfen. Neben dem Feinanteil, der nicht größer als 1 – 2 M.% sein darf und der Pelletlänge, die zwischen 3,5 und 40 mm betragen muss, sind die Abriebfestigkeit und die Schüttdichte die wichtigsten physikalischen Anforderungen (siehe DIN_EN 14961-2 bzw. -6). Insbesondere die beiden letzt genannten Parameter sind bedeutende Faktoren für die Logistik ab dem Pelletwerk bis zur Verbrennung in der Feuerungsanlage (GILBERT et al., 2009 und ZAMORANO et al., 2011).

Außer diesen physikalischen Anforderungen müssen Qualitätspellets für KFAs folgende chemische Anforderungen erfüllen. Neben dem Wassergehalt und dem Heiz- bzw. Brennwert, der die Energiedichte der Pellets bestimmt, ist der Aschegehalt der wichtigste Qualitätsparameter für Pellets, da dieser den Brennwert, das Ascheerweichungsverhalten und das Emissionsniveau beeinflusst (HARTMANN et al., 2000; ZAMORANO et al., 2011). Dabei werden der Aschegehalt und die DT durch die Verfügbarkeit und Aufnahme von Nährstoffen beeinflusst (LEWANDOWSKI et al., 2000). Allgemein sollte der Aschegehalt von Biomassen aus verbrennungstechnischer Sicht möglichst niedrig sein, da dann neben dem möglichst geringen Gehalt an Störelementen (bspw. N, S, und Cl) auch mit verringerten anlagentechnischen Problemen zu rechnen ist (ÖHMAN et al., 2004 und KALTSCHMITT et al., 2009). Nach diesen Autoren sind dies primär Korrosion und Verschlackung.

In besonderem Maße kann nach FRITZ und FORMOWITZ (2009) der Aschegehalt als Indikator für den Gehalt an Stickstoff, Schwefel und Chlor angesehen werden. Diese Elemente sind sowohl aus anlagentechnischer, als auch aus immissionsrechtlicher Sicht als besonders kritisch einzustufen, da z. B. N und S aus der Biomasse während der Verbrennung zu umweltschädlichen Oxiden (NO_x und SO_2) reagiert (VAN LOO und KOPPEJAN, 2008). Des Weiteren

wirken S und Cl in Form von Schwefelsäure ($(\text{SO}_4)^{2-}$) und Salzsäure (Cl) korrosiv auf den Brennkessel, sodass zu hohe S- und Cl-Gehalte zu einem erhöhten Kesselverschleiß führen können (LENZ, 2010).

Neben diesen verbrennungstechnisch relevanten Elementen kann ebenfalls das Ascheerweichungsverhalten von Pellets zu gravierenden anlagentechnischen Problemen führen (ÖHMAN et al., 2009 und BAXTER et. al., 2012). Durch zu niedrige Ascheschmelztemperaturen der Biomassen ($< 1.100^\circ\text{C}$) kann es aufgrund der Ascheagglomeration zu einer Verschlackung des Brennraums kommen (AECKERSBERG, 2011). Diese Verschlackung kann dazu führen, dass die Asche nicht mehr automatisch abtransportiert werden kann, was im schlimmsten Falle einen Ausfall der Heizungsanlage zur Folge hat (KALTSCHMITT et al., 2009).

2.2 Grundlagen der Pelletproduktion

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist seit dem Jahr 2000 die Nachfrage nach Pellets kontinuierlich angestiegen. Dementsprechend wurde die Produktion von Holzpellets deutlich erhöht. So wurden im Jahr 2012 2,2 Mio. t Holzpellets produziert (ANONYMUS 1, 2013). Entgegen dieser kontinuierlich voranschreitenden Entwicklung des Pelletheizungs- und Holzpelletmarktes fand jedoch aus produktionstechnischer Sicht kaum eine Weiterentwicklung statt. Die heutige Prozesstechnik der Holzpelletproduktion (siehe Abb. 1) basiert weitestgehend auf der Technik der Pelletproduktion für die Futtermittelindustrie, die bereits in den 1970er Jahren entwickelt wurde. Da aber in den letzten Jahren einige neue innovative Weiterentwicklungen einzelner Verfahrensabschnitte stattfanden, welche noch nicht wissenschaftlich untersucht wurden, ist es notwendig diese Verfahren näher zu beleuchten. Diese Weiterentwicklungen betreffen primär den Bereich der Zerkleinerungs- und Trocknungstechnik.

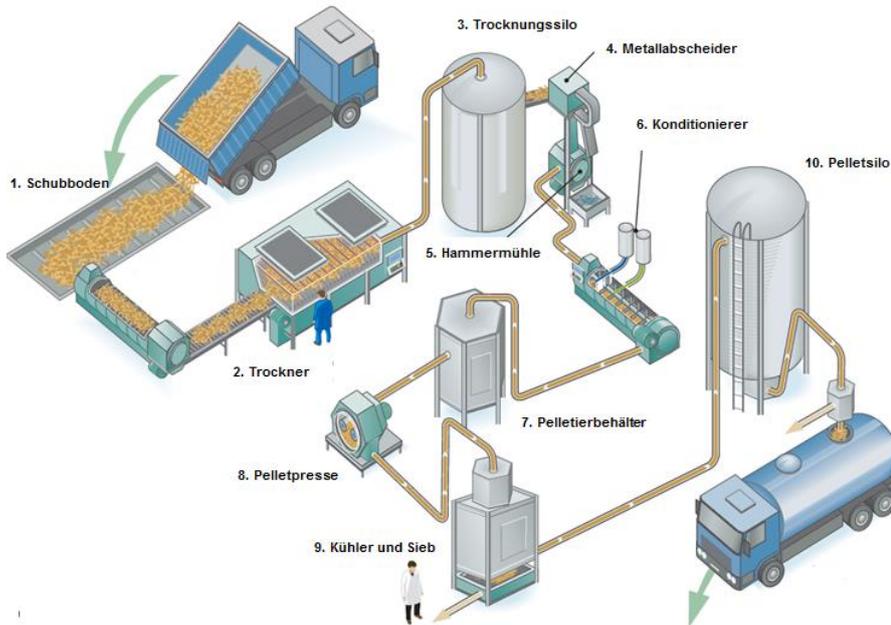


Abbildung 1: Schaubild des Pelletierungsprozesses von Holz nach ANONYMUS 1 (2011)

Im Folgenden werden einige Alternativen zu der herkömmlich eingesetzten Hammermühle aufgezeigt. Diese unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren können möglicherweise den Energiebedarf der Pelletproduktionskette, welcher 17% der Gesamtherstellungskosten von Pellets beträgt (siehe Abb. 2), reduzieren.

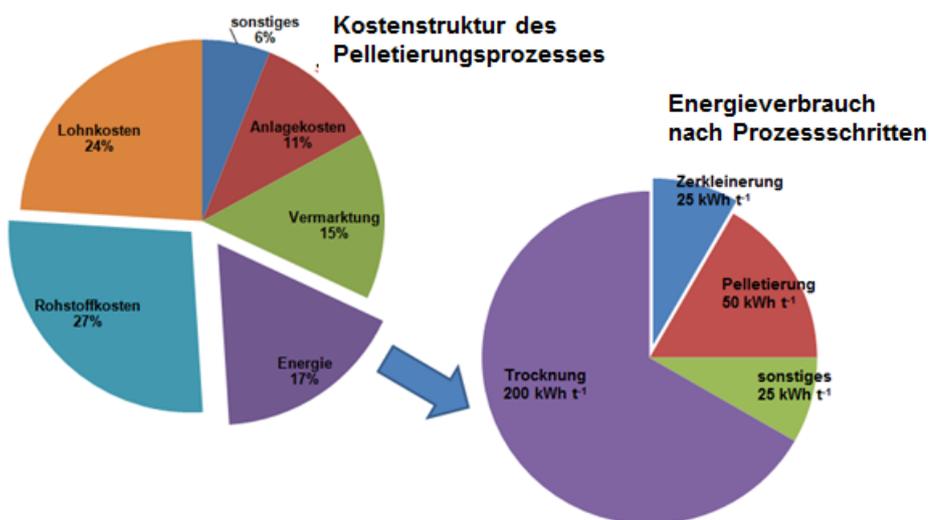


Abbildung 2: Anteile der verschiedenen Kostenarten der Pelletsproduktion in industriellen Pelletwerken (in %) und Energieverbrauch pro produzierter t Pellets nach Angaben von THEK und OBERNBERGER (2001); DI GIACOMO und TAGLIERI (2009); PIRRAGLIA, (2009).

Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass der Hauptteil des Energiebedarfes in der Trocknung liegt. In Bezug auf die Pelletproduktion hat Miscanthus im Gegensatz zu anderen festen Biomassen - wie z. B. Hackschnitzel, Heu aus Landschaftspflege und andere diverse Pressrückstände - den Vorteil, dass dieser feldtrocken (ca. 85 M.-% TM) geerntet wird (LEWANDOWSKI und HEINZ, 2003) und somit für die Weiterverarbeitung nicht getrocknet werden muss.

Gelingt es des Weiteren die Zerkleinerungstechnik, die auch Einfluss auf die Pelletierung hat, zu optimieren, dann wäre der Energiebedarf der Miscanthus-Mischpellet-Produktion deutlich zu reduzieren. Auch wenn eine Prozessoptimierung der Zerkleinerungstechnik nur eine minimale Kostenreduktion zur Folge hätte, so würde diese Verbesserung dennoch positiv auf die Herstellung von Miscanthuspellets wirken.

2.2.1 Grundlagen der Rohstoffwahl

Ebenso wie im Bereich der Produktionskette von Qualitätsholzpellets ist auch seit 10 Jahren bei der Rohstoffauswahl für die Pelletherstellung ein Forschungsstillstand zu verzeichnen.

Vor 10 Jahren wurden Holzpellets für Kleinfeuerungsanlagen zu 100% aus dem äußerst kostengünstigen Abfallprodukt Sägereestholz hergestellt. 2009 wurden dagegen neben 70% Sägereestholz bereits 30% Industrieholz als Pelletrohstoff eingesetzt (ANONYMUS 1, 2013). Aufgrund dieses vermehrten Einsatzes von Industrieholz, der aus einem Sägereestholzmangel resultiert, sind die Rohstoffkosten der Pelletproduktion ebenfalls angestiegen, da eine t Industrieholz rund 90 € kostet (ANONYMUS 4, 2013). Durch diesen Kostenanstieg sind die Rohstoffkosten zu dem bedeutendsten Kostenfaktor der Pelletproduktion geworden.

2.2.1.1 Klassische Rohstoffe

In fast allen mitteleuropäischen Pelletwerken, die Qualitätspellets nach der DIN_EN 14961-2 A1 produzieren, wird als primärer Rohstoff Sägereestholz eingesetzt (DÖRING, 2011). Diese Biomasse stammt meist aus Sägewerken oder der Holzwerkstoffindustrie (KALTSCHMITT et al., 2009). Das Sägereestholz hat meist einen Trockenmassegehalt von 55 bis 65 M.-% und zeichnet sich durch besonders geringe Asche-, Schwefel-, Chlor- und Stickstoffgehalte aus (siehe Tabelle 1).

Zudem besitzt die Biomasse aus diesen Hölzern einen Ascheschmelzpunkt von 1.300°C bis 1.400°C (DÖRING, 2011). Neben diesem Hauptrohstoff wird aufgrund von Angebotsdefiziten mehr und mehr Industrieholz, sprich Stammholz minderer Qualität, durch die Pelletindustrie verarbeitet. Dieses Stammholz ist nach DIN_EN 14961-2 A1 der einzig weitere Hauptbestandteil, der in der Pelletproduktion eingesetzt werden darf.

Tabelle 1: Stickstoff-, Schwefel-, Chlor- und Aschegehalte von Sägespäne ohne Rinde, Fichten- und Buchenholz und Rinde von Nadelhölzern verglichen mit den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2 A1 und A2

	N- Gehalt	S- Gehalt	Cl-Gehalt	Aschegehalt
Rohstoff	[M.-% der TM]			
Sägespäne ohne Rinde ¹	0,10	0,004	0,002	0,3
Fichten-Holz mit Rinde ²	0,13	0,015	0,005	0,6
Buchen-Holz mit Rinde ²	0,22	0,015	0,006	0,5
Rinde von Nadelhölzern ²	0,48	0,085	0,019	3,8
Pellets (DIN_EN 14961-2 (A1))	0,30	0,030	0,020	0,7
Pellets (DIN_EN 14961-2 (A2))	0,50	0,030	0,020	1,5
Quellen: ¹ HASLINGER et al. (2009); ² KALTSCHMITT et al. (2009)				

2.2.1.2 Alternative Rohstoffquellen

Neben den klassischen Rohstoffen bieten alternative Biomassen neue Bezugsquellen für die Pelletindustrie. Durch die neue Europäische Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) wurde es möglich, dass z. B. auch Waldrestholz und Holz aus Kurzumtriebsplantagen zu Qualitätspellets weiterverarbeitet werden dürfen. Diese holzartige Biomasse hat jedoch erhöhte Gehalte von Stickstoff, Schwefel, Chlor und Asche (HOFMANN, 2010). Aus Tabelle 1 geht hervor, dass folgerichtig die Pellets der Qualitätsstufe A2 auch deutlich höhere Schwefel- und Aschegehalte aufweisen dürfen als die der A1.

Bisher gibt es noch keine Daten, wie viele t der Pellets nach Qualitätsstufe A2 jährlich produziert und verkauft werden. Somit können keine Aussagen bezüglich der Nachfrage gegeben werden.

Neben den Qualitätspellet-Normen A1 und A2 gibt es die Industripelletnorm DIN_EN 14961-2 B und die Norm für Mischpellets DIN_EN 14961-6 (siehe Anhang Tabelle. A1). Die Brennstoffe nach diesen Normen sind jedoch noch nicht für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen zugelassen.

Nach der Industripelletnorm B darf für die Pelletproduktion holzartige Biomasse mit einem Aschegehalt von bis zu 3 M.-% TM eingesetzt werden (DIN_EN 14961-2 B). Dagegen darf für die Produktion von Mischpellets fast jedes landwirtschaftliche Produkt eingesetzt werden, wobei diese Norm diverse Grenzwertklassen vorsieht (DIN_EN 14961-6). Einige dieser landwirtschaftlichen Produkte sind KUP-Holz, Stroh, Heu aus der Landschaftspflege, Traubentrester, Rapspresskuchen und Miscanthus (HIENDLMEIER, 2010).

Miscanthus als Rohstoff für die Pelletproduktion

Miscanthus x giganteus ist eine aus Süd-Ost Asien stammende C₄-Pflanze der Familie *Poaceae* (LEWANDOWSKI et al., 2000). Aufgrund des C₄-Mechanismus gehört diese perennierende *Miscanthus*-Art zu den nachwachsenden Rohstoffen mit dem größten Biomassepotential. So berichten CLIFTON- BROWN und LEWANDOWSKI (2002), dass *Miscanthus* einen Biomasseertrag von bis zu 25,5 t ha⁻¹ erzielen kann. Allgemein jedoch kann für den *Miscanthus*-Anbau in Deutschland ein durchschnittlicher Biomasseertrag von 15 t ha⁻¹ angenommen werden (vgl. CLIFTON- BROWN und LEWANDOWSKI, 2002; SIEVERDINGBECK et al. 2010; BIERTÜPFEL et al. 2011; FELTEN und EMMERLING, 2012).

Neben diesem hohen Biomasseertrag zeichnet sich *Miscanthus* in besonderem Maß durch seinen geringen Bedarf an kulturtechnischen Maßnahmen aus (LEWANDOWSKI et al. 2000; LEWANDOWSKI und SCHMIDT, 2006; DONNELLY et al., 2011). Nach der Etablierungsphase, die nach dem vierten Bestandsjahr abgeschlossen ist (PUDE, 2005), müssen in dem *Miscanthus*-Bestand keine Pflanzenschutzmaßnahmen mehr erfolgen (HEATON et al., 2008). Des Weiteren bedarf *Miscanthus* nur einer minimalen Erhaltungsdüngung, da im Herbst ein Großteil der Nährstoffe in die Rhizome rückverlagert wird, bzw. über den Blattfall im Boden verbleibt (LEWANDOWSKI et al., 2000). Zusätzlich zu dem geringen Betriebsmitteleinsatz, der *Miscanthus* im Vergleich zu anderen Energiepflanzen, wie z. B. Mais, als äußerst umweltschonende Kultur auszeichnen (LEWANDOWSKI und SCHMIDT, 2006 und DONNELLY et al., 2011), kommt hinzu, dass *Miscanthus* sowohl aus Gründen des Boden-, als auch des Artenschutzes als wertvolle landwirtschaftliche Kultur angesehen werden kann.

Da ein *Miscanthus*-Bestand nach der Etablierungsphase nur einmal im Jahr zur Ernte befahren werden muss (EL BASSAM und HUISMAN, 2001), ist die Bodenverdichtung auf ein Minimum reduziert. Zusätzlich zu der verringerten Bodenverdichtung, die auch positiv auf die N₂O-Bilanz von landwirtschaftlichen Flächen wirkt (BAKKEN et al., 1987), kann der Anbau von *Miscanthus* Bodenerosion entgegenwirken (ANGELINI et al., 2009). Die geringe Befahrung des Bestands und die nahezu ganzjährige Vegetation führen dazu, dass *Miscanthus*bestände ein Refugium für verschiedenste Tiere sind. In Bezug auf diese positive Wirkung von *Miscanthus* auf die Biodiversität beschreiben SEMERE und SLATER (2007), dass vor allem die Diversität von Insekten auf landwirtschaftlichen Flächen durch den Anbau von *Miscanthus* erhöht werden kann.

Zusätzlich dazu beschreibt LIEBHARD (2010), dass *Miscanthus* besonders wegen der hohen Humusakkumulation als klimaschonende Kultur anzusehen ist. Durch diese dauerhafte Humusbildung wird Kohlenstoff, in einem ähnlich hohen Maße wie unter Dauergrünland, im Bodengefüge festgelegt (SCHNECKENBERGER und KUZYAKOV, 2007).

Diese vielfältigen positiven Eigenschaften könnten dazu führen, dass Miscanthus als „Greening“-Maßnahme zugelassen wird, was zur Folge hätte, dass deutlich mehr Miscanthus in Deutschland angebaut würde. Dadurch könnten größere Mengen an Miscanthus als Rohstoff für die Mischpelletproduktion bereitgestellt werden.

Neben den bisher beschriebenen positiven Eigenschaften stellen jedoch die brennstofftechnischen Eigenschaften eine besondere Herausforderung für die Mischpelletproduktion dar. Obwohl McKendry (2002) beschreibt, dass Miscanthus mit einem Aschegehalt von 2,4 M.-% bessere Brennstoffeigenschaften hat als andere landwirtschaftlich produzierte Biomassen (Weizenstroh: 4 M.-% Asche; Gerstenstroh: 6 M.-% Asche), hat dieser deutlich höhere Gehalte an verbrennungstechnisch problematischen Elementen als Waldholz (< 1 M.-% Asche). Besonders problematische Aschebestandteile von Miscanthus sind relativ hohe N-, S-, Cl- und Alkaligehalte (LEWANDOWSKI und KICHERER, 1997 und KALTSCHMITT et al., 2009). Bei der Mischpelletproduktion gilt es daher optimale Mischungspartner zu identifizieren, welche möglichst geringe Gehalte an verbrennungstechnisch problematischen Elementen aufweisen (RAMPEREZ-CARRASCO et al., 2010).

Zusätzlich zur Selektion optimaler Mischungspartner kann der Gehalt dieser problematischen Elemente in der Biomasse von Miscanthus auch durch verschiedenste kulturtechnische und erntetechnologische Aspekte minimiert werden (CLIFTON- BROWN und LEWANDOWSKI, 2002 und MEEHAN et al., 2012). Als Maßnahmen wären dazu z. B. die Selektion des Genotyps, der Erntezeitpunkt und das Ernteverfahren zu nennen.

Trotz der relativ hohen N-, S-, Cl- und Alkaligehalte berichtet COLLURA et al. (2006), dass während der Verbrennung von Miscanthus die von der DIN_EN 303-5 geforderten Grenzwerte für NO_x, CO und SO₂ eingehalten werden. Diese EN-Norm regelt die Anforderungen an Heizkessel für feste Biomassen unter 500 kW, die durch die Typenprüfung überwacht werden. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten auch DAHL und OBERNBERGER (2004) und CARROLL und FINNAN (2013), die feststellen, dass bei der Verbrennung von Miscanthus keine emissionsrechtlichen Probleme aufgetreten sind.

Somit scheint nach Aussagen dieser Autoren Miscanthus aus emissionsrechtlicher Sicht ein nutzbarer Brennstoff für KFAs zu sein. Des Weiteren berichten die Autoren, dass es während der Verbrennungsversuche nur zu einer geringen Verschlackung der Asche kam, welche aber nicht zu anlagentechnischen Problemen führte.

Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu vielen anderen Untersuchungen (LEWANDOWSKI et al., 2000; CARVALHO et al., 2007; KARAMPINIS et al., 2012), die allgemein beschreiben, dass Miscanthus aufgrund des hohen Alkali- und Siliziumgehaltes eine relativ niedrige Ascheerweichungstemperatur hat.

Neben den Verbrennungseigenschaften von *Miscanthus* wurde bisher auch schon in ersten Versuchen die Pelletierbarkeit von *Miscanthus* untersucht. Dabei zeigen TEMMERMAN et al. (2006), dass *Miscanthus* (3% Abrieb) im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Rohstoffen - wie z.B. Stroh (6% Abrieb) - gute Pelletierungseigenschaften (Abriebfestigkeit und Schüttdichte) aufweist. Im Gegensatz dazu fanden CARROLL und FINNAN (2012) heraus, dass *Miscanthus* Pellets im Vergleich zu anderen Biomassen – unter anderem auch Stroh – etwas schlechtere physikalische Pelleteigenschaften aufwiesen. Dennoch beschreiben diese Autoren, dass die Produktion alternativer Biomassepellets - auch aus *Miscanthus* - in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden.

Somit kann festgehalten werden, dass aus wissenschaftlicher Sicht die Produktion und Verbrennung von *Miscanthus* in Pelletform potentiell möglich ist.

Paulownia tomentosa als Rohstoff für die Pelletproduktion

Damit *Miscanthus* in Form von Pellets aus emissions- und verbrennungstechnischer Sicht problemlos in KfAs verbrannt werden können, schlagen TEMMERMAN et al. (2011) vor, holzartige Biomasse beizumischen.

Sofern landwirtschaftlich produziertes Holz als Mischungspartner verwendet werden soll, ist *Paulownia* aufgrund verschiedener Eigenschaften von besonderem Interesse.

Die Art *Paulownia tomentosa*, die der Familie der *Scrophulariaceae* angehört, stammt aus Süd-Ost-Asien (ZHAO-HUA et al., 1986; ROLOFF und BÄRTELS, 1996). Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wird diese Baumart in Deutschland vor allem als Parkbaum angepflanzt (ESSL, 2007).

Das Standortspektrum für den Anbau von *Paulownia* umfasst Gebiete, deren Jahresdurchschnittstemperatur zwischen -20°C und 40°C beträgt und Jahresniederschläge von 500 mm bis 1500 mm aufweisen. Sie wächst auf sandigen bis lehmigen Böden mit pH-Werten zwischen 5 und 8,5 (ZHU et al., 1986). Optimal für das Wachstum von *P. tomentosa* sind warme Standorte, mit gut durchlüfteten und ausreichend wasser-, nährstoffversorgten, nicht staunässegefährdeten Böden, mit pH- Werten zwischen 6,5 und 7,5 (DONALD, 1990).

In einigen Ländern der Welt ist *Paulownia tomentosa* eine kritisch bewertete Art. So wird beispielsweise *Paulownia* in südlichen Teilen der USA und Ozeaniens aufgrund ihres hohen Selbstversamungspotentials als eine potentielle Gefahr für bestehende Ökosysteme angesehen (ANONYMUS 8, 2013).

In Mitteleuropa ist die Schweiz allerdings das einzige Land, das *Paulownia tomentosa* als eine potentiell invasive Art ansieht. Allerdings wurden in der Schweiz fast alle Exemplare von *P. tomentosa* in oder im direkten Umfeld von Städten wie Basel, Genf oder Zürich gefunden (ANONYMUS 1, 2012). Diese Erkenntnisse decken sich mit Untersuchungen aus Österreich. Dort hatte ESSL (2007) festgestellt, dass über 90% der bekannten Individuen in Städten zu

finden sind und lediglich 7% in ländlichen Habitaten. Dabei waren fast alle ländlichen Habitate extremen anthropogenen Einflüssen ausgesetzt. All diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen im Freiland von LONGBRAKE (2001); MARQUARDT (2012) und PÜHL (2012), dass *Paulownia tomentosa*, außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes vor allem nur in Sukzessionslücken wachsen kann. Solche Sukzessionslücken sind Flächen, auf denen die natürliche Sukzession durch anthropogene Einflüsse oder Naturkatastrophen gestört wurde (PICKETT und WHITE, 1985). Allgemein sehen die vorher genannten Autoren *Paulownia* in gemäßigten Klimaten nur in sehr geringem Maße als potentiell invasiv an.

Ebenso wie *Miscanthus* oder andere Kurzumtriebsarten ist *Paulownia* eine low-input Kultur. So beschreiben MELHUIS et al. (1990) und BERGMAN (2003), dass der Biomassezuwachs von *Paulownia* auf Böden mit einer ausreichenden Nährstoffversorgung nicht signifikant durch eine N-Düngung gesteigert werden kann. Des Weiteren beschreiben CLATTERBURCK und HODGES (2005), dass mit Ausnahme von Herbizidapplikationen während der Etablierungsphase (1. Bis 3. Jahr), keine weiteren Pflanzenschutzmaßnahmen erfolgen müssen, da nur in geringerem Maße mit Schäden durch Insekten und andere Pflanzenpathogene zu rechnen ist. Zusätzlich zu dem geringen Aufwand an Kulturmaßnahmen berichten WANG und SHOGREN (1992), dass sich der Anbau von *Paulownia* positiv auf Agrarökosysteme auswirkt. So benennen diese Autoren Erosionsschutz, Nährstoffspeicherung und Humusakkumulation als bedeutende Leistungen, die der *Paulownia*anbau erbringt.

Somit könnte *Paulownia* aus wissenschaftlicher Sicht eine umweltschonende landwirtschaftliche Kultur sein, sofern diese nicht als potentiell invasiv eingeschätzt wird.

In Bezug auf die Produktion von Pellets berichtet WOODS (2008), dass es erste Vorhaben zur Pelletierung von *Paulownia* als Brennstoff gibt. Auch wenn derzeit noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen zur Nutzung von *Paulownia*-Pellets vorliegen, so kann dennoch aus den Analysen von MEIER und VETTER (2004), VILLANUEVA et al. (2011) und KARAMPINIS et al. (2012) entnommen werden, dass *Paulownia* ein hochwertiger Brennstoff ist. Diese Autoren beschreiben, dass sich *Paulownia tomentosa* aufgrund des geringen Aschegehaltes (0,5 - 1 M.-%) in besonderem Maße für die Verbrennung auszeichnet. Neben dem niedrigen Aschegehalt weist *Paulownia*-Holz geringe N-, S- und Cl-Gehalte auf. Der Brennwert beträgt laut KARAMPINIS et al. (2012) $19,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ und die Ascheerweichungstemperatur rund 1.150°C . Verglichen mit anderen schnellwachsenden Biomassearten wie *Miscanthus*, Pappel oder Weiden hat *Paulownia*-Biomasse daher deutlich bessere Brennstoffeigenschaften.

Bisher wurde noch von keinen Verbrennungsversuchen mit *Paulownia* berichtet, sodass derzeit noch keine Aussagen über emissionstechnische Aspekte getroffen werden können. Dennoch kann aufgrund der relativ geringen N- und S- Gehalte vermutet werden, dass *Paulownia* als Brennstoff eingesetzt werden kann.

Ebenso wie die verbrennungstechnischen Fragestellungen wurde das Ertragspotential von Paulownia bisher nur vereinzelt untersucht. MEIER und VETTER (2004) fanden bei einem Wuchsleistungsversuch in Süd-Deutschland heraus, dass Paulownia ähnlich hohe Erträge (12- 15 t (TM) ha⁻¹) liefern kann wie Pappel und Weiden. Jedoch wurden in diesem Versuch die verschiedenen Arten auf unterschiedlichen Standorten angebaut, sodass dieses Ergebnis nur als erstes Indiz für das hohe Biomassepotential gewertet werden kann.

Somit kann abgeleitet werden, dass Paulownia eine potentiell umweltverträgliche Kurzumtriebskultur mit einem hohen Biomasseertragspotential und guten brennstofftechnischen Eigenschaften ist. Ziel vorliegender Arbeit war es daher zu prüfen, ob Paulownia ein geeigneter Rohstoff für die Miscanthus-Mischpelletproduktion ist.

2.2.2 Technische Grundlagen des Prozessschrittes der Pelletierung

Der zentrale Prozessschritt der Pelletproduktion ist die Pelletierung, in welchem zerkleinerte Biomasse durch eine Matrize gepresst wird, sodass die Schüttdichte des Rohstoffes erhöht wird.

In Tabelle 2 werden die Schüttdichten von verschiedenen holz- und halmgutartigen Biomassen und Normpellets vergleichend dargestellt.

Tabelle 2: Schüttdichten verschiedener Holz hackschnitzel, Miscanthus-Häcksel und Norm-Pellets

Biomasse	Schüttdichte [t m ⁻³]	Quelle
Fichten-Hackschnitzel	0,2	HOFMANN (2010)
Buchen-Hackschnitzel	0,3	HOFMANN (2010)
Pappel-Hackschnitzel	0,2	HOFMANN (2010)
Miscanthus-Häcksel	0,14	HAYER (2010)
Norm-Pellets	0,6	DIN_EN 14961-2

Dadurch, dass die Schüttdichte der Biomasse durch den Pelletierungsprozess signifikant erhöht wird, sinken die Kosten für Transport und Lagerung dieser Biomassen (MANLU et al., 2003). Ein weiterer Vorteil von pelletierter Biomasse für die Verbrennung ist, dass die Automatisierung der Verbrennungstechnik deutlich vereinfacht wird. Um ein für die automatisierte Verbrennungstechnik optimiertes Pellet zu produzieren, ist ein breites Wissen über die Prozesstechnik und die technischen Eigenschaften des Rohmaterials notwendig. Im folgenden Kapitel werden die dazu notwendigen Grundlagen der Pelletierung näher erläutert.

2.2.2.1 Aufbau und maschinenbautechnische Unterschiede von Pelletpressen

Die gängigsten Pelletpressen sind Kollergangpressen (KALTSCHMITT et al., 2009) und bestehen im Wesentlichen, unabhängig von der Bauart, aus Matrize, Koller (Anzahl variabel) und Antrieb. Generell gibt es zwei Bauarten von Kollergang-Pelletpressen, in welche Ringmatrizen oder Flachmatrizen (siehe Abb. 3) eingesetzt sind (HOLM et al., 2011).

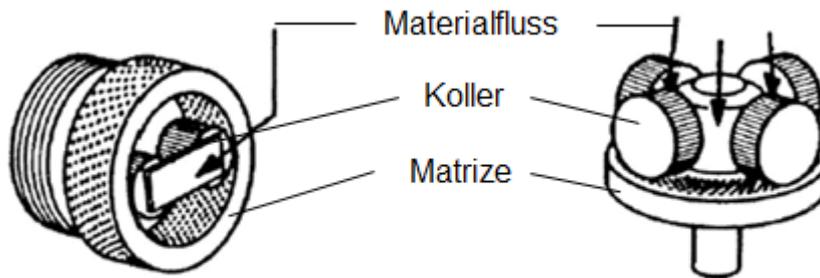


Abbildung 3: Skizze von Matrizenpressen, links: Ringmatrize und rechts: Flachmatrize (nach THEK und OBERNBERGER, 2009)

Die Ringmatrizenpresse hat eine seitliche Materialzuführung. Im Gegensatz dazu weist die Flachmatrize einen Materialzustrom von oben in die Presskammer auf. Weiterhin unterscheiden sich beide Bauarten dadurch, dass bei der Ringmatrizenpresse die gelagerten Koller fest montiert sind und sich die Matrize axial um diese dreht. Somit werden die Presslinge von innen nach außen durch die Matrize gedrückt und anschließend außen abgeschnitten. Dagegen ist die Matrize bei der Flachmatrizenpresse starr und die Koller werden über eine Königswelle angetrieben, sodass die Biomasse von oben nach unten durch die Matrize gepresst wird. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Aufbau einer Flachmatrizenpresse.

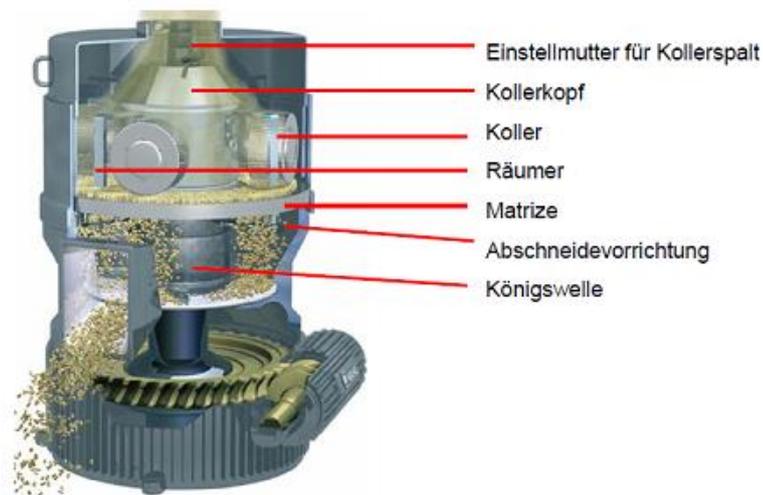


Abbildung 4: Aufbau und Wirkungsweise einer Pelletpresse mit Flachmatrize (STERNOWSKY, 2007)

2.2.2.2 Wirkungsweise und physikalische Grundprinzipien

Alle Arten der Pelletierung weisen eine einheitliche Wirkungsweise auf. Bei der Pelletierung werden Partikel mittels Koller durch eine Zwangsöffnung (Matrizenloch) gepresst. Dabei müssen die Maschineneinstellungen und die Presskanalgeometrie - insbesondere der Durchmesser des Matrizenloches - auf die Materialart abgestimmt sein (KALTSCHMITT et al., 2009).

Die Güte der Pelletierung wird durch die Kriterien Durchsatz, physikalische Pelletqualität (Abriebfestigkeit und Schüttdichte) und spezifischer Energiebedarf (E_{spez}) definiert. Dabei beeinflussen die physikalischen Größen Axialdruck, Antriebsleistung, Reibungskoeffizient und Restfläche der Matrize diese Güte maßgeblich (STERNOWSKY, 2007). Während des Pelletierungsvorganges kann der Axialdruck durch den hydraulischen Druck des Kollerkopfes, an welchem die Koller befestigt sind, den Abstand zwischen Matrize und Koller (Kollerspalt), die Kolleranzahl, -oberfläche und -geschwindigkeit verändert werden. Die Antriebsleistung der Pelletpresse wird durch den Elektromotor limitiert, der in Relation zu dem gewünschten Durchsatz ausgelegt wird. Die Restfläche der Matrize wird durch den Durchmesser und die Presskanallänge, welche die Matrizenstärke bestimmen, definiert (STERNOWSKY, 2007).

Der Reibungskoeffizient, der in drei Wirkungsbeziehungen unterteilt werden kann, stellt die komplexeste physikalische Größe dar. Laut POPOV (2009) gibt der Reibungskoeffizient näherungsweise den Wert der Reibungskraft an. Im Fall der Pelletierung unterteilt STERNOWSKY (2007) diesen Reibungskoeffizienten in drei Wirkbeziehungen, welche den Kraftaufwand und somit den Energiebedarf für das Pressen des Biomassematerials durch die Presskanäle maßgeblich beeinflussen. Diese drei Wirkbeziehungen bestehen zwischen Koller und Material, Material und Material sowie Material und Presskanal.

Die Reibung, die durch den Widerstand zwischen Koller und Material entsteht, ist abhängig von dem eingesetzten Material und den maschinenbaulichen Größen Kollerspalt, Kolleroberfläche, Pressdruck. Der Einfluss des Materials, der bei allen drei Wirkbeziehungen verschieden hohe Widerstände hervorruft, ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Diese sind die Materialstruktur, Materialzusammensetzung bzw. -feuchte, Partikelgröße, -oberflächenstruktur und Partikelform. Die dritte Wirkungsbeziehung zwischen Material und Presskanal wird neben dem Material durch die Matrizengeometrie beeinflusst.

Diese kann hinsichtlich Durchmesser, Presskanallänge, Schluck und Teilung differenziert werden (siehe Abb. 6). Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Qualitätskriterien des Pelletierungsvorganges und den physikalischen Größen sowie den Faktoren, die diese Größen beeinflussen, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Physikalische Größen und deren Einflussfaktoren, welche die Qualität der Pelletierung bestimmen (abgeändert nach STERNOWSKY, 2007)

Qualitätskriterien der Pelletierung			
Durchsatz	spezifischer Energiebedarf		physikalische Pelletqualität
↑	↑	↑	↑
↑	↑	↑	↑
physik. Größen	Axialdruck	Antriebsleistung	Reibungskoeffizient
	↑	↑	↑
Einflussfaktoren	Maschinenbauliche Parameter	Matrizengeometrie	Material
	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulikpressdruck - Elektromotor - Kollerspalt - Kolleranzahl - Kolleroberfläche - Kollergeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Lochdurchmesser - Presskanallänge - Lochfläche - Schluck - Teilung 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialzusammensetzung - Materialfeuchte - Materialstruktur - Partikelgröße - Partikelform - Partikeloberflächenstruktur

2.2.2.3 Einfluss der Matrizengeometrie

Bei der Pelletierung wird die Art der Matrize (Matrizengeometrie) auf die Biomasse abgestimmt. Generell müssen Pellets, die in KFAs verbrannt werden sollen, einen Durchmesser von 6 bzw. 8 mm aufweisen (DIN_EN 14961-2).

Je nach Biomasseart und Vorkonditionierung muss dann eine Matrize gewählt werden, die eine gute Pelletierung garantiert. Neben dem vorgegebenen Durchmesser bestimmen dabei der Schluck, die Presskanallänge und die Teilung die Eignung der gewählten Matrize (STERNOWSKY, 2007). In Abbildung 5 sind diese Charakteristika schematisch dargestellt. Der Schluck ist eine bisher kaum untersuchte geometrische Größe. Der Vergleich der Variante 1 und 2 in der Abbildung 6 soll skizzenhaft zeigen, wie der Schluck in einem Presskanal variieren kann. Generell wirkt der Schluck auf das Einpressverhalten während des Pelletierungsprozesses. Dabei treten je nach Biomasseart und Schluck unterschiedliche Widerstandskräfte auf, die den Reibungskoeffizienten zwischen Koller und Material bzw. Material und Presskanal beeinflussen (STERNOWSKY, 2007).

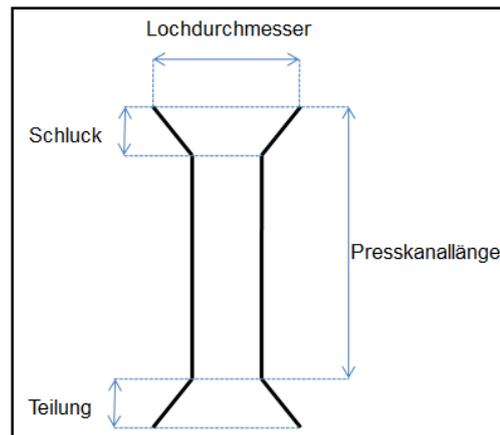


Abbildung 5: Skizze des Presskanals einer Lochmatrize und deren geometrischer Größe

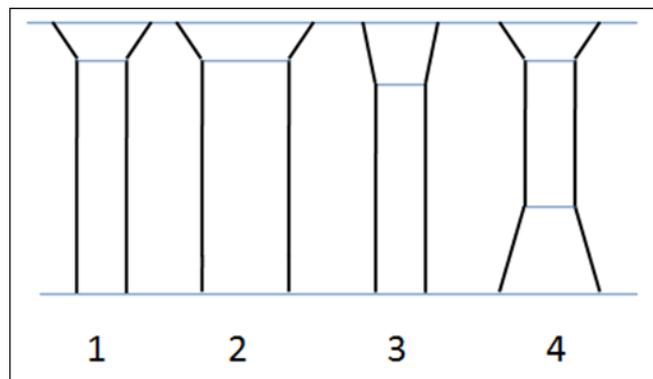


Abbildung 6: Skizze von Presskanälen mit unterschiedlichen Presskanallängen, Lochdurchmesser, Schluck und Teilung

Aus dem Vergleich der Varianten 1 und 4 in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass mittels einer verlängerten Teilung (Variante 4) die Presskanallänge reduziert werden kann. Des Weiteren kann auch ohne Teilung durch die Verwendung von unterschiedlich starken Matrizen die Presskanallänge verändert werden. Eine Reduktion der Presskanallänge hat generell zur Folge, dass das Verhältnis von Lochdurchmesser (d_{Loch}) zu Presskanallänge ($L_{Presskanal}$) erhöht wird und somit der Reibungskoeffizient verringert wird. Laut VON REICHENBACH (2011) werden für die Pelletierung von holz- und halmgutartigen Biomassen Matrizen mit einem $d_{Loch} : L_{Presskanal}$ -Verhältnis von 1 : 5 bis 1 : 8 eingesetzt. Nach KALIYAN und MOREY (2009) führen Matrizen mit längeren Presskanälen zu einer Erhöhung des spezifischen Energiebedarfes, einer Steigerung der physikalischen Pelletqualität und einer Verringerung des Durchsatzes. In Bezug auf die Teilung stellt OTTLINGER (2009) dar, dass für die Pelletierung von Holz Matrizen mit einer längeren Teilung eingesetzt werden. In diesen Fällen hat die Teilung neben der Regulierung der Presskanallänge die Funktion eine Rückdehnung der bis zu 100°C warmen Pellets bei Austritt aus dem Presskanal zu reduzieren (VON REICHENBACH, 2011).

2.2.2.4 Einfluss des Materials

Materialzusammensetzung und Feuchtegehalt

In Hinsicht auf die Materialzusammensetzung ist bei der Pelletierung von holz- und halmgutartiger Biomasse insbesondere der Gehalt an Lignin, Ölen und polyphenolischen Verbindungen für den Pressvorgang ausschlaggebend (OLSSON und SALMEN, 1992; STERNOWSKY, 2007; STELTE et al., 2011a). Lignin, welches einer der wichtigsten Bestandteile von Holz ist (KLASON, 1936), beginnt während des Pelletierungsvorgangs unter dem Einfluss von Wasser bei Temperaturen zwischen 50°C und 100°C zu erweichen (STELTE et al., 2011a). Dieses Ligninerweichen bewirkt, dass die einzelnen Partikel während des Pelletierungsvorgangs miteinander verkleben (KALIYAN und MOREY, 2009). Geringere Ligninerweichungstemperaturen (T_g) führen dazu, dass der Reibungskoeffizient verringert wird und somit weniger Kraft für den Pressvorgang notwendig ist (STERNOWSKY, 2007). Die Temperatur, bei welcher Lignin in der Holzstruktur zu erweichen beginnt, ist laut OLSSON und SALMEN (1992) unter anderem von dem Verhältnis von Hydroxyl-Gruppen (OH-Gruppen) zu Methoxyl-Gruppen (CH₃-Gruppen) des Lignins und des Gehaltes von freien Polyphenolen abhängig. Nach dieser Theorie führt ein höherer Anteil dieser OH-Gruppen bzw. Polyphenole zu einer Erhöhung der T_g in der Biomasse. Ein höherer Anteil von CH₃-Gruppen senkt die T_g . Laut MORTIMER und MÜLLER (2010) bilden OH-Gruppen sehr starke Wasserstoffbrückenbindungen, für deren Aufbrechen sehr viel Energie benötigt wird. Diese Theorie bestätigen auch die Untersuchungen von PLACET et al. (2008) und NIELSEN et al. (2009). Dagegen stehen die Untersuchungen von HORVARTH et al. (2011) im Widerspruch zu dieser Theorie, da diese feststellten, dass erhöhte Anteile an CH₃-Gruppen zu keiner Verringerung der T_g führen. Weiterhin stellen diese fest, dass der Einfluss der Ligninstruktur auf das Ligninerweichungsverhalten ungeklärt ist. Sie fassen jedoch zusammen, dass sowohl die Struktur als auch der Gehalt von Lignin die T_g maßgeblich beeinflussen. Insgesamt hat laut BACK (1987) der Lignin-Cellulose-Bindungskomplex (Wasserstoffbrückenbindungen) den größten Einfluss auf das Verkleben der Partikel während des Prozessschrittes der Pelletierung.

Neben dem Komplex Lignin haben Öle, die in der Biomasse enthalten sein können, einen Einfluss auf die Pelletierung. Während des Pelletierungsvorganges wirken Öle als Schmierstoffe. Dabei verringern erhöhte Ölgehalte den Reibungskoeffizient, was zur Folge hat, dass der Durchsatz steigt und der spezifische Energiebedarf reduziert wird (BRIGGS et al., 1999 und KALIYAN und MOREY, 2009). Diese Autoren beschreiben weiter, dass erhöhte Ölgehalte jedoch zu einer Verringerung der Schüttdichte und Abriebfestigkeit führen. Dies ist auf die hydrophobe Eigenschaft von Ölen zurückzuführen, die das Verkleben der einzelnen Materialpartikel behindert.

Der Wassergehalt der Biomasse ist ein weiterer wichtiger Parameter, der auf den Pelletierungsvorgang wirkt und die Qualität der Pellets beeinflusst. Nach MANI et al. (2006b), PILZ (2008) und SAMUELSSON et al. (2012) ist ein Wassergehalt von 11 bis 14 M.-% in der Biomasse optimal für die Pelletierung. Laut NIELSEN et al. (2009) und SAMUELSSON et al. (2012) dient Wasser zum einen als Schmiermittel und zum anderen ist Wasser für eine optimale Bindung der Partikel notwendig. STELTE et al. (2011a) beschreiben, dass die Ligninerweichung während des Pelletierungsvorgangs nur mit Wasser ablaufen kann. Bei dem Vorgang der Pelletierung wird die Biomasse über 100°C erhitzt (NIELSEN et al., 2009). Dadurch verändert sich die Aggregatform des Wassers in der Biomasse zu Dampf. Diese gasförmigen H₂O-Moleküle führen dazu, dass Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Ligninmolekülen aufgebrochen werden können, sodass der oben beschriebene Verklebungsprozess ablaufen kann. Neben dem nominalen Wassergehalt der Biomasse, der nach DIN_EN 14774 bestimmt wird, ist die Art der Wasserbindung mitentscheidend. So differenzieren KALIYAN und MOREY, 2009 beispielsweise in inner- und äußerpartikuläres Wasser.

Materialstruktur sowie Partikelgröße, -oberflächenstruktur und -form

Ein bisher kaum erforschter Einflussfaktor auf den Pelletierungsprozess ist die Materialstruktur der Biomassearten. Laut STELTE et al. (2011a) unterscheiden sich verschiedene Biomassen in der Zellstruktur. In Bezug auf diese Unterschiede, die zu unterschiedlichen Materialelastizitäten führen, sind die interzelluläre Porosität und die Zellform, -anordnung und -größe von besonderer Bedeutung. Allerdings erfolgten bisher noch keine nähergehenden Untersuchungen zu den Auswirkungen dieser Eigenschaften auf den Pelletierungsprozess.

Ebenso wie die bisher aufgeführten Einflussfaktoren bestimmen die Partikelgröße, -oberflächenstruktur und -form die Qualität des Pelletierungsprozesses. Diese drei Faktoren bestimmen zum einen die Packdichte während des Pressvorgangs und zum anderen wird die Größe der Bindungsfläche pro Volumen von Partikelgröße und Oberflächenstruktur beeinflusst (KALIYAN und MOREY, 2009). Je größer diese Bindungsfläche ist, desto höher wird die Abriebfestigkeit der Pellets. Diese drei Faktoren werden wiederum maßgeblich durch die Art der Zerkleinerung bestimmt (ESTEBAN und CARRASCO, 2006).

2.2.3 Grundlagen und Vergleich der Zerkleinerungstechnik

In Bezug auf die Zerkleinerungstechnik wird nach derzeitigem Stand der Technik die Hammermühle (siehe Abb. 7) für den Pelletierungsprozess eingesetzt. Dieses Verfahren, welches schon seit Jahrzehnten bei der Tierfutteraufbereitung eingesetzt wird, ist nach HOLTZAPPLE et al. (1988) und ESTEBAN und CARRASCO (2006) als energetisch hoch einzustufen.

HOLTZAPPLE et al. (1988) weisen zudem darauf hin, dass der Energiebedarf dieses Prozessschrittes reduziert werden sollte. Zu dieser Forderung stellen BITRA et al. (2009) dar, welche Möglichkeiten existieren, um den Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung zu reduzieren. Diese zeigen, dass zu einem bestimmten Anteil Maschineneinstellungen und maschinenbautechnische Änderungen die Effizienz der Hammermühlen beeinflussen können. Als weiteren Optimierungsansatz schlagen die vorher genannten Autoren den Einsatz alternativer Zerkleinerungsverfahren vor, darunter sind Schneidmühlen und Walzenmühlen. Diese alternativen Zerkleinerungsverfahren konnten sich allerdings in der praktischen Anwendung nicht durchsetzen.

Dies bestätigen ESTEBAN und CARRASCO (2006) indirekt, indem sie schreiben, dass in Bezug auf die Feinzerkleinerung von lignocellulosehaltigen Stoffen ein Forschungsdefizit besteht. Aus diesem Grund werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit neue Alternativen zur Zerkleinerung von Biomassen für den Pelletierungsprozess untersucht.

Dabei stellen nachfolgende Maschinen besonders interessante Zerkleinerungsalternativen zu der üblichen Hammermühlentechnik dar:

- Trockenzerfaserung
- Kollermühle
- Prallreaktor

Da diese Zerkleinerungsverfahren Neuentwicklungen sind, gibt es bis auf die Herstellerangaben, die bei allen Verfahren deutlich minimierte Energieaufwandmengen versprechen, noch keine technischen Daten. Diese Herstellerangaben, die sich auf die Zerkleinerung von holzartiger Biomasse beziehen, erlauben jedoch keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energiebedarf für die Zerkleinerung anderer Biomassearten. Zudem weisen diese Zerkleinerungsverfahren unterschiedliche Wirkprinzipien auf, welche nicht einheitlich auf andere Biomassearten wirken. ESTEBAN UND CARASSCO, (2006) zeigen dazu eingehend, wie unterschiedliche Biomassen auf ein Zerkleinerungsverfahren wirken können. Daraus resultiert, dass es notwendig ist, diese neuen Zerkleinerungsverfahren auf deren Leistungsbedarf und Produktqualität zu untersuchen.

Hammermühle

Die Hammermühle übt eine schlagende Wirkung auf Partikel aus und ist universell für viele Arten von Biomassen einsetzbar (SCHOLTEN und McELLINEY, 1985). Die wichtigsten Bestandteile sind der Antrieb (meist Elektromotor), der Rotor mit gelagerten Hämmern, das Sieb und das Gehäuse. Hammermühlen gibt es in verschiedensten Ausführungen und Dimensionen. Der Energiebedarf zur Zerkleinerung einer t lignocellulosehaltiger Biomasse variiert nach Literaturangaben zwischen 20 und 150 kWh t⁻¹ (CADOUCHE und LÓPEZ, 1989; PERRY und GREEN, 1999; MANI et al., 2004). Nach Manlu et al. (2003) bestimmen verschiedene Faktoren die Arbeitsqualität und den Energiebedarf von Hammermühlen. Einige dieser Faktoren sind die Biomasseart (ESTEBAN und CARRASCO, 2006), Drehzahl der Hämmer und die Hammerschlagfläche (HALL UND DAVIS, 1979), Antriebsleistung, Lochdurchmesser der Siebe und Abstand zwischen Sieb und Hammer (MANLU et al., 2003). In Abbildung 7 ist schematisch der Aufbau einer Hammermühle dargestellt.

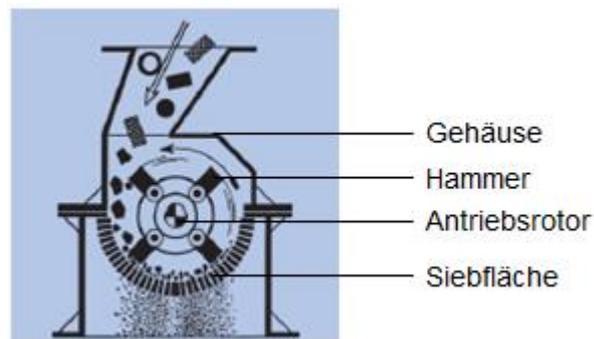


Abbildung 7: Schematischer Aufbau einer Hammermühle (ANONYMUS 2, 2011)

Um eine schlagende Wirkung aufbauen zu können, müssen die Hämmer mit Drehzahlen von 2000 bis 3600 U min⁻¹ rotieren (BITRA et al., 2009). Aufgrund dieser hohen Drehzahlen entsteht ein gerichteter Luftstrom von der Materialzufuhröffnung zu dem Sieb, der einen kontinuierlichen Materialstrom garantiert. BITRA et al. (2009) sehen diesen notwendigen Luftstrom als bedeutenden Energieverbraucher.

Trockenzerfaserung

Die Trockenzerfaserung (bzw. Zerfaserung) ist eine Vorrichtung zur Zerfaserung von stängel-, halm-, oder blattartigen nachwachsenden Rohstoffen, wobei nur zwei Prototypen dieser Maschine existieren (GAESE, 2010). Diese Maschine, welche durch einen Elektromotor oder über eine Zapfwelle angetrieben werden kann, zerkleinert mit einem zerreißenden Mechanismus Biomassen (ANONYMUS, 2005). Hauptbestandteile dieser Vorrichtung sind ein als Siebtrommel ausgebildeter Stator und ein Rotor mit axial angebrachten Armen, die tangential an den Sieben entlanggeführt werden (siehe Abb. 8).

Sowohl an den Armen des Rotors als auch zwischen den Sieben sind Sägeblätter angebracht. Die Sägeblätter zwischen den Sieben sind radial nach innen und die an den Armen der Rotoren sind radial nach außen angebracht. Zwischen den Sägeblättern entsteht bautechnisch ein Spalt von etwa 0,5 – 1 mm.

Durch die Drehbewegung der Rotoren mit einer Drehzahl von 200 – 400 U min⁻¹ wird die Biomasse zwischen den Sägeblättern durch entstehende Schub- und Zugspannungen zerrissen (ANONYMUS, 2005).



Abbildung 8: Trockenzerfaserung 22/600 der FH Köln, links: Außenansicht und rechts: Innenansicht

Nachdem das Material zwischen den Sägeblättern zerrissen wurde, gelangt das Zerkleinerungsprodukt durch die Siebe, die eine quadratische Fläche von 25 mm² aufweisen. Die Bewegung des Materials durch die Siebe kommt zum einen durch eine Schwerkraftbewegung nach unten durch die Siebfläche und durch eine Luftbewegung zu allen Seiten durch die Siebe zustande. Eine genaue Untersuchung der Krafteinflüsse, welche die Materialbewegung des Zerkleinerungsproduktes bewirkt, hat bisher noch nicht stattgefunden (SCHOLTE-REH, 2012).

Nach Angaben von GAESE (2011) und SCHOLTE-REH (2012) benötigt die Zerfaserung im Vergleich mit der Hammermühle zur Zerkleinerung von halmgutartigen Biomassen weniger Energie. Der spezifische Energiebedarf dieser Zerkleinerungsmethode ist abhängig von der Art und dem Wassergehalt der Biomasse, der Drehzahl der Rotoren und der Zufuhrmenge. Neben dem geringeren Energiebedarf benennt GAESE (2011) als weiteren Vorteil der Trockenzerfaserung die verbesserten Pelletierungseigenschaften des Zerkleinerungsproduktes.

Kollermühle

Die Firma Amandus Kahl hat auf der Grundlage einer Pelletpresse ein universell einsetzbares Verfahren zur Zerkleinerung von Biomassen entwickelt. Das Zerkleinerungsverfahren der Kollermühle ist mit Ausnahme der Matrize identisch aufgebaut, wie die in Abbildung 4 (siehe Kapitel 2.2.2.1) dargestellte Flachmatrizenpresse. Die Matrize der Kollermühle unterscheidet sich von den Matrizen von Pelletpressen durch die Länge der Presskanäle. Abbildung 9 zeigt skizzenhaft den Unterschied dieser Presskanäle. Links ist der kürzere Presskanal einer Matrize der Kollermühle, rechts ist der längere Kanal einer Matrize für Pelletpressen dargestellt.

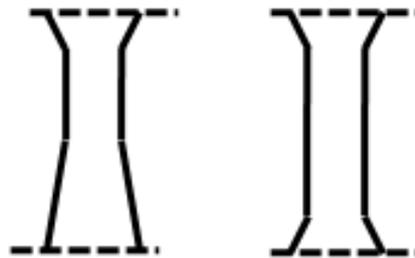


Abbildung 9: Skizze der Geometrie von einem Presskanal einer Matrize für die Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts)

Die Kollermühle zerkleinert die Biomasse mit einem reibenden, scherenen und zugleich schneidenden Mechanismus. Ein oder zwei Elektromotoren treiben die Königswelle an, auf welcher der Kollerkopf mit den Kollern befestigt ist. Durch die axiale Drehbewegung mit ca. 150 U min^{-1} des Kollerkopfes laufen die Koller tangential zu der Matrize in einer ebenfalls axialen Bewegung zu der Königswelle. Dabei drückt der Koller die Biomasse auf die Matrize und durch die Presskanäle, wodurch die oben beschriebenen Zerkleinerungsmechanismen auf das Material wirken. Der Abstand des Kollers zu der Matrize, der als Kollerspalt definiert ist, ist nur 1 - 2 mm groß und wird hydraulisch über eine Stellmutter reguliert. Im Vergleich zu der Hammermühle weist die Kollermühle einen deutlich geringeren spezifischen Energiebedarf auf (SITZMANN und BUSCHHART, 2009).

Der spezifische Energiebedarf zur Zerkleinerung von Biomassen ist unter anderem abhängig von Art, Struktur und Wassergehalt der Biomasse, der Zufuhrmenge, der Kollerzahl und dem Kollerdruck (P_{Koller}) (VON REICHENBACH, 2011).

Prallreaktor

Der Prallreaktor (Abb. 10) wurde ursprünglich als eine Vorrichtung zur Verarbeitung von Bauteilen aus Mischstoffen entwickelt (ANONYMUS, 2000). Primär sollte dieser zur Separierung verschiedenster Wertstoffe, wie z. B. Elektroschrott oder Spanplatten eingesetzt

werden. In den letzten Jahren kamen laut SCHÄFER (2011) aus dem Bereich der Biomasse-verarbeitenden Industrie diverse Produkthanfragen. Auch BRUCKNER (2010) und WETTER et al. (2010) benennen den Prallreaktor als eine neue alternative Methode zur Zerkleinerung von Biomassen.

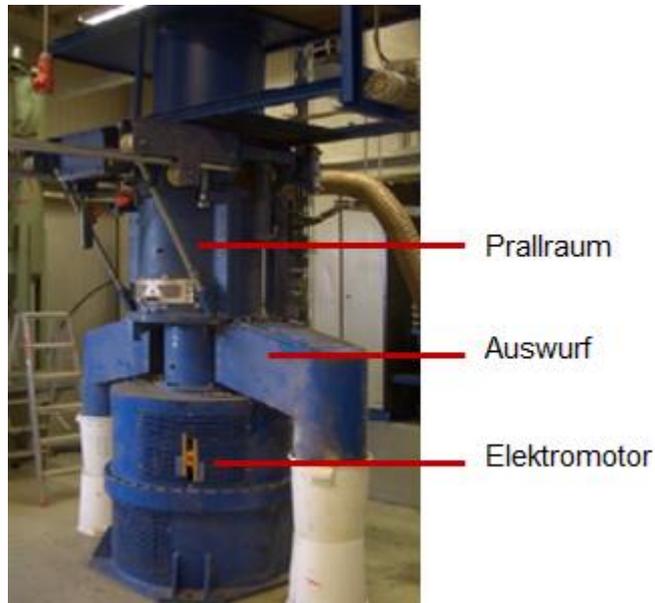


Abbildung 10: Prototyp eines Prallreaktors im Technikum der Firma Schäfer (SCHÄFER, 2011)

Der Prallreaktor ist nach ANONYMUS (2000) dadurch gekennzeichnet, dass er aus einem zylindrischen Mantel (Prallraum) mit am Umfang angebrachten Pallelementen und einem, in der Höhe stufenlos verstellbaren, Rotor ausgestattet ist. Der Mantel, auf dem innenseitig die Pallelemente angebracht sind, ist zwischen den Pallelementen teilweise mit Sieben ausgestattet, durch welche die zerkleinerten Materialien ausgeführt werden.

An dem Rotor, der direkt durch einen Elektromotor angetrieben wird, sind radial zwei Arme befestigt, auf denen verschieden große Paddel (Prallfläche) angebracht werden können. Durch die axiale Drehbewegung (1500 bis 3000 U min^{-1}) der Paddel, deren Abstand zum Mantel hydraulisch variiert werden kann, wird die zu zerkleinernde Biomasse gegen die Pallelemente geschleudert. Dadurch zerplatzt diese und wird durch die Siebelemente ausgeschleudert. Vom Wirkungsprinzip unterscheidet sich der Prallreaktor deutlich von der Hammermühle. Bei der Hammermühle wird der Partikel aktiv durch die Maschine zerschlagen. Im Gegensatz dazu zerkleinert der Prallreaktor Partikel passiv, da diese nur durch die Paddel an den Rotoren beschleunigt werden. Nach Aussagen von SCHÄFER (2011) ist der Prallreaktor deutlich energieeffizienter als eine Hammermühle.

Stand der Zerkleinerungstechnik

Aus den vorherigen Abschnitten geht hervor, dass die Hammermühle ein energieineffizientes Zerkleinerungsverfahren ist. Obwohl bereits durch wissenschaftliche Untersuchungen gezeigt wurde, dass alternative Zerkleinerungsverfahren aus energetischer Sicht effizienter sein können, werden in Pelletwerken dennoch meist Hammermühlen eingesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen drei neuartige Zerkleinerungsverfahren, die laut der Hersteller bzw. Entwickler energieeffizienter sind als Hammermühlen, auf deren Eignung für den Einsatz im Pelletierungsprozess untersucht werden.

2.2.4 Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion

Da bisher noch kein Konzept einer Miscanthus-Mischpelletproduktion erstellt wurde, kann im Rahmen vorliegender Arbeit auf keine direkten Referenzdaten zurückgegriffen werden.

Auch wenn THEK und OBERNBERGER (2004), MANI et al. (2006a) und PIRAGGLIA et al. (2010) den Pelletierungsprozess auf dessen Wirtschaftlichkeit analysiert haben, können deren Erkenntnisse nur sehr eingeschränkt genutzt werden. Insbesondere lässt es die aktuelle Preisentwicklung im deutschsprachigen Raum nicht zu, dass die oben genannten Ergebnisse für Kosten und Leistungen in die vorliegende Arbeit miteinfließen.

Aus diesem Grund basiert in der vorliegenden Arbeit die Wirtschaftlichkeitsanalyse einer potentiellen Miscanthus-Mischpelletproduktion auf aktuellen Kosten und Erlösen.

Um eine Unternehmung - zu der auch die Pelletproduktion gehört - ökonomisch bewerten zu können, ist eine Kosten-/ Leistungsrechnung notwendig. Diese ist eine betriebsbezogene Rechnung, welche durch den Abzug der Kosten von den Leistungen den Erfolg (Gewinn) der Unternehmung beschreibt (ROLLWAGE, 1999). Nach WEBER (2012) wird dabei in Voll- und Teilkostenrechnung unterschieden. Die Vollkostenrechnung erfordert es, dass alle anfallenden Kosten (variable und fixe Kosten) einer Unternehmung bekannt sind. Im Gegensatz dazu berücksichtigt die Teilkostenrechnung lediglich die variablen Kosten (WEBER, 2012).

2001 und 2004 führten THEK und OBERNBERGER bereits eine Berechnung der Kosten des Pelletierungsprozesses durch. Diese erfolgte nach der Richtlinie 2067 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Laut FRANKE (2008) stellt diese Richtlinie eine Investitionsrechnung dar. Diese Investitionsrechnung kann unter anderem als Entscheidungshilfe dienen, um festzustellen ob die Investition in eine geplante Unternehmung vorteilhaft ist oder nicht (WEBER, 2012).

Im Fall der Kostenanalyse des Pelletierungsprozesses durch THEK und OBERNBERGER (2004) handelt es sich um eine Vollkostenrechnung. Dabei analysieren diese die Gesamtkosten auf Grundlage von Istkosten der österreichischen Pelletproduktion. Allerdings stellt diese Analyse keine vollständige Vollkostenrechnung dar, da die Autoren nicht alle Kosten der Pelletproduktion erfasst haben. Unter anderem werden die Kosten der

Kapitalbindung, welche durch die Einlagerung der Pellets für mehrere Monate entstehen, nicht berücksichtigt. Dennoch kann diese Berechnungsmethode als eine Vorlage für weitere Untersuchungen genutzt werden.

Neben der Kosten-Leistungsrechnung stellt die interne Zinsfußmethode eine weitere Möglichkeit dar, um ein Investitionsvorhaben zu bewerten (BRANDES und ODENING, 1992; SCHNEEBERGER UND PEYERL, 2011). Durch diese Methode, die laut ANONYMUS 9 (2013) in deren Befragung von 68% der Unternehmen angewandt wird, wird die interne Rendite (interner Zinsfuß) einer Unternehmung bestimmt. Allgemein sollte die interne Rendite größer als der kalkulatorische Zinssatz sein.

Die bisher aufgeführten Analysen der geplanten Investition erfassen lediglich die Istkosten. Eine weitere Möglichkeit, um eine Unternehmung näher zu untersuchen, ist die Sensitivitätsanalyse. Durch die Sensitivitätsanalyse können mögliche Risiken, welche durch Änderung einzelner Kostenfaktoren oder des Erlöses entstehen können, abgeschätzt werden (WEBER, 2012). Laut BRANDES und ODENING (1992) kann eine Sensitivanalyse mit einer Alternativkostenrechnung und der Methode der kritischen Werte durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Analysen kann abgeschätzt werden, inwiefern Änderungen von Schlüsselfaktoren (Kosten und Erlöse) den Gewinn beeinflussen können.

Bei der Methode des kritischen Wertes werden für die Schlüsselfaktoren einer Investition anhand bestimmter Schlüsselvariablen sogenannte kritische Werte ermittelt, bei deren Unterschreiten (im Falle von Erträgen) bzw. Überschreiten (im Falle von Kosten) die Rentabilität der Investition gefährdet erscheint. Liegt der Erwartungswert des Parameters deutlich günstiger als der kritische Wert, so wird die Investition als risikoarm angesehen (BRANDES und ODENING, 1992).

2.3 Greening

Die geplante Einführung des „Greenings“ durch die EU könnte maßgebliche Auswirkungen auf die Miscanthus-Mischpelletproduktion haben.

2011 hatte die Kommission der Europäischen Union beschlossen, im Rahmen der GAP-Reform eine umweltangepasste Landwirtschaft zu forcieren, indem eine „Greening“-Komponente eingeführt werden soll (FORSTNER et al., 2012). Die Vorlage der EU-Kommission sieht vor, neben der Diversifizierung der Kulturen auf der Anbaufläche und der Erhaltung von Grünland sogenannte ökologische Vorrangflächen (ÖVF) zu schaffen. Laut ISERMAYER und WEINGARTEN (2012) sind diese Vorrangflächen einer der kontroversen Aspekte dieser geplanten GAP-Reform.

Damit Landwirte nach dem Jahr 2013 in vollem Umfang die Betriebsprämie, von derzeit in Deutschland durchschnittlich 340 € ha⁻¹ (ANONYMUS 10, 2013), erhalten, müssen nach dem Entwurf der EU-Kommission 7% der Betriebsfläche ÖVF sein (ALLEN und HART, 2013). Falls

Landwirte nicht in vollem Umfang die geforderten „Greening“- Maßnahmen durchführen würden, könnten bis zu 30% der Betriebsprämie (ca. 100 € ha⁻¹) durch die Behörden einbehalten werden.

Auf diesen sogenannten ÖVF sollen umweltfördernde Maßnahmen, wie z. B. Anlage von Brachflächen, Terrassen, Pufferstreifen und Landschaftselemente erfolgen (KASPERCZYK, 2012). Neben diesen Maßnahmen können nach Vorstellungen der EU Kommission aber auch extensiv bewirtschaftete Flächen als „Greening“-Maßnahme angerechnet werden. Die Kommission der EU definiert die extensive Flächenbewirtschaftung durch einen im Verhältnis zur Fläche stehenden geringen Einsatz von Kapital und Arbeit (Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen) (Anonymus 11, 2013). Obwohl derzeit noch keine konkreten „Greening“-Maßnahmen festgelegt worden sind, müsste der Anbau von Miscanthus und KUPs zugelassen werden, da diese Kulturen die Anforderungen der extensiven Flächenbewirtschaftung erfüllen.

Ebenso wird zurzeit noch auf legislativer Ebene diskutiert, in welchem Umfang - bezogen auf den Flächenanteil – Betriebe ÖVF bereitstellen müssen. Entgegen des Entwurfes der EU Kommission haben der Ministerrat und das Parlament der EU beschlossen, dass in einem ersten Schritt ab 2015 nur 5% der Betriebsfläche für ÖVP bereitgestellt werden müssen (ANONYMUS 6, 2013).

Es kann festgehalten werden, dass obwohl das EU-Parlament und der Ministerrat bereits das „Greening“ beschlossen haben, noch detaillierte Vorschriften erarbeitet werden müssen. Somit wird erst Anfang 2015 nach weiteren Verhandlungen zwischen Kommission, Ministerrat und Parlament das „Greening“ in der EU eingeführt. Auf Grundlage des „Greenings“ müssten dann in Deutschland 600.000 bis 750.000 ha Flächen für umweltgerechte Maßnahmen bereitgestellt werden. Falls Miscanthus und KUPs als „Greening“-Maßnahmen zugelassen würden, könnte somit die Anbaufläche dieser Nachwachsenden Rohstoffe der zweiten Generation ansteigen.

3. Material und Methoden

Den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen liegen breit gefächerte Themengebiete zugrunde. Um den Ablauf der verschiedenen Versuche für die Entwicklung einer Mischpellet-Produktion zu veranschaulichen, fasst die folgende Tabelle die einzelnen Versuche der vorliegenden Arbeit zusammen.

Tabelle 4: Versuchsabfolge und Zuordnung der Untersuchungsparameter zu den einzelnen Versuchen

Versuche	untersuchte Parameter
3.1 Versuche zur Eignung von <i>Miscanthus x giganteus</i> als Pelletrohstoff 3.1.1 Analyse der Brennstoffeigenschaften 3.1.2 Tastversuche zur Pelletierung von Miscanthus-Mischpellets	- Aschegehalt - N-, S- u. Cl-Gehalt - Brennwert und DT - physik. Qualität (Abrieb, Schüttdichte) - spez. Energiebedarf
3.2 Überprüfung der Eignung von <i>P. tomentosa</i> für die Pelletproduktion 3.2.1 Bestimmung des Ertrages 3.2.2 Analyse der Brennstoffeigenschaften 3.2.3 Bestimmung der Pelletierbarkeit	- Ertrag - Aschegehalt - N-, S- u. Cl-Gehalt - Brennwert und DT -physik. Qualität
3.3 Zerkleinerungsversuche 3.3.1 Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor 3.3.2 Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von Paulownia mittels Hammermühle und Kollermühle 3.3.3 Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens Kollermühle 3.3.4 Pelletierungseigenschaften von M. x g. in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens 3.3.5 Pelletierungsversuche zum Einfluss der Korngrößenverteilung	- spez. Energiebedarf - spez. Energiebedarf - spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität - Durchsatz - spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität - physik. Pelletqualität
3.4 Analyse der Miscanthus-Mischpellets 3.4.1 Analyse der Brennstoffeigenschaften 3.4.2 Wirkung von Kaolin auf die DT der Mischpellets 3.4.3 Eignung von Traubentrester als alternativer Presshilfsstoff 3.4.4 Pelletierungs-Praxisversuch bei Amandus Kahl 3.4.4.1 Vorversuch zur Ermittlung optimierter Maschineneinstellungen 3.4.4.2 Hauptversuch (Produktion von Mischpellets) 3.4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Miscanthus-Mischpelletproduktion	- Aschegehalt - N-, S- u. Cl-Gehalt - Brennwert und DT - DT - Aschegehalt - spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität - spez. Energiebedarf - Durchsatz - physik. Pelletqualität - spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität - Gewinn - interner Zinsfuß

3.1 Versuche zur Eignung von *Miscanthus x giganteus* als Pelletrohstoff

Um die erste Arbeitshypothese auf ihre Relevanz hin zu überprüfen, wurden von verschiedenen *Miscanthus x giganteus*-Typen, welche sich in Erntejahr, Standort, Bestandsalter und Genotyp unterschieden, die verbrennungstechnisch relevante Eigenschaften bestimmt. Des Weiteren wurden exemplarisch mit einem ausgewählten Typ Pelletierungsversuche durchgeführt, die das Pelletierungsverhalten von *Miscanthus* unter verschiedenen Bedingungen aufzeigen.

3.1.1 Brennstoffeigenschaften

Als brennstofftechnischer Qualitätsparameter wurde primär der Aschegehalt festgelegt. Die Aschegehaltsbestimmung erfolgte in mindestens vierfacher Wiederholung nach der DIN_EN 14775 in einem Muffelofen der Firma Nabertherm. Ebenfalls wie bei allen in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Analysen erfolgte auch die Probennahme und Herstellung für die Aschegehalts-Analyse nach DIN_EN 14778-1.

Neben verschiedenen Versuchsflächen mit unterschiedlichen Biomassearten verfügt der Campus Klein-Altendorf über eine Versuchsfläche, auf welcher drei verschiedene *M. x g* -Herkünfte (17, 34 bzw. 34 CKA und 35) angepflanzt wurden. Die *M. x g*-Herkünfte 17, 34 und 35 wurden seit dem Frühjahr 2008 in einem kleinparzelligen Sortenversuch, mit einer Parzellengröße von 5 m x 8 m angebaut. Die Anlage des Sortenversuches erfolgte mit Rhizomballen, die aus einem etablierten Versuchsbestand stammten. Die zweite Versuchsfläche von *Miscanthus* mit der Bezeichnung "34 CKA", welcher dem Typ 34 entspricht, wurde ebenfalls 2008 mit einzelnen Rhizomstücken angelegt. Die Fläche dieses Bestands betrug ca. 0,3 ha.

Zum einen wurden die Biomassen verschiedener Typen aus den Ernten 2010, 2011 und 2012 auf den Aschegehalt hin untersucht.

Zum anderen wurde *Miscanthus* des Typs 34 von zwei weiteren Feldern aus Kenn bei Trier in die Untersuchungen mit einbezogen. Diese Biomassen, die ebenfalls 2011 geerntet wurden, sind im Weiteren mit "34 Kenn" abgekürzt. Diese zwei Felder, die auf dem gleichen Standort angelegt wurden, unterschieden sich lediglich im Bestandsalter. Die Bestände waren drei und acht Jahre alt. Des Weiteren wurde im April 2012 von einem Bestand, der auf dem Dikopshof (DKH) nahe Wesseling liegt, der Aschegehalt analysiert. Diese Parzelle war 19 Jahre (34 DKH 19 J.) alt. Tabelle 5 fasst die wichtigsten Unterschiede der untersuchten *M. x g*-Typen zusammen.

Tabelle 5: Herkunft, Standort, Pflanzjahr und Erntejahre der untersuchten *Miscanthus x giganteus*-Typen

Typ	Herkunft	Standort	Pflanzjahr	Erntejahre
34 CKA	34	Klein- Altendorf	2008	2010, 2011, 2012
17	17	Klein- Altendorf	2008	2010, 2011, 2012*
34	34	Klein- Altendorf	2008	2010, 2011, 2012*
35	35	Klein- Altendorf	2008	2010, 2011, 2012*
34 Kenn 3. J.	34	Kenn / Mosel	2008	2011
34 Kenn 8. J.	34	Kenn / Mosel	2003	2011
34 DKH 19. J.	34	Dikopshof	1993	2012
* Daten von SUSSYK (2012)				

Im nächsten Schritt wurden von vier ausgewählten Typen mit dem tendenziell niedrigsten Aschegehalt (17 (Ernte 2010 und 2011), 34 CKA (Ernte 2010) und 34 Kenn 8. J.) der Brennwert, N-, S- und Cl-Gehalt durch das Labor von Thyssen Krupp (Labor I) bestimmt.

Die Analysen erfolgten in zweifacher Wiederholung nach den DIN Normen DIN 51719 (Asche), DIN 51724 (Stickstoff und Schwefel), DIN 51727 (Chlor) und DIN 51900 (Brennwert).

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurde in Labor II der RWE Power AG nach DIN_CEN/TS 15370-1 in zweifacher Wiederholung, mittels Leitzschem Erhitzungsmikroskop (LEM), die Ascheerweichungstemperatur des *Miscanthus*-Types 34 Kenn 8. J. bestimmt.

3.1.2 Tastversuche zur Pelletierung von *Miscanthus*-Mischpellets

In einer ersten Reihe von Pelletierungsversuchen sollte untersucht werden, ob *Miscanthus* aus prozesstechnologischer Sicht ein geeigneter Rohstoff für die Pelletproduktion ist und in wie weit die Faktoren Materialfeuchte, Presskanallänge und Durchsatzmasse die Pelletierung von *Miscanthus* beeinflussen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Gemische aus *Miscanthus* und Fichte bzw. Paulownia pelletiert, und zwar in vierfacher Wiederholung mit einer Laborpelletpresse vom Typ 14-175 der Firma Amandus Kahl mit einer Nennleistung von 3,3 kW. Während der Versuche wurden Leistungs- und spezifischer Energiebedarf des Pressvorganges bestimmt und die physikalische Qualität der Pellets analysiert.

Während dieser Versuche wurde die Durchsatzmasse (m) durch Abdrehen der Materialzufuhrschnecke nach Formel 1 bestimmt.

(1)

$$m: = m * t^{-1}$$

Dabei gilt:

$$m: = \text{Durchsatzmasse [kg h}^{-1}\text{]}$$

$$m = \text{Versuchsmasse [kg]}$$

$$t = \text{Zeit [h]}$$

3.1.2.1 Leistungsbedarf und spezifischer Energiebedarf

Während der Pelletierungsversuche wurde der Leistungsbedarf mit einem Datenlogger 1735 der Firma Fluke aufgezeichnet. Dieser Datenlogger war an den Stromkreis der Pelletpresse angeschlossen und mit einem Notebook verbunden, sodass der Leistungsbedarf direkt in digitaler Form abgelesen werden konnte.

Zusätzlich erfasste der Datenlogger den Energiebedarf des Pelletiervorgangs. Aus den Werten des Energiebedarfes (E_m) der einzelnen Wiederholungen wurde anschließend der Mittelwert gebildet, welcher wiederum nach Formel 2 auf den spezifischen Energiebedarf (E_{spez}) für die Pelletierung von 1 t Rohmaterial in kWh t⁻¹ umgerechnet wurde.

(2)

$$E_{spez} = E_m * m^{-1} * 1000$$

Dabei gilt:

$$E_{spez} = \text{spezifischer Energiebedarf [kWh t}^{-1}\text{]}$$

$$E_m = \text{Energiebedarf pro Versuchsmasse [kWh]}$$

$$m = \text{Versuchsmasse [kg]}$$

3.1.2.2 Physikalische Pelletqualität

Die physikalische Pelletqualität wurde anhand der visuellen Qualität [Note 1 – 6], der Abriebfestigkeit Abrieb [M.-%] und der Schüttdichte [kg m⁻³] bestimmt.

Die visuelle Qualität ist eine subjektive Art, die frisch erzeugten Pellets (unmittelbar nach Austritt aus der Pelletieranlage) zu beschreiben und wurde primär dafür genutzt, um bei gleichbleibenden Biomassearten bzw. Mischungsverhältnissen die optimalen Pelletpressen-Einstellungen zu ermitteln.

Diese visuelle Begutachtung erfolgte anhand des sichtbaren Feinanteils, welcher neben den Pellets aus der Pelletanlage anfiel, der Längenverteilung (einheitliche oder uneinheitliche Pelletlängen) und der Form (gebogen, aufgequollen oder zylindrisch). Zusätzlich dazu war

die Oberflächenstruktur ein wichtiges Merkmal. Diese visuell erkennbaren Qualitätskriterien ermöglichten es, dass erste Schlüsse zur allgemeinen physikalischen Qualität getroffen werden konnten. Anhand dieser ersten Qualitätsbeurteilung konnten noch während der laufenden Versuche Maschineneinstellungen verändert werden.

Ziel der visuellen Qualitätskontrolle war eine zylindrisch einheitliche Form der Pellets (25 – 35 mm Länge) und die Minimierung des Feinanteils während des Prozessschrittes der Pelletierung zu erreichen. Die Bewertung der Pelletierfähigkeit nach diesen Kriterien wurde in Noten von 1 - 6 dokumentiert (siehe Abb. 11), wobei 1 die beste Note darstellt. Die folgende Abbildung zeigt Beispielpellets für alle sechs verschiedenen Qualitätsnoten.

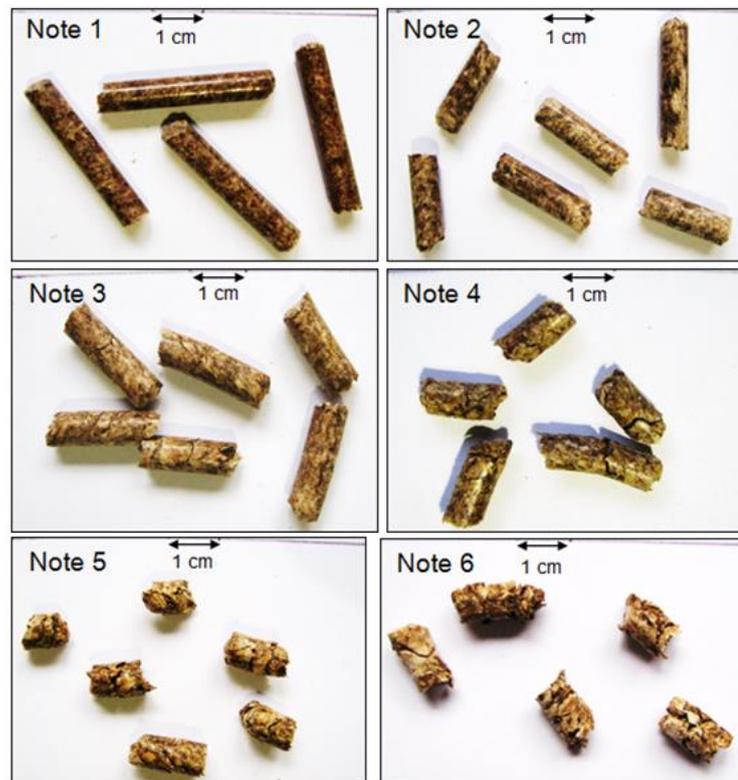


Abbildung 11: Beispielpellets für die unterschiedlichen Noten der visuellen Pelletqualität

Weitergehend beschreibt Tabelle A4 (siehe Anhang) die Eigenschaften der unterschiedlich benoteten Pellets.

Nach dem Abkühlen der Pellets wurde im Labor der FH Köln die physikalische Qualität untersucht. Die Bestimmung der Abriebfestigkeit [M.-%] erfolgte in mindestens vierfacher Wiederholung nach der DIN_EN 15210-1 mit dem in Abb. 12 dargestellten Prüfgerät.

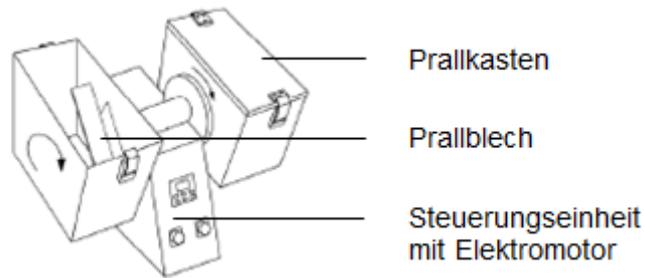


Abbildung 12: Prüfgerät für Pellettrieb (nach DIN_EN_15210-1)

Die Bestimmung der Schüttdichte der Pellets, die in kg m^{-3} angegeben wird, erfolgte ebenfalls in mindestens vierfacher Wiederholung nach der DIN_EN_15103.

3.1.2.3 Wassergehalt

Das zerkleinerte Biomassegemisch wurde auf fünf verschiedene Feuchtegehalte eingestellt ehe die Wirkung seines Wassergehaltes auf die Pelletierung untersucht wurde. Die verschiedenen Varianten, die einheitlich aus 50 M.-% Miscanthus „Kenn“ (8.J.) und 50 M.-% Paulownia mit einem Tresterzuschlag von 1 M.-% bestanden, wurden unmittelbar vor der Pelletierung auf 12, 13, 14, 15 und 16 M.-% Feuchtegehalt eingestellt. Dafür wurde den Gemischen grammgenau Wasser per Spritze beigefügt und mit einem handelsüblichen Betonmischer (20 l) verteilt. Die Pelletierung aller Varianten erfolgte unter gleichen Bedingungen mit einer 6 mm Lochmatrize, die einen Presskanal von 32 mm hatte. Dabei wurde die Kollerdrehzahl auf 110 U min^{-1} und der Durchsatz auf $26,7 \text{ kg h}^{-1}$ eingestellt. Während des Pelletierens der fünf Varianten, welche in vierfacher Wiederholung erfolgte, wurden mittels Fluke-Datenlogger die Leistung und der Energiebedarf erfasst. Anschließend wurde der spezifische Energiebedarf nach der in Kapitel 3.1.2.1 beschriebenen Methode bestimmt. Des Weiteren wurde die Matrizentemperatur an der digitalen Anzeige abgelesen. Zusätzlich zu den Varianten aus dem *M. x g.*- und *P. t.*- Gemisch wurde ein Gemisch aus Miscanthus und Fichte mit einem Zuschlag von 1% Traubentrester unter den oben genannten Bedingungen pelletiert.

Dabei sollte am Beispiel eines Feuchtegehaltes von 14 bzw. 15 M.-% überprüft werden, ob die Ergebnisse des Versuches mit dem *M. x g.*- und *P. t.*-Gemisch auch auf andere Biomassegemische übertragbar sind. Der Durchsatz wurde bei diesem Versuch an die maximale Nennleistung des Elektromotors von 3,3 kW angepasst und betrug bei der Variante mit 14 M.-% H_2O $24,3 \text{ kg h}^{-1}$ und bei der Variante mit 15 M.-% H_2O $30,2 \text{ kg h}^{-1}$.

Die Untersuchungsparameter waren die gleichen wie bei dem Gemisch aus *M. x g.* und *P. tomentosa*.

3.1.2.4 Presskanallänge

Für die Versuche zur Untersuchung der Wirkung der Presskanallängen wurde ein Biomassegemisch aus 50 M.-% Fichte, 50 M.-% Miscanthus und einem Tresterzuschlag von 1 M.-% pelletiert. Der Wassergehalt dieses Gemisches betrug 14 M.-%. Wie in allen Pelletierungsversuchen wurden zwei Matrizen mit einem Lochdurchmesser von 6 mm eingesetzt, die verschiedene Presskanallängen aufwiesen. Die eine Matrize hatte eine Presskanallänge von 27 mm und die andere 32 mm. Somit betrug das Presskanalverhältnis 1 : 4,5 bzw. 1 : 5,3.

Die Kollerzahl wurde auf 110 U min^{-1} eingestellt und die Durchsatzmassen betragen $26,5 \text{ kg h}^{-1}$ (27 mm) bzw. $24,3 \text{ kg h}^{-1}$ (32 mm).

Ebenso wie in Kapitel 3.1.2.3 wurden Leistungs-, bzw. spezifischer Energiebedarf sowie Temperatur erfasst und nachfolgend Abriebfestigkeit sowie Schüttdichte bestimmt.

3.1.2.5 Durchsatzmasse

Der folgende Versuch sollte den Einfluss der Durchsatzmasse, die durch den Antriebsmotor der Pelletpresse limitiert wird, auf die Qualität der Pelletierung untersuchen. Für diesen Versuch wurde das gleiche Biomassegemisch wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, verwendet. Ebenso wurden, wie in den vorherigen Versuchen, die gleichen Maschineneinstellungen vorgenommen, wobei die 6 mm Lochmatrize mit einer Presskanallänge von 32 mm eingesetzt war. Als Variable wurde die Durchsatzmasse von 20,7 über 26,7 auf $36,3 \text{ kg h}^{-1}$ erhöht. Die Analyseparameter entsprachen dem vorangegangenen Versuch.

3.2 Eignung von *Paulownia tomentosa* als KUP-Kultur

In dem folgenden Abschnitt soll überprüft werden, ob *Paulownia tomentosa* aufgrund des Ertrages, der Brennstoff- und der Pelletierungseigenschaften ein geeigneter Rohstoff für die Miscanthus Mischpelletproduktion ist.

3.2.1 Vergleichende Ertragserfassung

Zur Erfassung des Ertrages von *Paulownia* als KUP- Kultur wurde 2008 auf dem Campus Klein-Altendorf ein auf mindestens 15 Jahre angelegter Langzeitversuch mit 100 *Paulownia tomentosa*-Individuen in zwei Parzellen angepflanzt. Als Referenzkultur wurden dazu - im Rahmen des Verbundprojektes ProLoc I - jeweils vier Parzellen mit der Pappelsorte "Max 1" und der Weidensorte "Inger" bepflanzt. Sowohl die *Paulownia*-, als auch die Pappel- bzw. Weiden-Parzellen waren in Rand- und Kernparzellen unterteilt.

Mit Ausnahme der Pflanzdichte, die bei *Paulownia* 5.000 Individuen ha⁻¹ und bei den Pappeln und Weiden 11.111 Individuen ha⁻¹ betrug, unterschied sich die Kulturführung nicht.

Vor der Ernte wurden im Rahmen der Ertragsschätzung per Zählung die Überlebensraten der verschiedenen Arten bzw. Sorten aufgenommen. Die Ernte der dreijährigen Bäume erfolgte im Winter 2010 / 2011.

Zur Bestimmung des Ertrages von *Paulownia*, die der von RÖHLE (2009) beschriebenen Stockerntemethode gleich, wurden aus den Kernbereichen der beiden Parzellen alle 54 Individuen entnommen und deren Biomasse (IBM) einzeln gewogen. Anschließend wurden die Triebe gehäckselt und deren Trockenmassegehalt nach DIN_EN 14774-1 bestimmt. Mit Hilfe der Formel 3 (nach RÖHLE, 2009) konnte der durchschnittliche jährliche Gesamtwuchs (dGZ_a) von *Paulownia tomentosa* errechnet werden.

$$dGZ_a = IBM * PP * ha^{-1} * \ddot{U}R * TM * a^{-1} \quad (3)$$

Dabei gilt:

dGZ_a = durchschnittliche jährliche Gesamtwuchs [t * ha⁻¹ a⁻¹(TM)]

IBM = Biomasse des Individuums [t]

PP = Anzahl der Pflanzplätze

$\ddot{U}R$ = Überlebensrate [%]

TM = Gehalt Trockenmasse [%]

a = Anzahl der Vegetationsjahre seit der letzten Ernte

Die Schätzung des dGZ_a der Pappel- und Weidensorten erfolgte mittels der Regressionsmethode nach (RÖHLE, 2009). Diese Ertragsschätzung wurde pro Sorte an 196 Individuen aller vier Kernparzellen durchgeführt. Dabei konnte mittels einer zuvor erstellten

Biomassefunktion den gemessenen Bruthöhendurchmessern jedes gemessenen Triebes eine Triebbiomasse (TBM) zugeordnet werden. Zusätzlich wurden sortenspezifisch die Überlebensrate und die durchschnittliche Anzahl der Triebe aufgenommen. Auf Grundlage dieser Daten wurde nach Formel 4 (nach RÖHLE, 2009) der durchschnittliche jährliche Gesamtzuwachs der Pappel- und Weidensorte bestimmt.

$$dGZ_a = TBM * TZ * PP * ha^{-1} * \ddot{U}R * TM * a^{-1} \quad (4)$$

Dabei gilt:

dGZ_a = durchschnittliche jährliche Gesamtzuwachs [$t * ha^{-1} a^{-1}(TM)$]

TBM = Triebbiomasse [t]

TZ = durchschnittliche Anzahl der Triebe

PP = Anzahl der Pflanzplätze

$\ddot{U}R$ = Überlebensrate [%]

TM = Gehalt Trockenmasse [%]

a = Anzahl der Vegetationsjahre seit der letzten Ernte

Neben dem Langzeitversuch wurde 2008 auf dem Campus Klein-Altendorf eine Zusatzparzelle mit 40 weiteren *P. tomentosa* bepflanzt. Im Gegensatz zu dem Langzeitversuch war die Pflanzdichte doppelt so hoch und betrug 10.000 Pflanzen ha^{-1} . Die Zusatzparzelle wurde innerhalb der ersten 5 Bestandsjahre dreimal in Form einer Vollernte beerntet (nach 2., 3. und 5. Vegetationsjahr), um den jährlichen Biomassezuwachs genauer untersuchen zu können. Dabei wurden alle Triebe der Parzelle abgeschnitten und mit einem Hacker in ein Bigbag gehäckselt, welches im Anschluss verwogen wurde. Um später den Trockenmasseertrag bestimmen zu können, wurde von repräsentativ entnommenen Proben der Trockenmassegehalt des Hackgutes bestimmt. Anschließend erfolgte nach Formel 5 die Berechnung des dGZ_a .

Zusätzlich zu den Ertragsschätzungen auf der Fläche Klein-Altendorf wurde im Winter 2011/2012 ein *Paulownia tomentosa*-Bestand in der Nähe von Stade beerntet. Dieser Bestand, der in zwei Parzellen mit unterschiedlichen Pflanzdichten unterteilt war (1.111 und 4.444 Pflanzen ha^{-1}), war ebenfalls 2008 angelegt worden. Jede Parzelle umfasste mindestens 100 Individuen.

Die Ertragsschätzung, die den Einfluss der Bestandsdichte auf die Wuchsleistung von *Paulownia* untersuchen sollte, erfolgte ebenfalls per Vollernte und unter Zuhilfenahme der Formel 5 (nach RÖHLE, 2009).

$$dGZ_a = m_E * ha^{-1} * TM * a^{-1} \quad (5)$$

Dabei gilt:

dGZ_a = durchschnittliche jährliche Gesamtzuwachs [$t * ha^{-1} a^{-1}(TM)$]

m_E = Erntemasse [t]

TM = Gehalt Trockenmasse [%]

a = Anzahl der Vegetationsjahre seit der letzten Ernte

3.2.2 Brennstoffeigenschaften

Zuerst wurde analog zu der Vorgehensweise aus Kapitel 3.1. der Aschegehalt von *Paulownia tomentosa* bestimmt. Das Paulownia-Holz stammte dabei vom Campus Klein-Altendorf aus dem Erntejahr 2010 / 2011. Zusätzlich zu Paulownia wurde ebenfalls von *Reynoutria bohemica*, Robinien- (mit und ohne Rinde), Fichten- (mit Rinde), Pappel- und Weidenhack-schnitzeln der Aschegehalt bestimmt.

Von Paulownia wurden Brennwert, N-, S-, Cl-Gehalt und Ascheerweichungstemperatur bestimmt. Diese Analysen wurden zum einen durch das Labor der RWE Power AG (Labor II) nach der DIN_EN 14775 (Aschegehalt), der DIN CEN/TS 15104-N (Stickstoffgehalt) und der DIN EN/TS 15289 (Chlor- und Schwefelgehalt) in dreifacher Wiederholung durchgeführt. Weiterführend wurde die gleiche Biomasse aus der gleichen Stichprobe, die nach DIN_EN 14778 entnommen wurden, durch das Labor von Thyssen Krupp (Labor I) analysiert.

Ebenso wie bei *Miscanthus x giganteus* (siehe Kapitel 3.1.1) wurde von *Paulownia tomentosa* die Ascheerweichungstemperatur in zweifacher Wiederholung bestimmt.

3.2.3 Pelletierbarkeit

Nach der Analyse der Brennstoffeigenschaften wurde in einem Vorversuch Paulownia sowohl in Rein- als auch in Mischform mit *Miscanthus* mittels der Laborpresse der FH Köln pelletiert. Vergleichend dazu wurden *Miscanthus*, Pappel-, Weidenholz und *Reynoutria bohemica* sowohl in Rein- als auch Mischform pelletiert. Tabelle 6 beschreibt nähergehend die unterschiedlichen Varianten.

Tabelle 6: Mischungsverhältnis und Matrizentemperatur der Versuchsvarianten zur Bestimmung der Pelletierbarkeit von Paulownia

Versuchs-Nr.	Mischkomponente		Matrizentemperatur [°C]
	Anteil [M.-%]*	Biomasse	
1	100	Paulownia	85
2	100	Miscanthus	70
3	100	Pappel	70
4	100	Weide	70
5	50 50	Paulownia Miscanthus	85
6	50 50	Pappel Miscanthus	85
7	50 50	Reynoutria Miscanthus	85
*bezogen auf Frischmasse			

Um die verschiedenen Stoffe pelletieren zu können, wurden diese mittels einer Hammermühle (12 kW) der Firma Buschhoff auf eine Partikelgröße von 5 mm zerkleinert. Vor dem Pelletieren wurde der Wassergehalt der verschiedenen Biomassen auf 15 M.-% eingestellt. Die Kollerdrehzahl der Pelletpresse betrug 110 U min^{-1} und die Durchsatzmasse variierten je nach Biomasse zwischen 25 und 35 kg h^{-1} , da die Durchsatzmasse an den konstant zu haltenden Leistungsbedarf (ca. 3 kW) angepasst wurde.

Untersuchungsparameter dieses Versuches waren die visuelle Qualität, Abriebfestigkeit und Schüttdichte.

3.3 Zerkleinerungsversuche

Anhand von ausgesuchten produktionstechnischen Merkmalen wurden die Zerkleinerungssysteme Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor auf deren Eignung für die Miscanthus-Mischpelletproduktion geprüft.

Als wichtigstes produktionstechnisches Merkmal wurde der spezifische Energiebedarf der verschiedenen Verfahren bestimmt, welcher in kWh t⁻¹ angegeben wurde und durch eigene Energiebedarfsmessungen ermittelt werden konnte.

Für die Messungen wurde einheitliches Erntegut verwendet. Dieses homogen gehäckselte Erntegut war *Miscanthus x giganteus* (Typ Kenn 8. J.) aus einem achtjährigem Bestand, der sich bei Kenn (Moseltal) befindet und 2011 geerntet wurde. Diese Biomasse besaß im Jahr 2011 eine Schüttdichte von 150 kg m⁻³, einen Feuchtegehalt von 9,6 M.-% und eine durchschnittliche geometrische Kantenlänge (L_{Kante}) von 8 mm (Bestimmung erfolgte nach ESTEBAN und CARRASCO, 2006). Durch die Lagerung dieses Miscanthus stieg der Feuchtegehalt im Jahr 2012 auf 12,6 M.-% an.

Um den Einfluss der Rohstoffwahl auf die Energiekosten der Pelletproduktion zu ermitteln, wurde Fichten- und Paulownia-Holz mittels Hammer- und Kollermühle zerkleinert, der spezifische Energiebedarf erfasst und in Vergleich zu Miscanthus gesetzt.

Die von einem Forstunternehmen aus der Eifel stammenden Fichten-Hackschnitzel hatten eine L_{Kante} von 14 mm und einen Feuchtegehalt von 11,4 M.-%. Die Fichtensägespäne stammten aus einem Sägewerk aus der Voreifel und der Feuchtegehalt wurde im Trockenschrank auf 11,6 M.-% eingestellt. Die Paulownia-Hackschnitzel, die eine L_{Kante} von 18 mm hatten, stammten von der Kurzumtriebsplantage in Klein-Altendorf (Ernte 2010) und wurden auf 9,2 M.-% Feuchte getrocknet. Für die weiteren Versuche wurden die Fichten-Hackschnitzel und ein Teil der Paulownia-Hackschnitzel mit einem Gartenhäcksler auf eine L_{Kante} von 14 mm weiter zerkleinert.

Tabelle 7 zeigt von welchem Rohstoff und mit welchen Verfahren der spezifische Energiebedarf im Prozessschritt der Zerkleinerung ermittelt wurde.

Neben dem Vergleich des Energieaufwandes für den Prozessschritt der Zerkleinerung wurden die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren auf deren weiterführende produktionstechnische Eignung hin untersucht. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stand neben der Energiebedarfserfassung des Prozessschrittes der Pelletierung die physikalische

Tabelle 7: Auswahl der Rohstoffe und Zerkleinerungsverfahren für die Erfassung des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung

Zerkleinerungsverfahren	Biomasse	Form	L_{Kante} [mm]	Feuchtegehalt [M.-%]
Hammermühle	Miscanthus	Häcksel	8	9,6 bzw. 12,6
	Paulownia	Hackschnitzel	18	9,2
	Paulownia	Hackschnitzel	14	9,2
	Fichte	Hackschnitzel	14	11,4
	Fichte	Späne	< 14	11,6
Kollermühle	Miscanthus	Häcksel	8	9,6 bzw. 12,6
	Paulownia	Hackschnitzel	14	9,2
Zerfaserung	Miscanthus	Häcksel	8	9,6 bzw. 12,6
	Fichte	Hackschnitzel	14	11,4
Prallreaktor	Miscanthus	Häcksel	8	12,6

Pelletqualität, der mittels unterschiedlicher Verfahren zerkleinerten pelletierten Biomasse. Für die dafür notwendigen Pelletierungsversuche wurde das aus den Zerkleinerungsversuchen stammende Miscanthus-Material genutzt.

3.3.1 Energiebedarf

Aufgrund unterschiedlicher Maschinengrößen und örtlicher Gegebenheiten konnten die Versuche zur Ermittlung des Energiebedarfes der unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren nicht nach einem einheitlichen Versuchsdesign durchgeführt werden.

Mit Ausnahme des ersten Zerkleinerungsversuches an der Kollermühle bei der Firma Amandus Kahl erfolgten alle Energiebedarfsermittlungen mittels Fluke Datenlogger.

Hammermühle

Die Energiebedarfsermittlung des Zerkleinerungsverfahrens per Hammermühle wurde an einer Hammermühle der Firma Buschhoff durchgeführt. Diese Hammermühle hatte eine Nennleistung von 10 kW und war mit einem 5 mm Lochsieb bestückt. Die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfes erfolgte nach der in Kapitel 3.1.2.1 beschriebenen Methode. Der gleiche Versuch wurde ein Jahr später mit dem gleichen Miscanthus, dessen Wassergehalt durch die Lagerung auf 12,6 M.-% angestiegen war, in vierfacher Wiederholung durchgeführt.

Neben den Zerkleinerungsversuchen mit Miscanthus wurde, wie aus Tabelle 7 ersichtlich, der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia und Fichte untersucht. Die Versuche wurden mit Ausnahme der Fichtenspäne in mindestens vierfacher Wiederholung durchgeführt, wobei die Versuchsmassen je nach Biomasseart und -größe variierten.

Zerfaserung

Für die Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung des Miscanthus-Erntematerials standen zwei Maschinen zur Verfügung, die nach dem Prinzip der Zerfaserung arbeiteten.

Beide Maschinen sind von der Fachhochschule Köln entwickelte Prototypen. Diese unterschieden sich in Dimension und Bauweise deutlich voneinander. Beide Prototypen waren einheitlich mit 5 mm Lochsieben bestückt. Der kleinere Prototyp (Zerfaserung 22/600) verfügte über einen Elektromotor mit einer Nennleistung von 22 kW und einen Trommelinnendurchmesser von 600 mm. Der größere Prototyp (Zerfaserung 45/1500) war an einen Elektromotor mit einer Nennleistung von 45 kW angeschlossen und hatte einen Innendurchmesser von 1.500 mm.

Die Ermittlung des Energiebedarfes erfolgte 2011 an beiden Prototypen in einfacher Wiederholung analog zu Kapitel 3.1.2.1. Die Ergebnisse der Energiebedarfsmengen wurden ebenfalls in den spezifischen Energiebedarf umgerechnet, sodass diese mit den anderen Zerkleinerungsverfahren vergleichbar wurden. Der Versuch wurde 2012 an der Zerfaserung vom Typ 22/600 in vierfacher Wiederholung nochmals durchgeführt.

Vergleichend zu Miscanthus wurde versucht, Fichten-Holz mittels der Zerfaserung vom Typ 22/600 zu zerkleinern.

Kollermühle

Um das Verfahren zur Biomassezerkleinerung der Kollermühle entwickelt von der Firma Amandus Kahl, zu untersuchen, wurden in deren Technikum in Reinbek zwei Versuche zur Energiebedarfsermittlung durchgeführt. Der erste Versuch fand im Jahr 2011 und der zweite Versuch im Jahr 2012 statt.

Versuchsreihe zur Identifikation optimaler Maschineneinstellungen (Versuch 2011)

Da während des ersten Versuches (2011) an die für die Zerkleinerungsversuche modifizierte Pelletpresse keine digitale Messtechnik angeschlossen werden konnte, musste durch diese Versuche die optimale Maschineneinstellung identifiziert werden. Im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Systemen besitzt die Kollermühle weitreichende flexibel veränderbare Einstellungen, die durch verschiedenste Maschinenparameter beeinflusst werden können.

Im Rahmen dieser ersten Versuchsreihe, die an einer Pelletpresse vom Typ Amandus Kahl 33/390 stattfand, wurde ein Schwerpunkt auf die Wahl der geeigneten Lochmatrize gelegt. Die Pelletpresse war mit einem 30 kW Elektromotor ausgestattet. Detaillierte Maschineneinstellungen, die in dieser Versuchsreihe vorgenommen wurden, sind in Tabelle A 2 im Anhang beschrieben.

Tabelle 8: Auswahl der Lochmatrizen, die während der ersten Versuchsreihe mit der Kollermühle (Typ 33/390) genutzt wurden

Lochdurchmesser [mm]	Presskanalverhältnis ($D_{\text{Loch}} : L_{\text{Presskanal}}$)
10	1 : 2
8	1 : 2
8	1 : 1
6	1 : 1
4	1 : 1

Im Verlauf der Versuchsreihe wurden, wie in Tabelle 8 dargestellt, Lochmatrizen unterschiedlicher Lochdurchmesser (D_{Loch}) und Presskanalverhältnisse verwendet, um zu überprüfen, welche dieser Matrizen das beste Zerkleinerungsverhalten ergibt. Die eingesetzten Lochmatrizen hatten einen Matrizendurchmesser von 390 mm und die Teilversuche unterschieden sich nur anhand der Lochdurchmesser und der Presskanalverhältnisse. Alle anderen Maschineneinstellungen wurden konstant gehalten.

Wie beschrieben konnte der Energiebedarf der Zerkleinerung nicht digital gemessen werden. Dennoch wurde anhand des eingebauten analogen Leistungsanzeigers der Leistungsbedarf der verschiedenen Teilversuche ermittelt. Zusätzlich zu der händischen Aufzeichnung des Leistungsbedarfes wurde die Zeit aufgenommen, die während des jeweiligen Teilversuches benötigt wurde, um eine definierte Masse an Miscanthus-Material zu zerkleinern.

Mit Hilfe der Leistungsbedarfsdaten und dem Massendurchsatz pro Zeit konnte nach Formel 2 der spezifische Energiebedarf für die verschiedenen Versuchsvarianten ermittelt werden.

Um nach der Energiebedarfsmessung des Zerkleinerungsprozesses mittels Kollermühle nähere Aussagen zur Eignung der unterschiedlichen Matrizenlochdurchmesser zu treffen, wurden die drei Produktvarianten unter gleichbleibenden Bedingungen pelletiert.

Die Hauptvariable in diesem Versuch war der Lochdurchmesser der Matrizen, die während des Zerkleinerungsversuches in der Kollermühle eingesetzt wurden. Die drei Versuchsvarianten waren 6, 8 und 10 mm Lochdurchmesser. Mit Ausnahme der zerkleinerten Miscanthus-Biomasse der Variante 10 mm (1 : 2), bei der das Presskanalverhältnis an den Lochdurchmesser angepasst werden musste, wurden die Zerkleinerungsprodukte aus den Versuchen mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 gewählt.

Der Pelletierungsversuch erfolgte an der Pelletpresse der FH Köln mit einem Gemisch von 50 M.-% Fichte, 50 M.-% Miscanthus und einem Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester.

Der Fichtenanteil mit einem Wassergehalt von 12 M.-% bestand aus Hackschnitzeln, die mittels Hammermühle zerkleinert wurden. Der Feuchtegehalt der Gemische betrug 14% und es wurde bei 100°C Matrizentemperatur mit einer Kollerdrehzahl von 110 U min⁻¹ pelletiert.

Für die Energiebedarfsmessungen der drei Varianten, die in vierfacher Wiederholung mit einem Materialdurchsatz von 20 kg h^{-1} erfolgte, wurde der Fluke Datenlogger an den Stromkreis der Pelletpresse angeschlossen. Mit Hilfe der gewonnenen Daten des Energiebedarfs konnte nach Formel 2 der spezifische Energiebedarf ermittelt werden.

Im Anschluss an diesen Pelletierungsversuch wurden die Schüttdichte und der Abrieb der drei Pelletvarianten untersucht.

Versuchsreihe zur Ermittlung des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus und Paulownia unter optimierten Bedingungen (Versuch 2012)

Um die Ergebnisse der Versuche aus dem Jahr 2011 unter optimierten Bedingungen zu verifizieren, wurde im Jahr 2012 ein weiterer Versuch mit der Pelletpresse vom Typ 33/390 bei der Firma Amandus Kahl durchgeführt. Zusätzlich zu den Zerkleinerungsversuchen mit Miscanthus wurde der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle untersucht.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Fluke Datenlogger an die Pelletpresse angeschlossen, sodass der spezifische Energiebedarf digital erfasst werden konnte (siehe Kap.3.1.2.1). Bei allen Teilversuchen wurden die in Tabelle A5 (siehe Anhang) unter Versuchsnummer 4 aufgelisteten Maschineneinstellungen übernommen.

Während dieses Versuches wurden Miscanthus und Paulownia (siehe Tabelle 8) zerkleinert, wobei sich die Teilversuche durch Materialart, Durchsatzmasse und Wasserzusatz unterschieden. Tabelle A6 im Anhang zeigt die verschiedenen Versuchsvarianten der Teilversuche.

Prallreaktor

Die Energiebedarfsermittlung am Prallreaktor fand bei der Firma Schäfer in Rüssingen statt. Der Prallreaktor wurde über einen Elektromotor mit einer Antriebsleistung von 18 kW angetrieben. Im Verlauf des Versuchstages wurden verschiedene Veränderungen an der Maschine durchgeführt. Detaillierte Versuchsparameter und Maschineneinstellungen sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Die einzelnen Versuche wurden ohne Wiederholungen durchgeführt. Lediglich die Versuchsvariante Nr. 2 erfolgte, mit jeweils 50 kg, in vierfacher Wiederholung.

Um den spezifischen Energiebedarf zu ermitteln, wurde wie schon in Kapitel 3.1.3 beschrieben, der Flux Datenlogger an den Stromkreis des Prallreaktors angeschlossen.

Die Materialmasse wurde vor dem jeweiligen Versuch gewogen, sodass anhand der gewonnenen Energiebedarfsdaten nach Formel 2 der spezifische Energiebedarf berechnet werden konnte.

Tabelle 9: Versuchsparameter und Maschineneinstellungen des Versuchs zur Energiebedarfs-
ermittlung des Prallreaktors

Versuchs- Nr.	Versuchs- masse [kg]	Sieb		Prallfläche [cm ²]	Drehzahl [U min ⁻¹]
		D _{Loch} [mm]	Fläche [cm ²]		
1	87	5	400	192	3.000
2	200	5 und 6	800	192	3.000
3	12	5 und 6	800	384	3.000
4	90	5 und 6	800	384	1.800

3.3.2 Pelletierungseigenschaften von Miscanthus in Abhängigkeit des Zerkleinerungs- verfahrens

Die Beurteilung der Pelletierungseigenschaften erfolgte anhand von zwei Kriterien. Zum einen wurde der Energiebedarf der Pelletierung der auf verschiedene Art zerkleinerten Materialien als ein Qualitätsmerkmal festgelegt. Zum anderen wurden die physikalischen Pelleteigenschaften (Schüttdichte und Abrieb) als weiteres Merkmal untersucht.

3.3.2.1 Korngrößenverteilung

Vor den Pelletierungsversuchen, die Aufschluss über die produktionstechnische Eignung der verschiedenen Zerkleinerungsverfahren geben sollten, wurde nach den Zerkleinerungsversuchen - nach Verfahren getrennt - eine Siebkennlinie des pelletierfähigen Miscanthus-Materials erstellt. Die Analyse der Korngrößenverteilung erfolgte mit einem Rüttelsieb der Firma Fritsch vom Typ „Analysette 3 Pro“. Jede Zerkleinerungsvariante wurde in sechsfacher Wiederholung untersucht.

Jede Siebung dauerte 1 Minute und es wurden pro Wiederholung 100 g zerkleinertes Material zugesetzt. Die maximale Amplitude des Rüttelsiebes war auf einen Millimeter eingestellt. Als Siebdurchmesser wurden 8, 5, 2 und 1 mm gewählt.

Um weiterführend zu untersuchen, welchen Einfluss die Korngrößenfraktion des Zerkleinerungsproduktes auf die Qualität der Mischpellets hat, wurden in einer Versuchsreihe analog zu Kapitel 3.3.2.2 Miscanthus-Fichten-Gemische pelletiert. Im Gegensatz zu dem vorherigen Versuch wurden nur die drei Varianten Hammermühle, Zerfaserung und Kollermühle untersucht, wobei der Miscanthusanteil über alle Varianten hinweg ein definiertes Korngrößenverhältnis hatte. Die Korngrößenverteilung setzte sich bei allen Varianten aus 80 M.-% von 5 – 2 mm, 5 M.-% 2 – 1 mm und 15 M.-% <1 mm zusammen.

Die drei unterschiedlichen Miscanthus-Zerkleinerungsprodukte wurden mittels einer Getreidereinigung für Versuchsmaßstäbe auf die drei verschiedenen Größenklassen kalibriert. Für diesen Zweck wurden in der Getreidereinigung Lochsiebe, mit Durchmessern von fünf, zwei und einem Millimeter eingesetzt.

Die Pellets der drei verschiedenen Versuchsvarianten wurden ebenfalls auf deren Abriebfestigkeit und Schüttdichte hin analysiert.

3.3.2.2 Energiebedarf

Um den Energiebedarf in Abhängigkeit des gewählten Zerkleinerungsverfahrens für den Pelletierungsvorgang zu messen, wurde jeweils für die Variante Hammermühle, Zerfaserung und Kollermühle ein Gemisch aus 50 M.-% Miscanthus und 50 M.-% Fichte hergestellt.

Das Fichten-Holz, welches einen Wassergehalt von 12 M.-% aufwies, wurde bei allen Varianten mittels der Hammermühle zerkleinert. Das Miscanthus-Material stammte aus den in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Zerkleinerungsversuchen.

Zusätzlich zu den Hauptkomponenten wurde 1% Traubentrester beigemischt und das Gemisch auf 15 M.-% Feuchte eingestellt.

Danach wurden jeweils 4 kg Material in dreifacher Wiederholung bei einer Matrizentemperatur von 110°C und einer Kollerdrehzahl von 110 U min⁻¹ pelletiert. Die Presskanallänge der 6 mm Lochmatrize betrug 27 mm. Während des Pelletierungsversuches wurde mittels Fluke Datenlogger der Energiebedarf erfasst.

Im Anschluss an die Versuche zur Energiebedarfsermittlung wurden die Pelletvarianten auf deren Abriebfestigkeit und Schüttdichte nach der in Kapitel 3.1.2.2 beschriebenen Methode untersucht.

3.4 Qualität und Produktion der Miscanthus-Paulownia-Mischpellets

Um abschließend die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion umfassend bewerten zu können, wurde neben den Brennstoff- und Pelletierungseigenschaften sowie der Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion auch überprüft, ob Additive die Pelletproduktion optimieren können.

3.4.1 Brennstoffeigenschaften

Analog zu der Vorgehensweise der Brennstoffanalysen der Mischungspartner Miscanthus und Paulownia, wurden die verbrennungstechnischen Eigenschaften der Mischpellets untersucht. Dabei wurden Aschegehalt, Brennwert, N-, S- und Cl-Gehalt durch das Labor I (Thyssen Krupp) bestimmt. Des Weiteren wurde in Labor II (RWE Power AG) mittels Leitzschem Erhitzungsmikroskop die Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets in dreifacher Wiederholung ermittelt.

3.4.2 Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur durch Kaolin

Durch einen Zuschlag von Kaolin (Ka) in verschiedenen Masseanteilen zu dem Gemisch aus Paulownia und Miscanthus sollte versucht werden, die Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets zu erhöhen.

Dabei wurde vor der Analyse mittels Leitzschem Erhitzungsmikroskop das Kaolin in 4 verschiedenen Gehalten (0,25, 0,5, 0,75 und 1 M.- %) dem Gemisch aus 50 M.-% Miscanthus (Typ 34 Kenn 8. J.), 50 M.-% *Paulownia tomentosa* und einem Zusatz von 1 M.-% Traubentrester zugefügt. Die Beimischung des Kaolins erfolgte auf drei verschiedene Arten.

Als erste Variante wurde dem Biomassegemisch Kaolin mittels wässriger Suspension zugegeben und danach pelletiert. Zur weiteren Untersuchung wurden die Pellets wieder auf < 1 mm zerkleinert und bei 550°C verascht (Pelletgemisch). Zum zweiten wurde dem gleichen Gemisch, welches nicht pelletiert wurde, das Kaolin in wässriger Suspension beigegeben und unter gleichen Bedingungen verascht (Brennstoffgemisch). Als dritte Variante wurde aus dem Gemisch von Paulownia, Miscanthus und Traubentrester bei 550°C Asche gewonnen, welcher im Anschluss das Kaolin beigemischt wurde (Aschegemisch). Von diesen drei Varianten wurde analog zu Kapitel 3.1.1 die Ascheerweichungstemperatur der Gemische bestimmt.

3.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe

Die Wahl geeigneter alternativer Presshilfsstoffe erfolgte in zwei Schritten. Zuerst wurden die Aschegehalte von Zuckerrübenmelasse, Traubentrester und Stärke analysiert.

Die Melasse wurde 2010 von der Grafschafter Rübenfabrik (Meckenheim) bezogen. Der Traubentrester, welcher aus getrockneten Traubenschalen und Traubenkernen bestand, stammte aus der Riesling-Ernte (2010) des Staatsweingutes Bad Kreuznach. Bei der untersuchten Stärke handelte es sich um handelsübliche Kartoffelstärke.

Für die Aschegehalts-Analyse wurden sowohl die Melasse als auch der Traubentrester mittels Retsch-Mühle auf eine Größe kleiner als ein Millimeter zerkleinert. Im Anschluss wurden die drei Additive nach DIN_EN 14775 bei 550°C verascht.

In dem zweiten Schritt der Untersuchungen zur Eignung alternativer Presshilfsstoffe wurde einem Gemisch aus Miscanthus und Paulownia (50 M.-% / 50 M.-%) mit einem Wassergehalt von 14 M.-% Feuchte, 0 M.-% bzw. 1 M.-% Traubentrester bezogen auf die Gemischmasse zugegeben. Diese beiden Varianten wurden anschließend bei einem Durchsatz von 20,7 kg h⁻¹ und einer Kollerdrehzahl von 110 U min⁻¹ pelletiert, wobei eine 6 mm Lochmatrize mit einer Presskanallänge von 32 mm eingesetzt war.

Während des Pressvorganges wurde der Leistungs- und spezifische Energiebedarf mittels Fluke Datenlogger ermittelt. Neben dem energetischen Aspekt wurden die physikalischen Pelleteigenschaften Abriebfestigkeit und Schüttdichte untersucht.

3.4.4 Pelletierungsversuch unter Praxisbedingungen

Im Juni 2012 wurde bei der Firma Amandus Kahl ein Pelletierungs-Praxisversuch durchgeführt. Für den Versuch wurde die Pelletpresse vom Typ 33/390 eingesetzt.

Im Verlauf dieses Versuches wurden vier verschiedene Biomassegemische pelletiert (siehe Tabelle 10). Ziel dieses Versuches war es, den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung der verschiedenen Gemische unter optimierten Bedingungen zu identifizieren. Als Kriterien für optimierte Bedingungen wurden eine bestmögliche physikalische Pelletqualität und ein hoher Durchsatz bei möglichst geringem spezifischen Energiebedarf festgelegt.

Tabelle 10: Zusammensetzung und Feuchtegehalt der Biomassegemische (Varianten), die im Praxisversuch pelletiert wurden

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Mischrezeptur	50 M.- % <i>M. x g.</i>			
	50 M.- % <i>P. t.</i>	50 M.- % <i>P. t.</i>	50 M.- % Fichte	50 M.- % Fichte
	+ 1 M.- % Trester			
		+ 0,3 M.- % Kaolin		+ 0,3 M.- % Kaolin
Feuchtegehalt [M.- %]	10,2	11,1	10,6	11,8

Der Miscanthusanteil der Gemische wurde per Kollermühle zerkleinert. Die Zerkleinerung der Anteile von Paulownia und Fichte erfolgte per Hammermühle. Am Vorabend vor dem Pelletierungsversuch wurden ca. 500 kg der in Tabelle 10 dargestellten Varianten per Hand gemischt. Der Traubentrester wurde trocken (≤ 1 mm) und das Kaolin zur besseren Partikelanhaftung als Wassersuspension beigemischt. Bevor die in Tabelle 10 aufgelisteten Varianten unter optimierten Bedingungen pelletiert werden konnten, wurden die Einstellungen anhand von einem Vorversuch ermittelt.

Für den Vorversuch wurden die Variante 4 mit unterschiedlichen Matrizen (verschiedene $D_{Loch} : L_{Presskanal}$ –Verhältnisse) und die Variante 2 mit verschiedenen hohen Durchsätzen pelletiert. Mit Ausnahme dieser beiden Parameter wurden keine weiteren Einstellungen verändert. Während der Versuche betrug die Kollerdrehzahl 166 U min^{-1} . Der hydraulisch gesteuerte Kollerdruck wurde auf 10^7 Pa geregelt. Tabelle 11 zeigt welche $d_{Loch} : L_{Presskanal}$ –Verhältnisse und Durchsätze während des Vorversuches gewählt wurden.

Tabelle 11: Darstellung der Varianten des Vorversuches, die im Rahmen des Pelletierungs-Praxisversuches bei der Firma Amandus Kahl durchgeführt wurden

Nr.	Variante	Biomasse	$D_{Loch} : L_{Presskanal}$	Durchsatz [kg h^{-1}]
1	2	<i>M. x g. + P. t.</i>	1 : 7	250
2	2	<i>M. x g. + P. t.</i>	1 : 7	290
3	2	<i>M. x g. + P. t.</i>	1 : 7	350
4	2	<i>M. x g. + P. t.</i>	1 : 7	385
5	2	<i>M. x g. + P. t.</i>	1 : 7	400
6	4	<i>M. x g. + Fichte</i>	1 : 7	350
7	4	<i>M. x g. + Fichte</i>	1 : 6	350
8	4	<i>M. x g. + Fichte</i>	1 : 5	390

Während des Versuches wurde die Qualität der Pellets beider Varianten nach den in Tabelle A 4 beschriebenen Kriterien visuell beurteilt. Zusätzlich wurde während der Pelletierung der Variante 2 der spezifische Energiebedarf in Abhängigkeit der Einstellung ermittelt und die Temperatur der Pellets mit einem Thermometer gemessen.

Im Anschluss an den Vorversuch wurden die vier verschiedenen Varianten (siehe Tabelle 10) unter den in Tabelle A6 (siehe Anhang) beschriebenen Bedingungen pelletiert. Dabei wurde der spezifische Energiebedarf der Pelletierung erfasst, die Pellettemperatur gemessen und anschließend die Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Pelletvarianten analysiert.

3.4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse eines Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktions-Modelles

Um den ökonomischen Erfolg einer theoretischen Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion beurteilen zu können, erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von THEK und OBERNBERGER (2004) eine Wirtschaftlichkeitsberechnung.

In die eigene Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurden alle soweit bekannten Produktionskosten einbezogen, wobei kein Anspruch auf absolute Vollständigkeit der Daten erhoben wurde. Vielmehr sollte am Beispiel einer Jahresproduktionsmenge von 10.000 t Mischpellets gezeigt werden, ob die Produktion von Miscanthus-Mischpellets wirtschaftlich sein kann. Aus der Kosten-Erlös-Differenz wurde der mögliche Gewinn berechnet. Für die Ermittlung der Kosten wurden die aktuellen Preise der einzelnen Faktoren zugrunde gelegt.

Da zu dem Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine Marktpreise für Miscanthus-Mischpellets vorlagen, die eine schlechtere Qualität als EN_{plusA1} Pellets haben, wurde für die Ermittlung des Erlöses ein Preis von 70% des aktuellen Marktpreises von EN_{plusA1} Pellets zugrunde gelegt. Dieser betrug laut ANONYMUS 13 (2013) im Jahr 2012 durchschnitt 230 € t⁻¹. Zusätzlich zu der statischen Gewinnermittlung, die auf aktuellen Zahlen basierte, erfolgte eine Sensitivitätsanalyse. Im Rahmen dieser Sensitivanalyse wurde für die Schlüsselfaktoren Rohstoff-, Energiekosten und Pelletpreis der kritische Wert ermittelt. Des Weiteren wurde der jährliche interne Zinsfuß der Investition bestimmt.

3.4.5.1 Gewinn und interne Rendite der Miscanthus-Paulownia Mischpelletproduktion

Als Ausgangslage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Modellunternehmens wird angenommen, dass mehrere Landwirte eine Genossenschaft gründen, welche die Pellets produziert. Die Landwirte sind dabei sowohl Genossenschafter als auch Rohstofflieferanten und Produzenten. Pro Jahr sollen 10.000 t Mischpellets produziert werden, die zu 50 M.-% aus Miscanthus und 50 M.-% aus Paulownia mit einem Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester und 0,3 M.-% Kaolin bestehen. Dabei ist der Produktionsprozess in die in Abbildung 13 dargestellten Prozessschritte unterteilt. Die Produktion, die auf 2,5 t Pellets pro Stunde ausgelegt ist, soll in einem Zweischichtbetrieb mit 5 Arbeitstagen pro Woche stattfinden. Für die Produktion wird eine eigene Produktionsstätte errichtet, wobei alle für die Produktion notwendigen Investitionen zu 100% durch Bankkredite finanziert werden sollen.

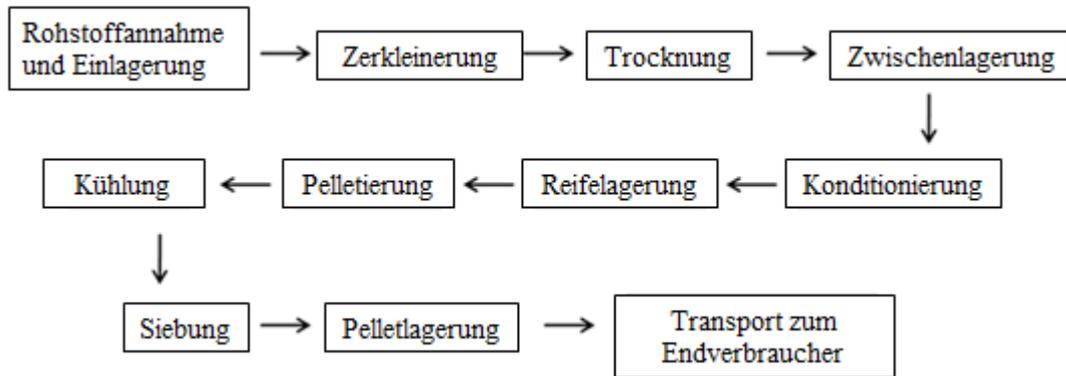


Abbildung 13: Prozessschritte der geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion

Die Tabelle 12 beschreibt die einzelnen Kostenfaktoren und die dazugehörigen angenommenen Werte, die zur Berechnung der Gesamtkosten der jährlichen Pelletproduktion notwendig sind.

3.4.5.2 Kostenposten der Produktion

Das Produktionsgelände soll in Nähe (max. 30 km Entfernung) zu den Betrieben der Genossen errichtet werden.

Die Kosten für das **Gebäude** setzen sich aus Planung, Grundstück (2 ha), Baukosten der Betriebshalle (5.000 m²) und Silos für 40.000 m³ Pellets und Rücklagen für Bestandserhaltung zusammen. Die jährlichen Kosten für diese Einzelposten setzen sich aus der Absetzung für die Abnutzung (AfA) und den Zinsen zusammen. Für den gesamten Posten Gebäude wurde eine Abschreibungsdauer von 25 Jahren angenommen. Allgemein wurde für die Berechnungen ein Zinssatz (i) von 5% angesetzt.

In Bezug auf die **Technik** wird für die Zerkleinerung der angelieferten Miscanthus-Häcksel und Paulownia-Hackschnitzel eine Kollermühle vom Typ 37-850 der Firma Amandus Kahl eingesetzt, die bis zu 3 t Material pro Stunde zerkleinern kann. Nach der Zerkleinerung wird das Material in einem Trockner (Typ GK 1400 Amandus Kahl) auf unter 13 M.-% Feuchte getrocknet und in Zwischensilos eingelagert. Im Anschluss werden die verschiedenen Rohstoffe und die Additive in einer Mischschnecke vorkonditioniert und in ein Reifesilo überführt. Für den Prozessschritt der Pelletierung soll eine Pelletpresse vom Typ 39-1000 von Amandus Kahl eingesetzt werden, die bis zu 2,5 t Pellets pro Stunde produzieren kann. Die Pellets werden im Anschluss an den Prozessschritt der Pelletierung abgekühlt, gesiebt und eingelagert. Insgesamt werden die Technikkosten auf 12,5 Jahre abgeschrieben.

Ebenso wie bei dem Posten Gebäude setzen sich die Kosten der unterteilten Posten, die aus einem Angebot von (LEUER, 2012) entnommen wurden, aus AfA- und Zinskosten zusammen. Analog zu den Gebäudekosten wurden für die Wartungs- und Reparaturkosten, die laut (LEUER, 2012) 10% der Technikkosten betragen, keine Zinskosten angesetzt.

Im Gegensatz zu den kapitalgebundenen Kosten werden die jährlichen Kosten der übrigen Kostengruppen durch die Multiplikation der eingesetzten Postenmengen mit dem Kapitalbedarf pro Einheit je Posten ermittelt.

Tabelle 12: Jährliche Gesamtkosten einer Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion (10.000 t a⁻¹) unterteilt in kapitalgebundene, verbrauchsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten in Anlehnung an THEK und OBERNBERGER (2004)

Kosten- gruppe	Posten	Posten unterteilt	Menge	Einheit	Kosten Einheit [€]	Kosten ges. [€]	AfA	Zinsen	Kosten Jahr [€]
Kapital- gebunden	Gebäude	Gebäude Planung	1	1	300.000 ¹	300.000	12.000	7.800	19.800
		Grundstück	2	ha	50.000 ²	100.000	0	5.000	5.000
		Bau Betriebshalle	5.000	m ²	200 ¹	1.000.000	40.000	28.000	66.000
		Reparaturen und Inst.	6 ¹	% K _{Geb.}		60.000	2.400	0	2.400
		Pelletsilo	40.000	m ²	20 ²	800.000	32.000	20.800	52.800
			gesamt			2.260.000	86.400	59.600	146.000
	Technik	Nasserpannung	10.000	t a ⁻¹	320.000 ²	320.000	25.600	8.653	34.253
		Trocknung	10.000	t a ⁻¹	400.000 ²	400.000	32.000	10.816	42.816
		Trockenspanlager	10.000	t a ⁻¹	130.000 ²	130.000	10.400	3.515	13.915
		Pelletierung, Kühlung	10.000	t a ⁻¹	300.000 ²	300.000	24.000	8.112	32.112
		Elektronik und Versch.	10.000	t a ⁻¹	210.000 ²	210.000	16.800	5.678	22.478
		Sicherheitstechnik	10.000	t a ⁻¹	70.000 ²	70.000	5.600	1.893	7.493
		gesamt-K_{Technik}	10.000	t a ⁻¹			1.430.000	114.400	38.667
		Wartung + Rep.	10	% K _{Technik}		143.000	11.440	0	15.307
		gesamt			1.573.000	125.840	38.667	168.374	
Verbrauchs- gebunden	Rohstoff	Miscanthus	5000	t a ⁻¹	60 ⁴	-	-	300.000	
		Paulownia	5.000	t a ⁻¹	70 ⁴	-	-	350.000	
		Transport Feld-Betrieb	10.000	t a ⁻¹	20 ⁴	-	-	200.000	
		gesamt	10.000	t a ⁻¹	85	-	-	850.000	
	Additiv	Kaolin	100	t a ⁻¹	200 ⁷	-	-	20.000	
		Einkauf Trester	100	t a ⁻¹	30	-	-	3.000	
		Trocknung	40.000	kWh a ⁻¹	0,1 ⁹	-	-	4.000	
		Siebung / Zerkleinerung	6.000	kWh a ⁻¹	0,15 ¹⁰	-	-	900	
		gesamt				-	-	27.900	
	Strom	Zerkleinerung	25.000	kWh a ⁻¹	0,15	-	-	37.500	
		Pelletierung	50.000	kWh a ⁻¹	0,15	-	-	75.000	
		Peripherie	25.000	kWh a ⁻¹	0,15	-	-	37.500	
		gesamt	1.000.000	kWh a ⁻¹	0,15	-	-	150.000	
Wärme (Trocknung)		1.000.000	kWh a ⁻¹	0,1	-	-	100.000		
K _{Vorrat}		5 % K _{Ver.} - K _{Ver.}			-	-	59.617		
Betriebs- gebunden	Personal	Anlagenführer	3	1	45.000 ¹¹	-	-	135.000	
		Aushilfe	1	1	35.000 ¹¹	-	-	35.000	
		Geschäftsführer	1	1	75.000 ¹¹	-	-	75.000	
		gesamt	5	1		-	-	245.000	
Summe exkl. K _{Vorrat} exkl. sonstige								1.687.274	
sonstige			6 ¹²	% K				101.236	
Summe exkl. K _{Vorrat}								1.788.510	
Gesamtkosten								1.848.127	

Quellen: ¹ Anonymus 3 (2011), ² eigene Schätzung, ³ Leuer (2012), ⁴ Sieverdingbeck et al. (2012), ⁵ Pühl (2012), ⁶ Toews (2010), ⁷ Anonymus 2 (2012), ⁸ Anonymus 4 (2012), ⁹ Anonymus 3 (2012), ¹⁰ Anonymus 5 (2012), ¹¹ Obernberger und Thek (2004)

Als **Rohstoffe** für die Mischpellets werden jährlich 5.000 t Miscanthus mit einem Feuchtegehalt von 15 M.-% und 5.000 t Paulownia-Hackschnitzel mit einem Ausgangsgehalt von 10 M.-% Feuchte vor der Pelletierung eingesetzt. Dabei belaufen sich laut SIEVERDINGBECK et al. (2010) die Produktionskosten für Miscanthus (15 M.-% Feuchte) auf

60 € t⁻¹ und für Paulownia (10 M.-% Feuchte) auf 70 € t⁻¹ (PÜHL, 2012). Zusätzlich zu den Produktionskosten kommen 20 € t⁻¹ Transportkosten hinzu. Die Bestimmung der Transportkosten erfolgte nach Angaben von TOEWS (2010), wobei die maximale Transportentfernung 30 km beträgt. Somit betragen die gesamten Rohstoffkosten 85 € t⁻¹.

Zu den beiden Hauptkomponenten werden jährlich 100 t Traubentrester, für den Transportkosten von 30 € t⁻¹ anfallen, als **Additiv** beigemischt. Vor der Beimischung muss dieser jedoch getrocknet, gesiebt und zermahlen werden, sodass zusätzliche Additivkosten für den Traubentrester entstehen, welche in der Summe 79 € t⁻¹ betragen. Des Weiteren wird feinpulveriges Kaolin in Form einer wässrigen Suspension dem Gemisch zugeführt, welches laut Anonymus 7 (2012) 200 € t⁻¹ kostet.

Jährlich werden durch die gesamte Pelletproduktion 100.000 kWh **Strom** verbraucht (LEUER, 2012; THEK und OBERNBERG 2004 und eigene Berechnungen). Davon benötigt die Pelletierung 50%, die Zerkleinerung 25% und alle weiteren Anlagen 25%. Laut dem Stromversorgungsunternehmen EnBW kostete 2012 die kWh elektrischer Energie einen Industriebetrieb 0,15 € (ANONYMUS 3, 2012). Weiterhin benötigt die Trocknung der Paulownia-Hackschnitzel, die von 50 auf 10 M.-% Feuchte getrocknet werden müssen 100.000 kWh **Wärme**. Nach Angaben des Bundesverbandes Energie und Wasser kostete im Jahr 2012 eine kWh thermischer Energie im Durchschnitt 0,1 € (ANONYMUS 4, 2012). Die einzigen betriebsgebundenen Kosten stellen in diesem Fallbeispiel **Personalkosten** dar. Zur Leitung der GmbH wird ein Geschäftsführer eingestellt, der mit einem Bruttojahreseinkommen von 60.000 €, Kosten von 75.000 € pro Jahr verursacht. Dieser soll neben administrativen Aufgaben den Vertrieb der Pellets organisieren. Des Weiteren werden zur Aufrechterhaltung des Zweischichtbetriebes 3 Anlagenführer mit einem Jahreseinkommen von je 36.000 € (brutto) eingestellt werden, sodass diese im Jahr 135.000 € kosten. Zusätzlich wird eine Hilfskraft mit einem Jahresgehalt von 28.800 € (brutto) eingestellt, sodass weitere Personalkosten in Höhe von 35.000 € a⁻¹ entstehen. Die Berechnung der Personalkosten erfolgte mit Hilfe des Personalkostenrechners von ANONYMUS 5 (2012).

Ein weiterer Kostenfaktor sind **Kapitalbindungskosten** (Zinsansatz für Umlaufkapital), die durch die Vorratshaltung der produzierten Pellets entstehen. Da Pelletproduzenten in der Regel nur kurz vor und während der Heizperiode (November bis Februar) Pellets verkaufen, wurde eine jährliche Einlagerungsdauer der Pellets von acht Monaten angenommen.

Zur Berechnung dieser jährlich anfallenden Kosten wurden die kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten addiert und deren Summe mit einem Zinssatz von 5% über die Dauer von acht Monaten multipliziert (siehe Formel 6, abgeändert nach KOPSIDIS, 1997).

(6)

$$K_{Vorrat} = K_{Kap.} + K_{Verbrauch} + K_{Betrieb} + K_{sons.} * i * 12^{-1} \text{ Monate} * x \text{ Monate}$$

Dabei gilt:

K_{Vorrat} = Kapitalbindungskosten durch Vorratshaltung [€]

$K_{Kap.}$ = Kosten kapitalgebunden [€]

$K_{Verbrauch}$ = Kosten verbrauchsgebunden [€]

$K_{Betrieb}$ = Kosten betriebsgebunden [€]

$K_{sons.}$ = Kosten sonstige [€]

i = Zinssatz [%]

x = Anzahl der Monate der Vorratshaltung

Dieser Kostenposten wurde in den Berechnungen den verbrauchsgebundenen Kosten zugeordnet, da dessen Höhe aus der produzierten Pelletmenge resultiert. Die **sonstigen Kosten**, die ebenfalls in diese Berechnung eingehen, betragen laut THEK und OBERNBERGER (2004) 6% der gesamten Produktionskosten exklusive der Kapitalbindungskosten für die Vorratshaltung der Pellets. Die sonstigen Kosten setzen sich beispielsweise aus Kosten für Wasser, Steuerberater, Versicherungen und Grundsteuer zusammen.

In der Summe wurden für die Berechnung des Gewinnes der gesamten Mischpellet-Produktion jährliche Kosten in Höhe von rund 1.84 Mio. € bestimmt, damit betragen die Stückkosten je t Mischpellets 184,4 €.

3.4.5.3 Gewinn und interne Rendite

Die Ermittlung des Erlöses der Mischpellet-Produktion, denen eine schlechtere Qualität als EN_{plusA1}-Pellets unterstellt wurde, erfolgte durch Multiplikation mit dem Faktor 0,7 der durchschnittliche EN_{plusA1}-Pelletpreis von 230 € t⁻¹. Daraus resultiert für die vorliegende Arbeit ein Mischpellet-Preis von 161 € t⁻¹. Dieser Preis pro t wurde mit der Anzahl von 10.000 t produzierter Pellets multipliziert. Damit betrug der angenommene jährliche Erlös 1,61 Mio. €. Der Gewinn wurde im Anschluss durch Subtraktion der Kosten von dem Erlös berechnet. Zusätzlich wurde anhand des jährlichen Gewinnes und der jährlichen Gesamtkosten die interne Rendite errechnet. Die interne Rendite wurde nach Formel 7 (abgeändert nach SCHNEEBERGER und PEYERL, 2011) berechnet.

$$i^* = 100 * K^{-1} * G \quad (7)$$

Dabei gilt:

i^* = interne Rendite [%]

K = Gesamtkosten [€]

G = Gewinn [€]

3.4.5.4 Sensitivitäts-Analyse der Miscanthus-Mischpelletproduktion

Im Anschluss an die Berechnung des Gewinnes einer möglichen Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets erfolgte eine Sensitivitätsanalyse, indem jeweils der kritische Wert der Kostenfaktoren Rohstoffeinkauf und elektrische Energie ermittelt wurde. Zusätzlich wurde der kritische Wert in Abhängigkeit des Pelletpreises ermittelt. Die Bezugsmenge für diese Analyse betrug dabei eine produzierte t Mischpellets.

3.5 Statistische Auswertung

Die ermittelten Daten wurden mit der Software Microsoft Excel 2007 aufbereitet und die dazugehörigen Grafiken erstellt. Das R^2 wurde ebenfalls mit Excel errechnet. Die statistischen Auswertungen erfolgten mit der Analysesoftware IBM SPSS Statistics Version 20.

Mittels der Software wurden mit Hilfe des Tukey-HSD- bzw. Scheffe-Test eine einfaktorielle ANOVA Analyse der Mittelwerte durchgeführt. Paarweise Vergleiche von Varianten wurden über einen Vergleich der Mittelwerte (T-Test) getestet. Signifikanzen wurden mit einem Konfidenzintervall von 95% bzw. einem Signifikanzniveau von 0,05 ($p \leq 0,05$) berechnet. Signifikante Unterschiede sind durch verschiedene Buchstaben über den jeweiligen Balken gekennzeichnet bzw. beim Paarvergleich durch einen Stern. Die Wiederholungsanzahl je Variante jedes Versuchs wird mit „n“ unter den Abbildungen angegeben.

4. Ergebnisse

4.1 Eignung von *Miscanthus x giganteus* für die Mischpelletproduktion

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Brennstoffanalysen der verschiedenen *Miscanthus x giganteus*-Typen und der Pelletierungsversuche unter besonderer Berücksichtigung der Einflüsse ausgewählter Faktoren auf die Qualität der Pelletierung von *Miscanthus* dargestellt. Diese Ergebnisse werden in der weiteren Diskussion zur Überprüfung der Eignung von *Miscanthus* für die Mischpelletproduktion genutzt.

Mit Ausnahme des Leistungs- und spezifischen Energiebedarfs werden die Ergebnisse den jeweiligen Anforderungen der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) gegenübergestellt.

4.1.1 Einfluss ausgewählter kulturtechnischer Faktoren auf die Brennstoffqualität

Im ersten Schritt der Brennstoffanalysen zum Einfluss des Erntejahres, Genotyps, Standort und Bestandsalter wurden die Aschegehalte der verschiedenen Typen (siehe Tabelle 5, Kapitel 3.1.1) untersucht. Im zweiten Schritt wurden dann von vier ausgewählten Typen der Brennwert, N-, S- und Cl- Gehalt bestimmt. Im letzten Schritt dieser Brennstoffanalysen wurde am Beispiel des Types 34 Kenn 8. J. exemplarisch für *Miscanthus* die Ascheerweichungstemperatur ermittelt.

4.1.1.1 Aschegehalte

Einfluss Erntejahr und Genotyp

Die nachfolgende Abbildung demonstriert, die Schwankungsbreite des Aschegehaltes verschiedener *M. x g.* Genotypen in drei aufeinanderfolgenden Erntejahren.

Es zeigt sich, dass die *Miscanthus*-Biomasse des Erntejahres 2010 niedrigere Aschegehalte hat als die Ernte der Folgejahre. Mit Ausnahme des Types 34 CKA nehmen die Aschegehalte der *Miscanthus*-Typen im Erntejahr 2012 wieder ab, wobei die Werte über den Aschegehalten des Jahres 2010 liegen. Bei dem Typ 34 CKA steigt der Aschegehalt im Jahr 2012 weiter an. Allgemein lässt sich zu dem Einfluss des Erntejahres festhalten, dass die Aschegehalte eines Typs mit bis zu 1,6 M.-% Schwankungsbreite zwischen den Erntejahren variieren können.

In Bezug auf den Genotyp hat der Typ 17, der 2010 einen Aschegehalt von nur 1,6 M.-% aufweist, über alle Erntejahre den geringsten Aschegehalt, gefolgt von den Typen 35 und 34 bzw. 34 CKA.

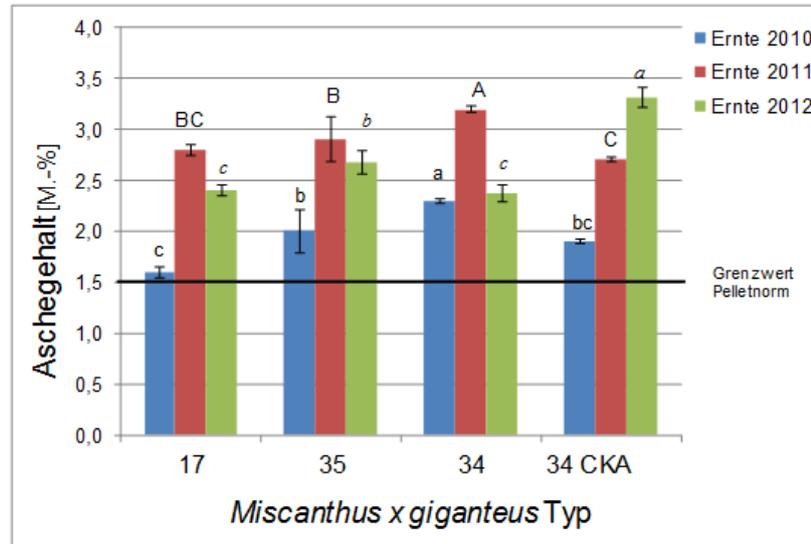


Abbildung 14: Aschegehalte von 3, 4 und 5-jährigen *Miscanthus x giganteus*-Typen am Standort CKA (bezogen auf TM) in Abhängigkeit vom Erntejahr in Relation zum Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)

Aus dem Vergleich der Typen 34 und 34 CKA, die sich lediglich in der Bestandsgröße und der Art des Pflanzgutes unterscheiden, können über die Erntejahre hinweg keine klaren Aussagen getroffen werden. Allgemein liegen die Aschegehalte der verschiedenen Typen zwischen 1,6 M.-% und 3,3 M.-%, wobei der Mittelwert aller Varianten bei rund 2,5 M.-% lag.

Einfluss des Standortes

Für nähergehende Betrachtungen des Einflusses des Genotyps in Zusammenhang mit dem Standort auf den Aschegehalt kann Abbildung 15 herangezogen werden.

Dort ist unter anderem der Aschegehalt von 3 verschiedenen dreijährigen Genotypen (17, 35 und 34) dargestellt, welche auf dem Standort CKA im Jahr 2011 geerntet wurden. Dabei wird ersichtlich, dass sich die Genotypen 17 und 35 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Dagegen ist der Aschegehalt des Genotyps 34 signifikant am höchsten. Die Aschegehalte dieser drei Typen variieren zwischen 2,6 und 3,3 M.-%.

Der Vergleich der Varianten 34 und 34 Kenn zeigt, dass der Standort einen stärkeren Einfluss auf den Aschegehalt hat als der Genotyp. Diese beiden Varianten unterscheiden sich allein aufgrund verschiedener Standorte mit knapp 1,5 M.-% signifikant voneinander.

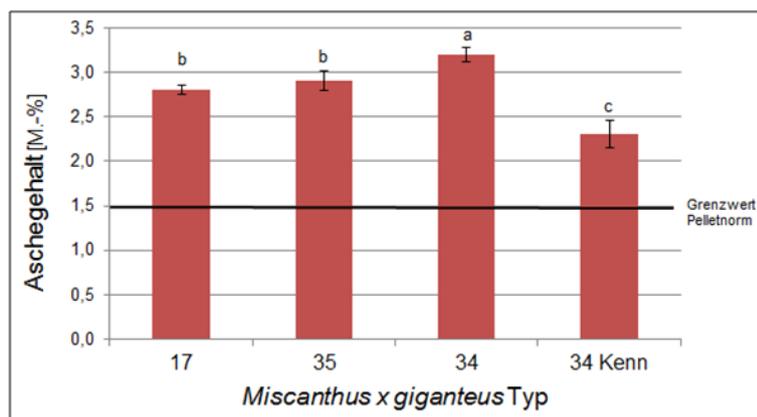


Abbildung 15: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*-Typen aus dreijährigen Beständen, die im April 2011 geerntet wurden in Abhängigkeit von Genotyp und Standort (CKA/Kenn) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)

Einfluss des Bestandsalters

Die folgende Abbildung stellt dar, wie hoch die Aschegehalte des Miscanthus-Genotyps 34 bei verschiedenen Bestandsaltern schwanken können.

Am Beispiel der beiden Bestände in Kenn zeigt sich, dass die Biomasse aus dem älteren Bestand in dem gleichen Erntejahr und auf dem gleichen Standort mit 0,4 M.-% Unterschied einen signifikant geringeren Aschegehalt aufzeigt als die des dreijährigen.

Aus dem Vergleich der Aschegehalte der Variante 34 CKA und 34 DKH vom Erntejahr 2012 wird diese Erkenntnis ebenfalls tendenziell gestützt, da der Aschegehalt der älteren Variante signifikant geringer ist. Allerdings kann der zusätzlich wirkende Standorteinfluss nicht näher beschrieben werden.

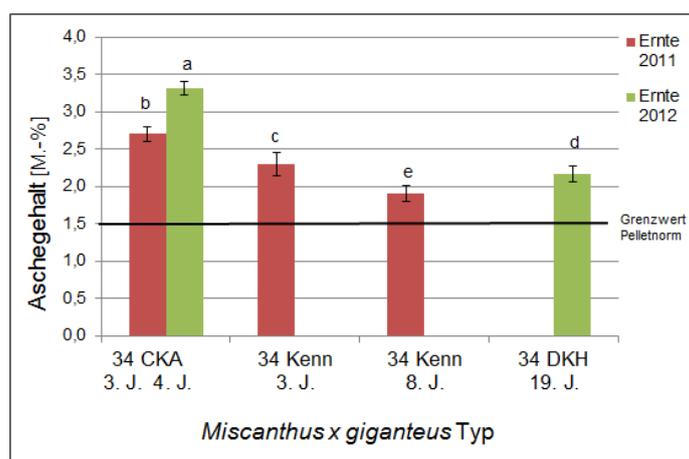


Abbildung 16: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*-Typen des gleichen Genotyps in Abhängigkeit von Bestandsalter, Erntejahr und Standort (CKA, Kenn und DKH) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)

Zwischenfazit

Abbildung 17 stellt die Ergebnisse des Aschegehaltes der verschiedenen Typen, die in dem vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurden, vergleichend dar.

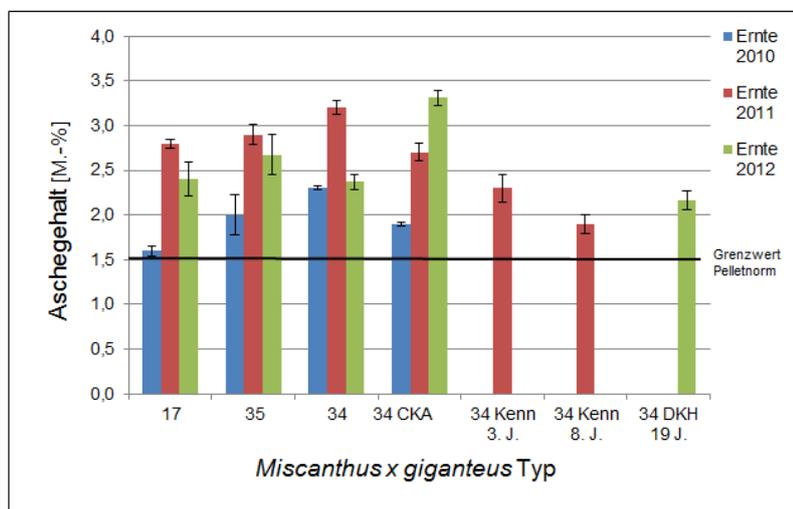


Abbildung 17: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen in Abhängigkeit von Standort, Bestandsalter, Genotyp und Erntejahr in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (n=6)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus* sehr stark schwanken kann. In Bezug auf diese Schwankungen zeigt sich, dass das Erntejahr mit bis zu 75% Unterschied innerhalb desselben Typs (17) den stärksten Einfluss auf den Aschegehalt hat. Weiterhin können bei reiner Betrachtung des Faktors Standort bis zu 52% unterschiedliche Aschegehalte bei *Miscanthus* beobachtet werden (Variante 34 und 34 Kenn 3. J.). Der reine Faktor Genotyp ruft dagegen lediglich maximale Unterschiede von 44% hervor (Variante 17 und 34). Der Faktor Bestandsalter bildet bei den Untersuchungen mit 21% Unterschied den geringsten Einflussfaktor. Insgesamt zeigen die Daten, dass *Miscanthus x giganteus* im Mittel einen Aschegehalt von rund 2,3 M.-% hat und somit 0,8 M.-% über dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) liegt.

4.1.1.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften von *Miscanthus x giganteus*

Tabelle 13 beschreibt den Aschegehalt und den Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Typ, Erntejahr und Standort. Weiterführend stellt Abbildung 18 die Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte dieser Varianten dar. Daraus geht hervor, dass der Typ 17 aus dem Erntejahr 2010 mit 1,6% einen niedrigeren Aschegehalt und einen höheren Brennwert ($19,3 \text{ MJ kg}^{-1}$) hat als der gleiche *Miscanthus* aus dem Folgejahr (2,8% und $19,1 \text{ MJ kg}^{-1}$). Außerdem ist zu erkennen, dass *Miscanthus* CKA 34, der auf dem gleichen

Standort angebaut wurde wie der Miscanthus 17 (Ernte 2011), einen nahezu identischen Aschegehalt und einen etwas höheren Brennwert hat als Miscanthus 17 (Ernte 2011).

Tabelle 13: Aschegehalt und Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Erntejahr, Genotyp und Standort (n=6 für Aschegehalt, n=2 für Brennwert)

Miscanthus-Typen	Aschegehalt [M.-% (TM)]	Brennwert (Ho) [MJ kg ⁻¹]
17 (Ernte 2010)	1,6	19,3
17 (Ernte 2011)	2,8	19,1
34 CKA (Ernte 2011)	2,7	19,3
34 Kenn 8. J. (Ernte 2011)	1,9	19,4

Dagegen zeigt der Miscanthus von dem achtjährigen Bestand aus Kenn im Vergleich zu dem Miscanthus 34 aus Klein-Altendorf einen deutlich geringeren Aschegehalt und einen etwas höheren Brennwert. Vergleicht man die Stickstoff-, Schwefel-, und Chlorgehalte dieser vier Miscanthus-Typen mit der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (siehe Abbildung 18), so wird deutlich, dass alle Typen höhere Schwefel- und Chlorgehalte aufweisen als die Norm zulässt. Bei allen vier Typen wurde ein Schwefelgehalt von 0,1 M.-% festgestellt. Der Miscanthus vom Standort Kenn hat im Vergleich zu den anderen drei Typen den geringsten Chlorgehalt. Dieser liegt nur 0,01 M.-% über dem Norm Grenzwert von 0,02 M.-%.

Die Chlorgehalte der übrigen Varianten betragen zwischen 0,08 bis 0,12 M.-%. Die Stickstoffgehalte aller Varianten liegen mit maximal 0,3 M.-% unterhalb des Norm-Grenzwertes von 0,5 M.-%.

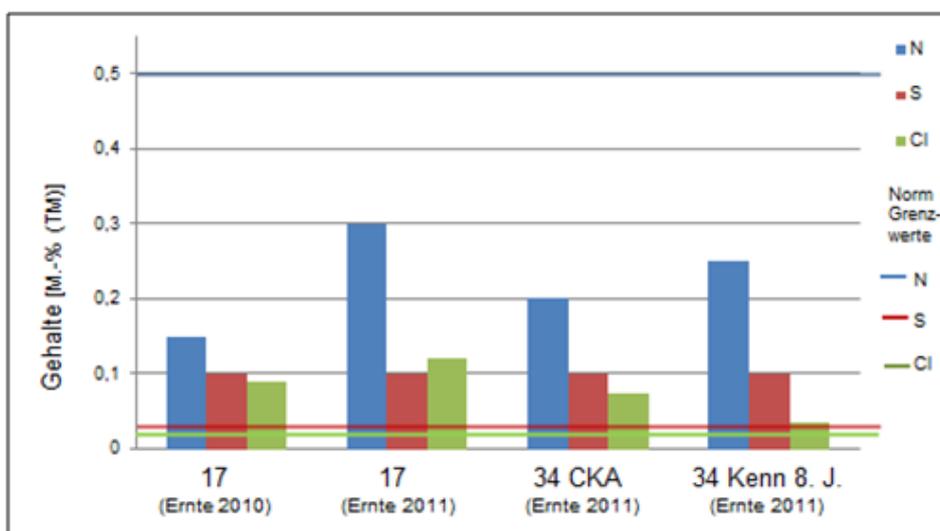


Abbildung 18: Vergleich der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Standort, Genotyp und Erntejahr in Relation zur Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (n=2)

Die Analysen des Ascheschmelzverhaltens von *Miscanthus* 34 Kenn 8. J. zeigt, dass der Ascheschmelzpunkt (DT) bei 1.180°C (nach Formfaktor Methode) bzw. 1.020°C (nach optischer Methode) liegt. Je nach Methode ist somit die DT 80°C oberhalb bzw. 80°C unterhalb des Grenzwertes von EN_{plusA2}-Pellets.

4.1.2 Einfluss ausgewählter Faktoren auf den Prozessschritt der Pelletierung

In den nachfolgenden Abschnitten wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Wassergehalte der Biomassegemische auf den Vorgang der Pelletierung auswirken. Zusätzlich wird dargestellt, wie der Prozessschritt der Pelletierung durch verschiedene Presskanal-verhältnisse und Durchsatzmassen reguliert werden kann. Bei diesen Versuchen standen in der Regel der spezifische Energiebedarf der Pelletierung und die physikalischen Eigenschaften der produzierten Pellets im Fokus der Betrachtungen.

4.1.2.1 Wassergehalt

Die folgende Abbildung stellt exemplarisch am Beispiel der Pelletierung eines Gemisches von *Miscanthus x giganteus* und Paulownia dar, wie hoch der spezifische Energiebedarf des Pressvorgangs in Abhängigkeit des Wassergehaltes ist. Für nähergehende Erläuterungen ist in dieser Abbildung zusätzlich der Leistungsbedarf und die Matrizentemperatur der unterschiedlichen Varianten aufgezeichnet. Die Standardabweichungen aller Varianten liegt unter 2%.

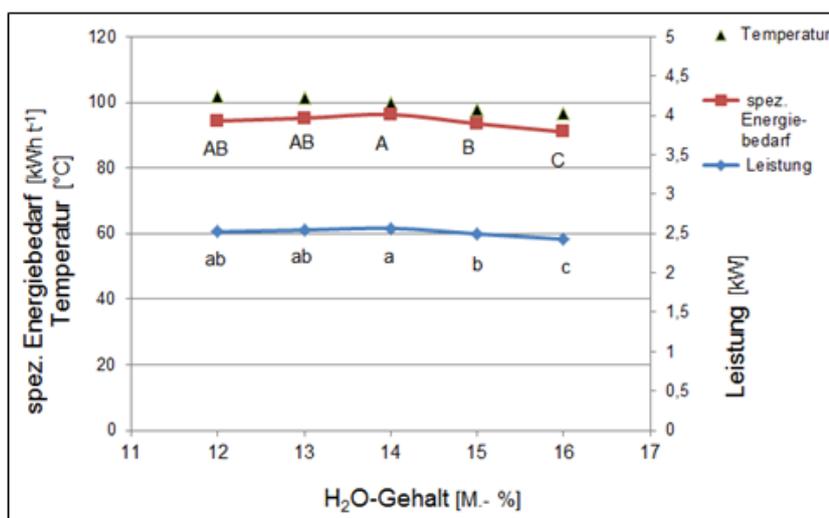


Abbildung 19: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrize und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges eines Biomassegemisches aus *M. x g.* (34 Kenn 8. J.) und Paulownia mit Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

Es zeigt sich, dass die Variante mit 14 M.-% bei einer Matrizentemperatur von 99°C den höchsten spezifischen Energiebedarf und Leistungsbedarf hat.

Der spezifische Energiebedarf und der Leistungsbedarf der Pelletierung der Varianten mit 13 bzw. 12 M.-%, bei der die Matrizentemperatur auf über 100°C anstieg, ist ähnlich hoch wie der von der Variante mit 14 M.-%. Erst ab einem Wassergehalt von 15 M.-% verringern sich spezifischer Energie- und der Leistungsbedarf des Pressvorganges. Mit diesem Verlauf ging ein Abfall der Matrizentemperatur auf 96°C (16 M.-% Wassergehalt) einher. Dabei unterscheidet sich die Variante mit 15 M.-% Wassergehalt signifikant zu der Variante 14% und 16%. Generell hat die Variante mit 16 M.-% Wasser den signifikant niedrigsten spezifische Energie- und Leistungsbedarf.

Die Analyse der Abriebfestigkeit der untersuchten Pellets ergab, dass sich lediglich die Varianten mit 14 und 16 M.-% Wassergehalt signifikant voneinander unterschieden. Dabei hat das Gemisch mit 14 M.-% Ausgangsfeuchte die tendenziell höchste und das Gemisch mit 16 M.-% die tendenziell niedrigste Abriebfestigkeit. Die anderen Varianten unterscheiden sich nicht signifikant zu diesen (siehe Abb. 20). Ähnlich wie bei dem spezifischen Energiebedarf und dem Leistungsbedarf ist die Standardabweichung der verschiedenen Varianten sehr gering.

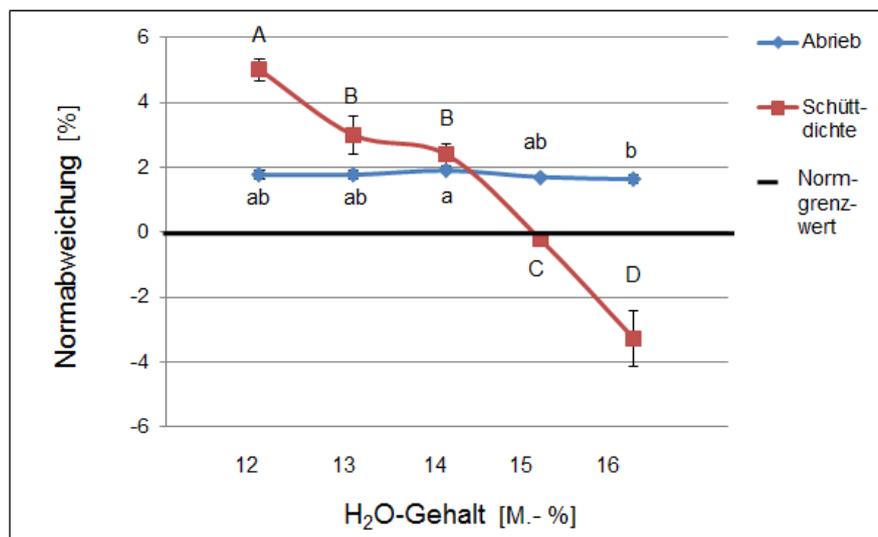


Abbildung 20: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Paulownia-Pellets mit einem Wassergehalt von 12, 13, 14, 15 und 16 M.-%, in Relation zu dem Norm-Grenzwert (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, (p≤0,05), n=4)

Im Gegensatz zu der Abriebfestigkeit ist bei den Schüttdichten der verschiedenen Varianten eine klare Tendenz zu erkennen. Aus Abbildung 20 geht hervor, dass die Schüttdichte der Pellets bei zunehmendem Wassergehalt des Ausgangsmaterials abnimmt. Mit Ausnahme der Varianten 13 und 14 M.-% ist bei höherem Wassergehalt des Gemisches die Schüttdichte der Pellets signifikant geringer. Die Schüttdichten der Varianten 13 und 14 M.-%

unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, sind jedoch geringer als die der Variante 12 M.-% und höher als bei Variante 15 M.-%.

Um die Ergebnisse dieses Versuches auf andere Biomassegemische zu übertragen, werden im folgenden Abschnitt der spezifische Energiebedarf und der Leistungsbedarf der Pelletierung der Gemische Miscanthus mit Paulownia und Miscanthus mit Fichte verglichen. Dafür wurden die Wassergehaltsstufen von 14 und 15 M.-% gewählt. Bei Betrachtung der Pelletierungsdaten des Miscanthus-Fichten-Gemisches (siehe Abb. 21) zeigt sich, dass ebenso wie bei dem Gemisch mit Paulownia ein erhöhter Wassergehalt zu einer signifikanten Reduktion des spezifischen Energiebedarfes führt. Im Gegensatz zu dem Gemisch mit Paulownia wurde die Verringerung des spezifischen Energiebedarfes bei der Variante *M. x g.* mit Fichte durch eine Erhöhung des Durchsatzes bei gleichbleibendem Leistungsbedarf erreicht.

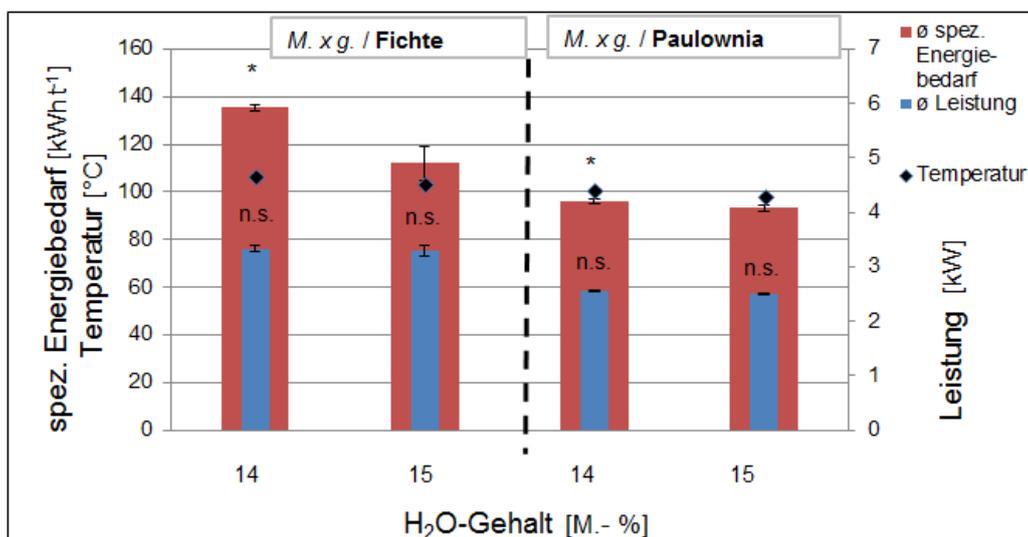


Abbildung 21: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrice und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* (34 Kenn 8. J.) und Paulownia bzw. *M. x g.* und Fichte, mit Wassergehalten von 14 und 15 M.-% (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

4.1.2.2 Presskanallänge der Matrice

Die nachfolgenden Abbildungen demonstrieren, welchen Einfluss die Presskanallänge auf die Pelletierung haben kann.

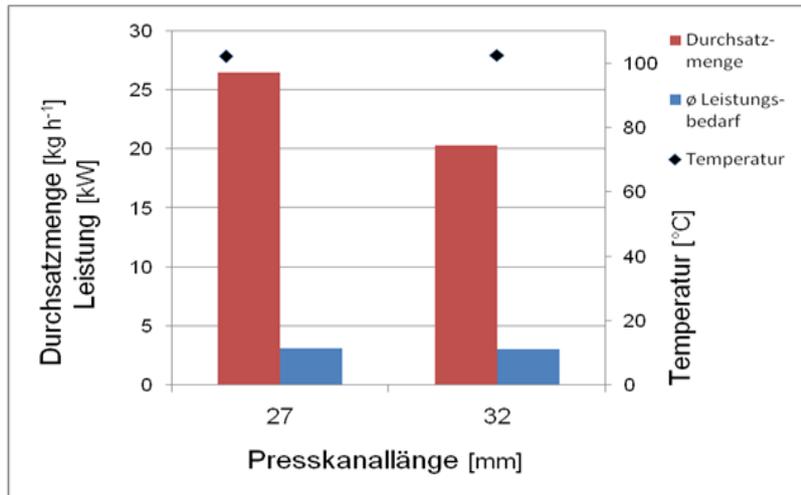


Abbildung 22: Einfluss der Presskanallänge mit 6 mm Lochmatrizen auf die Durchsatzmenge und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Gemisches aus *M. x g.* (34 Kenn 8. J.) und Fichte mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei gleichbleibendem Leistungsbedarf (n=2)

Abbildung 22 zeigt, dass bei gleichbleibendem Leistungsbedarf die Durchsatzmenge durch eine Verringerung der Presskanallänge erhöht werden kann. Durch diese Erhöhung der Durchsatzmenge wird, wie in Abbildung 23 ersichtlich, der spezifische Energiebedarf signifikant verringert. Die Matrizentemperatur erhöhte sich dabei nur minimal um 1°C .

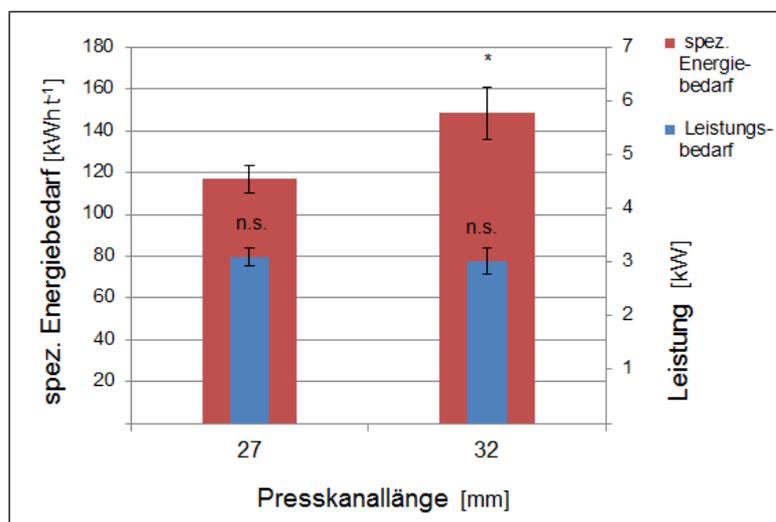


Abbildung 23: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung eines Miscanthus-Fichten-Gemisches, das mit zwei 6 mm Lochmatrizen unterschiedlicher Presskanallängen pelletiert wurde (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), n=4)

Die weitere Analyse der Abriebfestigkeit und Schüttdichte ergab, dass sich die produzierten Pellets signifikant voneinander unterschieden.

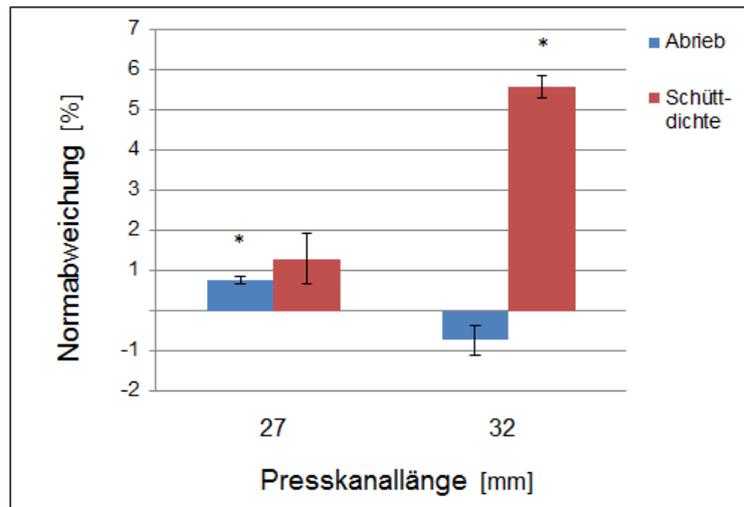


Abbildung 24: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Fichten-Pellets, die mit zwei 6 mm Lochmatrizen unterschiedlicher Presskanallängen pelletiert wurde, in Relation zum Norm-Grenzwert (Signifikanz: t-Test, (p≤0,05), n=4)

Die Verlängerung der Presskanallänge hat neben dem Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf und den Durchsatz zur Folge, dass die Abriebfestigkeit der Pellets signifikant abnimmt und unter den Norm-Grenzwert sinkt. Gleichzeitig erhöht sich die Schüttdichte signifikant.

4.1.2.3 Durchsatz

In den folgenden beiden Abbildungen ist dargestellt, wie sich eine Erhöhung der Durchsatzmasse, auf die Qualität der Pelletierung auswirken kann. Abbildung 25 zeigt dabei am Beispiel der Pelletierung eines Gemisches aus Miscanthus und Paulownia auf, wie die Durchsatzerhöhung den Leistungsbedarf, spezifischen Energiebedarf und die Matritzentemperatur verändert.

Die Steigerung des Durchsatzes um 29% von 20,7 auf 26,7 kg h⁻¹ erhöht den Leistungsbedarf signifikant um 9% und verringert gleichzeitig den spezifischen Energiebedarf signifikant um 16% von 114 auf 96 kWh t⁻¹. Durch diese Durchsatzveränderung erhöht sich auch die Matritzentemperatur von 99°C auf 101°C.

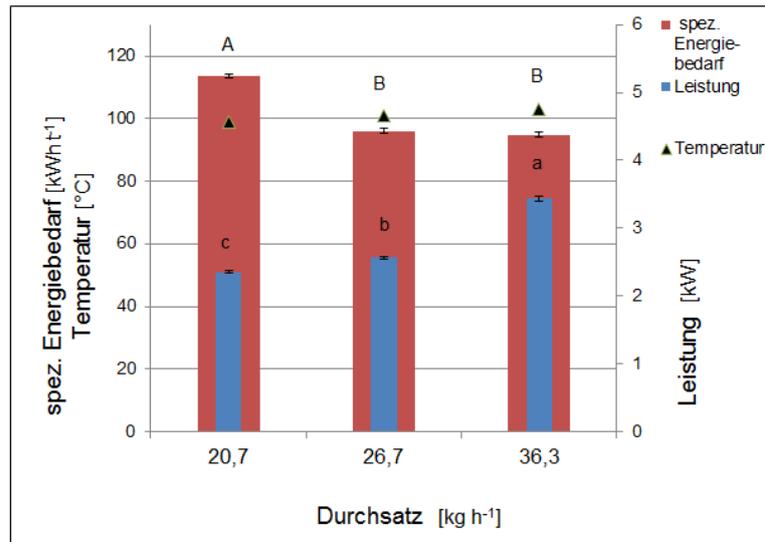


Abbildung 25: Spezifischer Energiebedarf, Leistungsbedarf und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Miscanthus-Paulownia-Gemisches und einem Tresterzuschlag von 1% mit 14% Wassergehalt in Abhängigkeit des Durchsatzes (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes um 35% auf 36,3 kg h⁻¹ läßt den Leistungsbedarf um 34% signifikant auf 3,7 kWh ansteigen. Durch diesen mit der Durchsatzerhöhung linearen Anstieg der Leistung verändert sich der spezifische Energiebedarf nicht. Jedoch ist eine Erhöhung der Matrizentemperatur auf 103°C zu beobachten.

Weiterhin ist zu beobachten, dass die Erhöhung der Durchsatzmasse die physikalische Qualität der Pellets veränderte, wobei die Abriebfestigkeit und die Schüttdichte aller Varianten die Grenzwerte der Norm einhalten. Aus Abbildung 26 geht hervor, dass die Variante mit dem geringsten Durchsatz die höchsten Werte erreicht. Die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Variante mit dem höchsten Durchsatz sind signifikant schlechter als die mit dem geringsten Durchsatz.

Die Schüttdichte der mittleren Variante liegt signifikant dazwischen, jedoch unterscheidet sich die Abriebfestigkeit nicht von den anderen beiden.

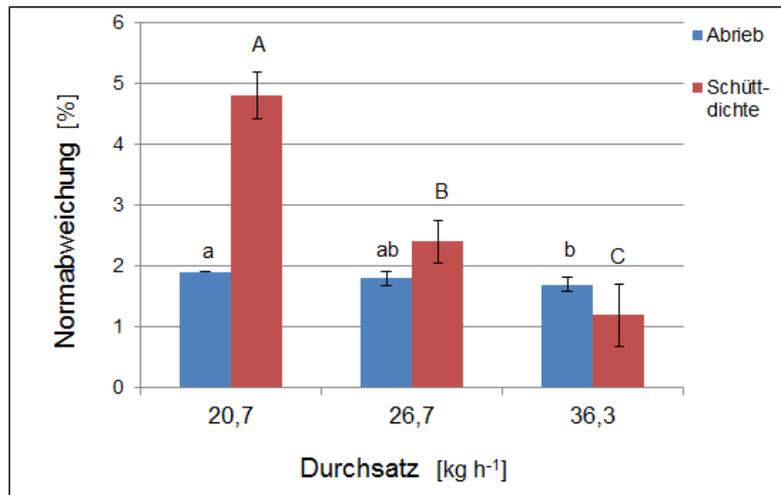


Abbildung 26: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Paulownia-Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Norm-Grenzwert (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

4.2 Eignung von *Paulownia tomentosa* für die Mischpelletproduktion

Die Eignung von *P. tomentosa* als Rohstoff für die Miscanthus-Mischpelletproduktion wurde anhand der Kriterien Biomasseertrag, Brennstoff- und Pelletierungseigenschaften überprüft. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen aufgezeigt.

4.2.1 Biomasseertrag

Die folgenden beiden Abbildungen stellen die Ergebnisse der Wuchsleistungsversuche von *Paulownia tomentosa* dar.

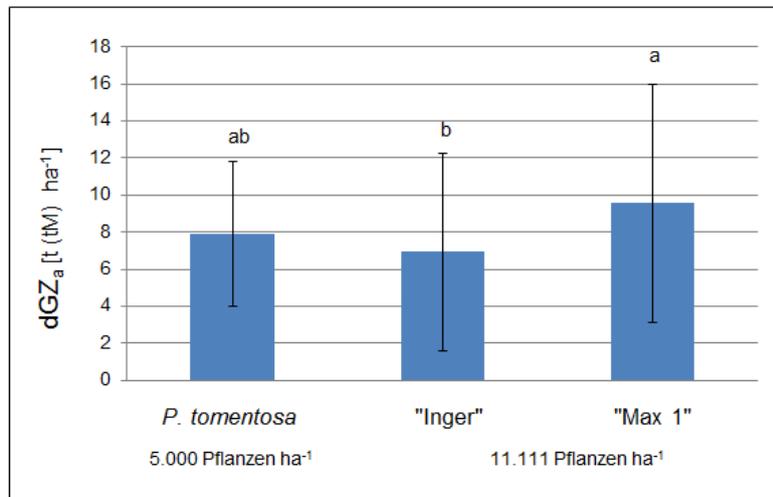


Abbildung 27: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtwuchs von *Paulownia tomentosa* (5.000 Pflanzen ha⁻¹) im Vergleich zu der Pappelsorte "Max 1" und Weidensorte "Inger" (11.111 Pflanzen ha⁻¹), die nach drei Jahren auf dem Standort Klein-Altendorf geerntet wurden (Signifikanz: ANOVA, Scheffe-Test, ($p \leq 0,05$), $n \geq 48$)

Aus Abbildung 27 geht hervor, dass *Paulownia tomentosa* trotz einer geringeren Pflanzdichte einen ähnlich hohen Biomassezuwachs ($7,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (TM)) aufweist wie die Pappel- und Weidensorten ($9,6$ bzw. $6,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (TM)).

Die folgende Abbildung beschreibt die Entwicklung des dGZ_a-Verlaufs der ersten fünf Bestandsjahre auf der Zusatzparzelle des Standortes Klein-Altendorf.

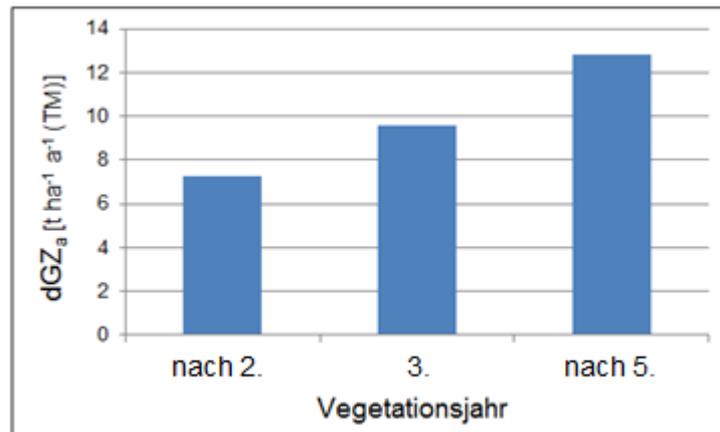


Abbildung 28: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtzuwachs von *Paulownia tomentosa* (10.000 Pflanzen ha⁻¹) der ersten fünf Bestands-/Vegetationsjahre auf der Zusatzparzelle des Standortes Klein-Altendorf (n = 40)

In der Abbildung zeigt sich, dass der mittlere dGZa der ersten beiden Jahre bei 7,3 t ha⁻¹ a⁻¹ liegt und in den Folgejahren bis auf 12,8 t ha⁻¹ a⁻¹ (4. und 5. Jahr) ansteigt.

Der Vergleich des dGZa in Abhängigkeit der Pflanzdichte, der durch die Beerntung der Plantage Tornow erfolgte, ergab, dass die Parzelle mit 4.444 Pflanzen ha⁻¹ einen mehr als doppelt so hohen dGZa (5,1 t ha⁻¹ a⁻¹) hat wie die Parzelle mit einer viermal niedrigeren Pflanzdichte (2,2 t ha⁻¹ a⁻¹) (siehe Abb. 29).

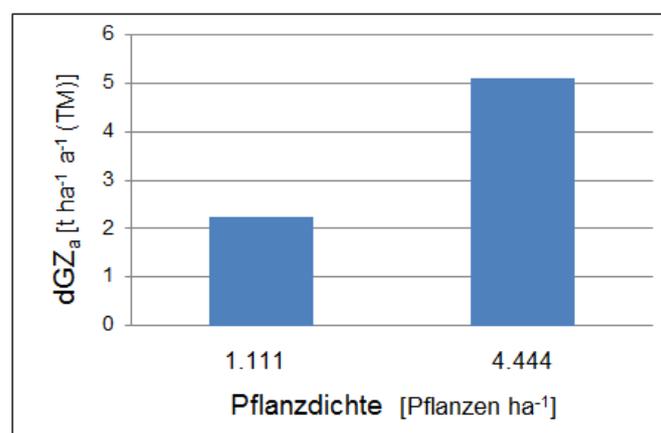


Abbildung 29: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtzuwachs von *Paulownia tomentosa* nach den ersten 4 Bestandsjahren auf dem Standort Tornow in Abhängigkeit der Pflanzdichte (n ≥ 100)

4.2.2 Brennstoffeigenschaften

4.2.2.1 Aschegehalt

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Aschegehaltsuntersuchung von *P. tomentosa* auf. Zur leichteren Einordnung des Wertes wird dieser in Relation zu den Analyseergebnissen der Aschegehalte anderer holz- und halmgutartiger Biomassen und dem Grenzwert der DIN_EN 14961-2(A2) dargestellt.

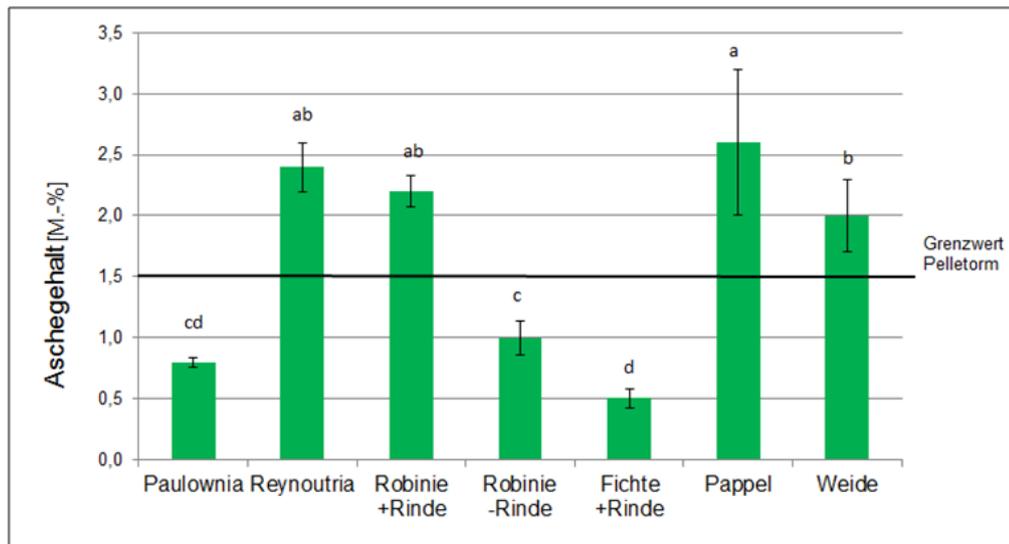


Abbildung 30: Aschegehalte (bezogen auf TM) ausgewählter Biomassearten in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=6$)

Abbildung 30 ist zu entnehmen, dass die Fichten-Hackschnitzel mit Rindenanhang (0,5%) im Vergleich zu den anderen Biomassearten – mit Ausnahme von Paulownia - den signifikant geringsten Aschegehalt haben. *Paulownia tomentosa* weist einen Aschegehalt von 0,76 M.-% auf. Somit liegt der Aschegehalt von Paulownia zwischen Fichte mit Rinde (0,5 M.-%) und Robinie ohne Rinde (1 M.-%). Die anderen vier untersuchten Varianten haben einen Aschegehalt von größer oder gleich 2 M.-%.

4.2.2.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften

Die Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zu verbrennungsrelevanten Eigenschaften von *Paulownia tomentosa*, die von zwei unabhängigen Laboren durchgeführt wurden. Zusätzlich sind vergleichend die Analysewerte von dem Miscanthus aus Kenn dargestellt, die in Labor I ermittelt wurden.

Tabelle 14: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT (bestimmt nach optischer Methode) von *Paulownia tomentosa* in Abhängigkeit des Untersuchungslabors im Vergleich zu *Miscanthus x giganteus* (34 Kenn 8. J.) (n=2)

	Biomasse	Paulownia	Paulownia	Miscanthus 34 Kenn 8. J.
Parameter		Labor I	Labor II	Labor I
Aschegehalt [M.-% (TM)]		0,76	0,75	1,90
Stickstoffgehalt [M.-% (TM)]		0,35	0,5	0,25
Schwefelgehalt [M.-% (TM)]		0,100	0,037	0,100
Chlorgehalt [M.-% (TM)]		0,010	0,020	0,035
Brennwert (Ho) [MJ kg ⁻¹]		19,4	-	19,4
Ascheerweichungstemperatur (DT) [°C]		-	1.290 ^{opt.}	1.020 ^{opt.}

Die Untersuchung der Aschegehalte durch beide Labore ergab nahezu identische Werte. Vergleicht man dagegen die Ergebnisse der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehaltanalysen von *Paulownia tomentosa* der beiden Labore, so wird ersichtlich, dass diese deutlich voneinander abweichen. Zusätzlich geht aus Tabelle 14 hervor, dass die Biomasse von Paulownia (0,35 M.-% N-Gehalt) im Vergleich zu Miscanthus (0,25 M.-% N-Gehalt) einen höheren Stickstoffgehalt aufweist. Dagegen hat Paulownia mit 0,01% einen dreifach niedrigeren Chlorgehalt als Miscanthus. In Labor I wurde sowohl bei Paulownia, als auch bei Miscanthus ein Schwefelgehalt von 0,1 M.-% ermittelt. Die in Labor I bestimmten Brennwerte von Miscanthus und Paulownia sind ebenfalls mit 19,4 MJ kg⁻¹ einheitlich. Die institutseigene Brennwertanalyse von Paulownia ergab dagegen einen mittleren Brennwert von 19,1 MJ kg⁻¹.

Die mittels LEM bestimmte Ascheschmelztemperatur von Paulownia beträgt 1.290°C (nach optischer Methode) bzw. 1.340°C (nach Formfaktor Methode) und ist somit 270°C höher als die von Miscanthus.

4.2.3 Pelletierungseigenschaften

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse des Pelletierungsversuches zur Eignung von Paulownia als Rohstoff für die Mischpelletproduktion auf. Neben der Pelletqualität von Miscanthus werden zur Einordnung der Ergebnisse ebenfalls die Analysedaten der anderen Biomassen dargestellt.

Tabelle 15: Visuelle und physikalische Pelletqualität verschiedener Biomassen in Rein- und Mischform in Relation zu den Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) (n=4)

Versuch	Mischkomponente		Visuelle	Abriebfestigkeit	Schüttdichte
Nr.	Anteil [M.-%]	Biomasse	Qualität	> 3,15 mm [M.-%]	[kg m ⁻³]
1	100	Paulownia	1	97,4 ± 0,2	608 ± 4
2	100	Miscanthus	4	92 ± 0,4	604 ± 3
3	100	Pappel	2	93 ± 0,4	617 ± 4
4	100	Weide	4	91 ± 0,7	603 ± 3
5	50 50	Paulownia Miscanthus	1	98,1 ± 0,3	624 ± 4
6	50 50	Pappel Miscanthus	2	97,2 ± 0,3	609 ± 3
7	50 50	Reynoutria Miscanthus	2	96,7 ± 0,3	627 ± 3
DIN_EN 14961-2(A2)			-	≥ 97,5	≥ 600

Aus dem Pelletierungsversuch geht hervor, dass Paulownia im Vergleich zu den anderen untersuchten Biomassen sowohl in Rein- als auch in Mischform mit Miscanthus eine sehr gute visuelle Qualität hat (siehe Nr. 1 und 5). Zudem ist besonders auffallend, dass die Pellets mit Paulownia als einzige Variante die Normwerte sowohl der Abriebfestigkeit als auch der Schüttdichte einhalten.

4.3 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zu dem spezifischen Energiebedarf und den produktionstechnischen Merkmalen der verschiedenen Zerkleinerungssysteme dargestellt.

4.3.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus

Der folgende Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlungen der Zerkleinerung von Miscanthus in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens.

4.3.1.1 Hammermühle und Zerkleinerung

Der erste Versuch zur Ermittlung des spezifischen Energiebedarfes an Hammermühle und Zerkleinerung im Jahr 2011 ergab, dass die Zerkleinerung vom Typ 22/600 nahezu gleich viel Energie zur Zerkleinerung von Miscanthus benötigt wie die Hammermühle (siehe Abb. 31). Die Zerkleinerung vom Typ 45/1500 benötigt allerdings mit $62,3 \text{ kWh t}^{-1}$ über ein Drittel mehr Energie als die kleinere Zerkleinerung vom Typ 22/600 ($38,5 \text{ kWh t}^{-1}$).

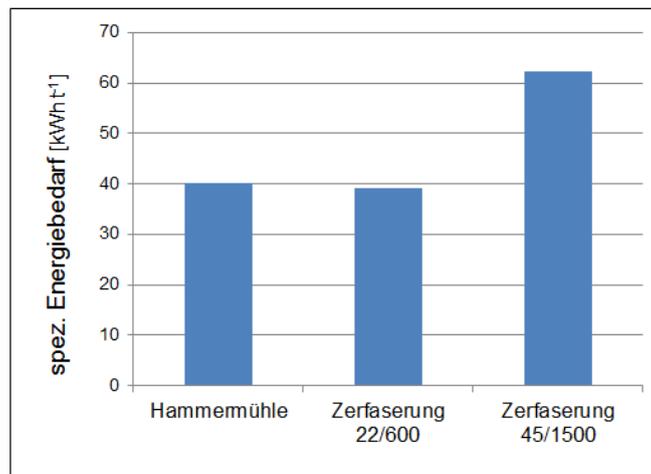


Abbildung 31: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung von Miscanthus mit einem Wassergehalt von 9,6 M.-% in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Versuchsjahr 2011) (n=1)

Die Wiederholung des Versuches im Jahr 2012 konnte die Ergebnisse des Vorjahres bestätigen. Abbildung 32 stellt die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von *M. x g.* mittels Hammermühle und Zerkleinerung in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes der beiden Versuchsreihen vergleichend dar.

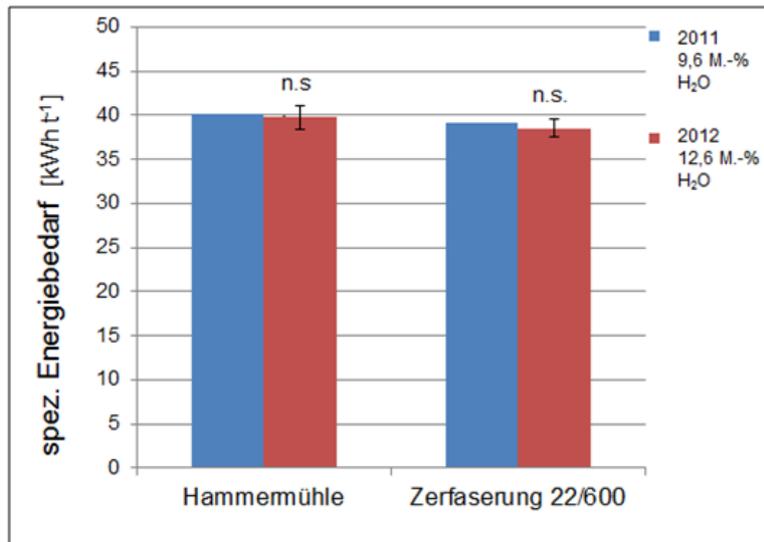


Abbildung 32: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens und des Wassergehaltes zu den Versuchsreihen 2011/2012 (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), ns = nicht signifikant, n=1 für 2011, n=4 für 2012)

Aus der Abbildung 32 geht hervor, dass sich der spezifische Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung in Abhängigkeit von der Systemwahl (Hammermühle und Zerfaserung) nicht signifikant unterscheidet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Zerkleinerung von Miscanthus mit einem höheren Feuchtegehalt minimal weniger Energie benötigt.

4.3.1.2 Kollermühle

Ebenso wie bei der Hammermühle und der Zerfaserung erfolgte 2011 ein erster Tastversuch zur Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle bei der Firma Amandus Kahl. Dieser Versuch wurde 2012 unter optimierten Versuchsbedingungen wiederholt.

Identifikation optimaler Maschineneinstellungen (Versuch 2011)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum spezifischen Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung von Miscanthus per Kollermühle mit unterschiedlichen Presskanalverhältnissen aufgezeigt. Weitergehend werden die Analyseergebnisse des Pelletierungsversuches mit Miscanthus-Mischpellets dargestellt, deren Miscanthusanteil mit unterschiedlichen Matrizen zerkleinert wurde.

Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Kollermühle

Der in Kapitel 3.3.1 beschriebene Zerkleinerungsversuch von Miscanthus mittels Kollermühle zeigt, dass der spezifische Energiebedarf bei Einsatz der Matrize mit einem Lochdurchmesser von 10 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 2 am geringsten ist.

Während des Versuches stellte sich heraus, dass für die Zerkleinerung von Miscanthus die Matrize mit einem Lochdurchmesser von 8 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 2 ungeeignet ist, da deren Einsatz zum Verstopfen der Matrize führte.

Die Varianten mit einem Lochdurchmesser von 8 mm bzw. 6 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 erzeugen jeweils mit absteigendem Partikeldurchmesser ein homogenes Zerkleinerungsprodukt. Bei dem Einsatz der 4 mm Matrize wurde die zerkleinerte Biomasse erneut stark vorpelletiert. Der spezifische Energiebedarf der Variante mit der 6 mm Matrize ist mit 24,5 kWh t⁻¹ nach der 10 mm Matrize am geringsten.

Tabelle 16: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Kollermühle in Abhängigkeit des Lochdurchmessers und des Presskanalverhältnisses der eingesetzten Matrize (Versuchsjahr 2011) (n=1)

Lochdurchmesser [mm]	Presskanalverhältnis ($d_{\text{Loch}} : L_{\text{Presskanal}}$)	Spez. Energiebedarf [kWh t ⁻¹]	Durchsatz [kg h ⁻¹]
10	1 : 2	12,9	695
8	1 : 2	-	-
8	1 : 1	35,0	600
6	1 : 1	24,5	705
4	1 : 1	60,5	380

Der ebenfalls in Kapitel 3.3.1 dargestellte Pelletierungsversuch ergab, dass alle drei Versuchsvarianten mit einem Matrizenlochdurchmesser von 6, 8 und 10 mm für den Prozessschritt der Pelletierung mit 180 kWh t⁻¹ gleich viel Energie benötigen.

Physikalische Qualität der Miscanthus-Fichten-Pellets in Abhängigkeit des gewählten Lochdurchmessers der eingesetzten Matrizen

Die folgende Abbildung beschreibt die physikalischen Eigenschaften der Pellets, deren Miscanthusanteil mittels Kollermühle unter Einsatz verschiedener Matrizen mit unterschiedlichen Lochdurchmessern zerkleinert wurde.

Es zeigt sich, dass die Mischpellets, deren Miscanthusanteil unter Einsatz einer Matrize mit 6 mm Lochdurchmesser zerkleinert wurde, als einzige beide Mindestanforderungen der Pelletnorm A2 erfüllen. Die beiden anderen Varianten haben zwar eine höhere Abriebfestigkeit als die 6 mm Variante, jedoch ist deren Schüttdichte unterhalb des Norm-Grenzwerts. Dabei liegt die Schüttdichte der 10 mm Variante mit -2,25% Abweichung (586 kg m⁻³) unterhalb der Anforderung der Pelletnorm von 600 kg m⁻³ (siehe Abb. 33).

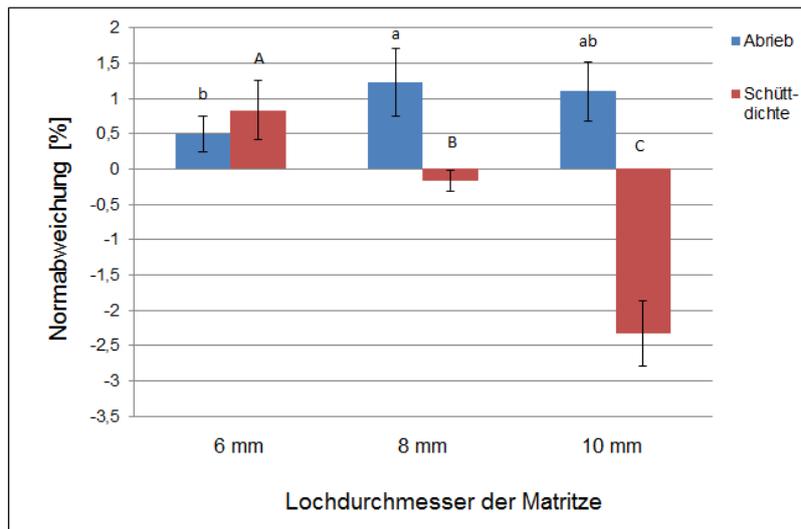


Abbildung 33: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) von Miscanthus- Fichten- Mischpellets, deren Miscanthusanteil mit verschiedenen Lochmatrizendurchmessern in der Kollermühle zerkleinert wurde, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, (p≤0,05), n=4)

Zusammenfassend kann für den ersten Tastversuch festgehalten werden, dass die Zerkleinerung bei Einsatz einer 6 mm Lochmatritze mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 den Miscanthus gut pelletierbar aufarbeitet und einen moderaten spezifischen Energiebedarf (24,5 kWh t⁻¹) hat.

Spezifischer Energiebedarf unter optimierten Bedingungen (Versuch 2012)

Auf Grundlage der Ergebnisse der Versuchsreihe im Jahr 2011 wurde im darauffolgenden Jahr ein weiterer Versuch im Technikum der Firma Amandus Kahl durchgeführt.

Die folgende Abbildung zeigt auf, wie Durchsatz und Wasserzugabe während des Zermahlens auf den Leistungs- und spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus-Häckseln wirken.

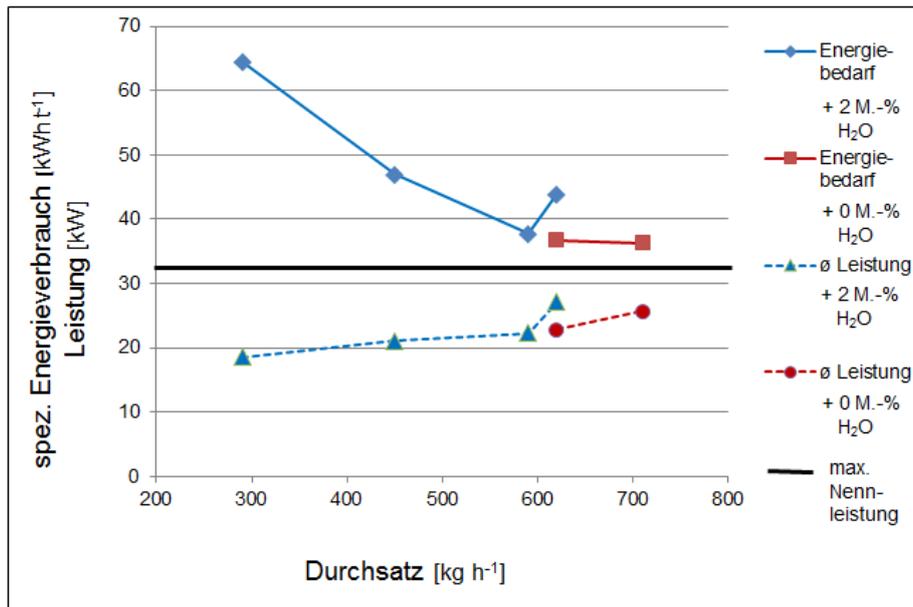


Abbildung 34: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (Versuchsjahr 2012) (n=1)

In vorangehender Abbildung ist zu erkennen, dass bei Zugabe von 2 M.-% Wasser bis zu einem Durchsatz von 600 kg h⁻¹ der Leistungsbedarf nahezu linear bis auf 70% der maximalen Nennleistung (33 kW) ansteigt. Diese lineare Erhöhung des Leistungsbedarfes um 20% wird durch eine Durchsatzerhöhung von 110% hervorgerufen. Dadurch sinkt der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung um knapp 40% auf 38 kWh t⁻¹. Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes auf 620 kg h⁻¹ führt zu einem sprunghaften Anstieg des Leistungsbedarfes auf 82% der maximalen Nennleistung. Mit dem starken Anstieg des Leistungsbedarfes (+12%) und einer minimalen Erhöhung des Durchsatzes steigt der spezifische Energiebedarf ebenfalls um 16% auf 44 kWh t⁻¹.

Bei Beibehaltung des Durchsatzes von 620 kg h⁻¹ und ohne Wasserzugabe sinkt der Leistungsbedarf um 14%, womit eine Reduktion des spez. Energiebedarfes mit ebenfalls 14% verbunden ist. Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes um 15% auf 710 kg h⁻¹ hat eine Steigerung des Leistungsbedarfes von 13% auf 78% der maximalen Nennleistung zur Folge. Damit geht einher, dass sich der spezifische Energiebedarf um 3% leicht verringert.

Es kann zusammengefasst werden, dass in diesem Versuch eine Reduktion der Wasserzugabe und eine Durchsatzerhöhung - bei einem Leistungsbedarf von 78% der maximalen Nennleistung - den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus (12,6 M.-% Feuchte) verringert.

4.3.1.3 Prallreaktor

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche von Miscanthus mittels Prallreaktor dargestellt. Tabelle 17 verdeutlicht, dass bei variierenden Maschineneinstellungen des Prallreaktors unterschiedlich viel Energie zum Zerkleinern von Miscanthus benötigt wird.

Tabelle 17: Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Prallreaktor in Abhängigkeit der Maschineneinstellungen (n=1)

Versuchs-Nr.	Sieb		Prallfläche [cm ²]	Drehzahl [U min ⁻¹]	spez. Energiebedarf [kWh t ⁻¹]
	∅ Loch [mm]	Fläche [cm ²]			
1	5	400	192	3.000	66
2	5 und 6	800	192	3.000	47
3	5 und 6	800	384	3.000	50
4	5 und 6	800	384	1.800	53

Die Variante 1, die lediglich eine Siebfläche von 400 cm² aufwies, hat mit 66 kWh t⁻¹ den höchsten Energiebedarf. Durch Verdoppelung der Siebfläche und Beibehaltung der anderen Maschineneinstellungen kann der Energiebedarf beinahe um ein Drittel auf 47 kWh t⁻¹ reduziert werden. Eine Erhöhung der Prallfläche bei einer Siebfläche von 800 cm² (Versuchsnummer 3) führt im Vergleich zu der Versuchsnummer 2 zu einer leichten Erhöhung des Energiebedarfs. Im Vergleich zu Variante 3 hat eine Reduktion der Drehzahl (Versuchsnummer 4) zur Folge, dass der Energiebedarf ebenfalls leicht auf 53 kWh t⁻¹ ansteigt.

4.3.1.4 Vergleich des spezifischen Energiebedarfs der Zerkleinerung von Miscanthus

Die folgende Abbildung fasst die Versuchsergebnisse zur Ermittlungen des spezifischen Energiebedarfes der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren zusammen.

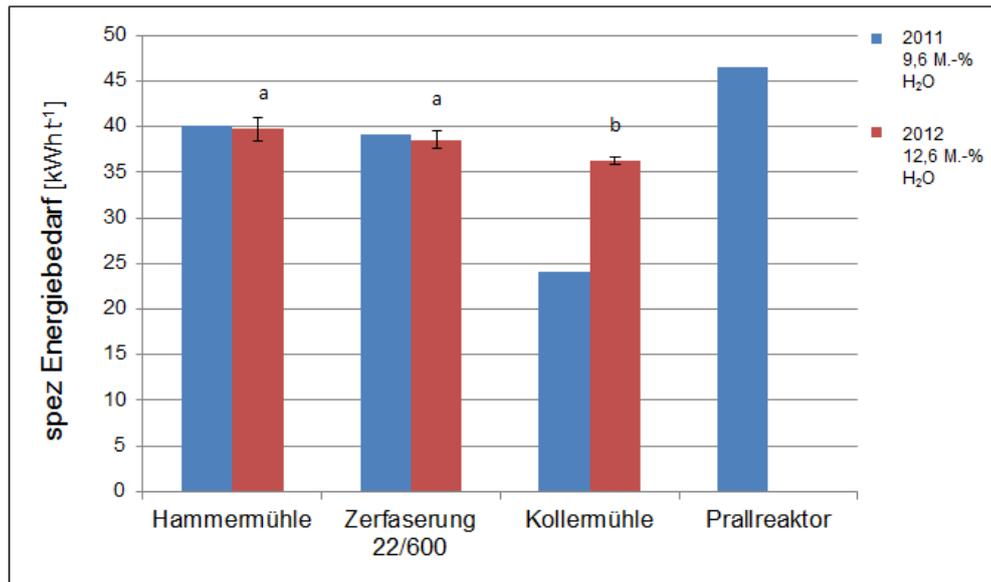


Abbildung 35: Vergleich des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerkfaserung, Kollermühle und Prallreaktor in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Versuchsjahre 2011 und 2012). (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=1$ für 2011, $n=4$ für 2012)

Der Vergleich des spezifischen Energiebedarfes der verschiedenen Zerkleinerungssysteme zeigt, dass im Jahr 2011 die Zerkleinerung mittels Kollermühle mit 24 kWh t^{-1} den tendenziell geringsten Energiebedarf aufweist. Im Gegensatz dazu benötigen die Zerkleinerungssysteme Hammermühle und Zerkfaserung (Typ 22/699) rund 65% mehr Energie zur Zerkleinerung einer t des gleichen Miscanthus. Die Zerkleinerung mittels Prallreaktor benötigt knapp 90% mehr Energie als die mittels Kollermühle.

Die Wiederholung des Versuches im Folgejahr ergab tendenziell ein ähnliches Bild. Im Gegensatz zum Vorjahr steigt bei der Variante Kollermühle der spezifische Energiebedarf um ca. 50% auf 36 kWh t^{-1} an. Gleichzeitig sinken im Versuchsjahr 2012 die Werte der Varianten Hammermühle und Zerkfaserung, die sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, leicht ab. Dennoch ist im Vergleich zu diesen Varianten der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Kollermühle (2012) um 8% signifikant geringer.

4.3.2 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Pelletierungsprozess

In den folgenden Kapiteln wird dargestellt, wie die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren auf die prozesstechnologische Qualität der Miscanthus- Zerkleinerungsprodukte wirken. In einem ersten Schritt wird aufgezeigt, wie sich der Energiebedarf der Pelletierung durch die Auswahl eines Zerkleinerungsverfahrens beeinflussen lässt. Zudem werden die Siebkennlinien der verschiedenen Zerkleinerungsprodukte dargestellt.

Die Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen zur Qualität der Mischpellets, in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens sollen weiterhin Aufschluss über die prozesstechnologische Eignung der Zerkleinerungsverfahren geben. Zuletzt werden die Ergebnisse der Pelletierungsversuche von Miscanthus-Fichten-Mischpellets mit definierten Miscanthus-Korngrößenfraktionen dargestellt.

4.3.2.1 Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung

Durch den Pelletierungsversuch mit den Miscanthus-Fichten-Gemischen (siehe Kapitel 3.3.2.2) wurde gezeigt, dass die Gemischvariante Kollermühle signifikant weniger Energie für die Pelletierung benötigt als die Varianten Hammermühle und Zerkfaserung (Typ 22/600).

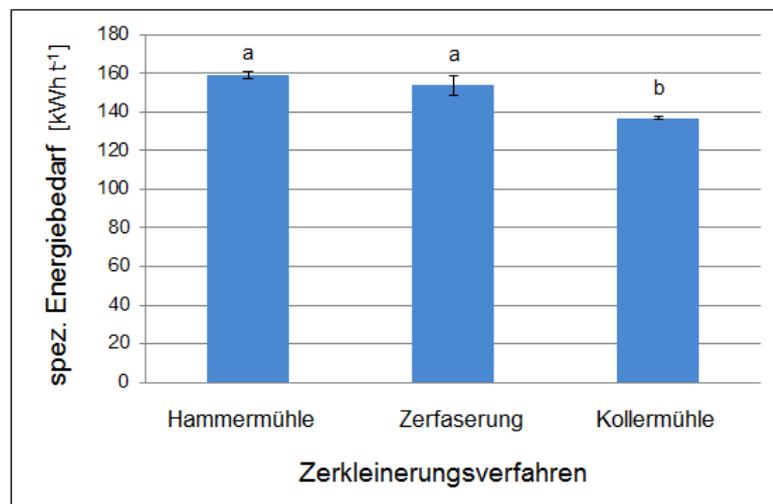


Abbildung 36: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung von Miscanthus-Fichten-Gemischen in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

4.3.2.2 Physikalischen Eigenschaften der Mischpellets

Die folgende Abbildung zeigt die Analyseergebnisse des in Kapitel 3.3.2.2 beschriebenen Versuches.

Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass lediglich die Mischpellet-Variante, deren Miscanthusanteil mittels Zerkfaserung zerkleinert wurde, die Anforderungen der EN-14961-2 (A2) gänzlich erfüllt. Die Varianten Hammermühle und Kollermühle haben zwar höhere Schüttdichten, als die Variante Zerkfaserung, jedoch ist die Abriebfestigkeit dieser Mischpellet-Varianten unter den von der Norm geforderten 97,5 M.-%. Im Vergleich zu der Variante Hammermühle zeigt die Kollermühle gegenüber Zerkfaserung geringere Abweichungen in Abriebfestigkeit und Schüttdichte auf.

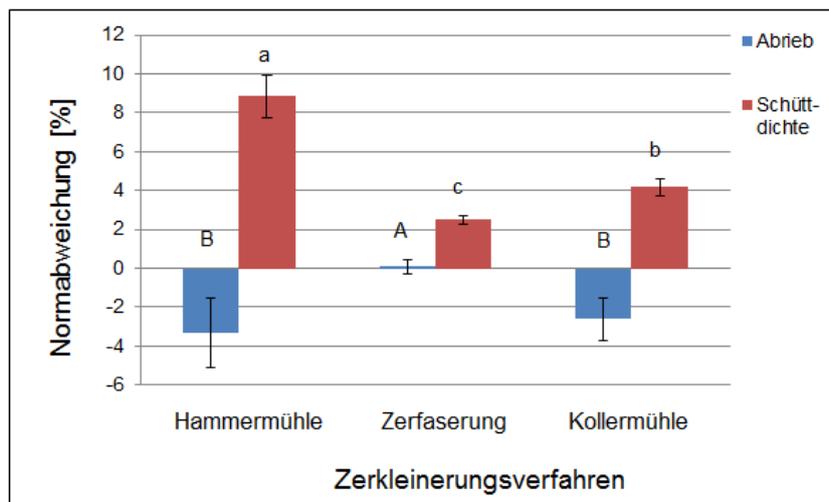


Abbildung 37: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Fichten-Pellets in Abhängigkeit vom Zerkleinerungsverfahren für Miscanthus, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm DIN_EN 14961-2 (A2) (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, (p≤0,05), n=4)

4.3.2.3 Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte

In Tabelle 18 sind die Siebkennlinien von den Produkten der Zerkleinerungsversuche von Miscanthus mittels der Verfahren Hammermühle, Zerfaserung, Prallreaktor und Kollermühle aufgelistet.

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die beiden Zerfaserungsvarianten die meisten Partikel der Fraktion 5 - 2 mm aufweisen. Bei diesen Varianten haben über 80% der Partikel eine maximale Kantenlänge von 5 mm – 2 mm, 4% von 2 mm – 1 mm und knapp 14% von kleiner 1 mm.

Die Partikel aus der Hammermühle und dem Prallreaktor weisen eine nahezu identische Korngrößenverteilung auf, wobei diese im Vergleich zu der Zerfaserung signifikant geringere Anteile an Partikeln der Korngrößenfraktion 5 - 2 mm haben. Zudem sind die Partikel deutlich kleiner als die aus der Zerfaserung, denn 33% der Partikel aus der Hammermühle und 35% aus dem Prallreaktor sind kleiner als 1 mm. Die Korngrößenverteilungen der Partikel aus der Kollermühle liegen allgemein zwischen den Werten der Zerfaserung und der Hammermühle.

Tabelle 18: Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus (34 Kenn 8. J.) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

	Partikelgrößenverteilung				
	10- 8 mm	8 - 5 mm	5 - 2 mm	2 - 1 mm	< 1 mm
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Hammermühle 5 mm Lochsieb	0	0	59,6 ±5,8 d	7 ±1,9 b	33,4 ±4,2 a
Zerfaserung 22/600 5 mm Lochsieb	0	0	82,2 ±1,7 a	4 ±0,3 d	13,8 ±1,6 c
Zerfaserung 45/1500 5 mm Lochsieb	0	0	81,4 ±1,5 ab	4 ±0,6 cd	14,6 ±1,3 bcd
Prallreaktor 5 u. 6 mm Lochsieb 40 mm Siebfl.	0	0	57,3 ±4,5 d	7,2 ±1,8 b	35,5 ±2,9 a
Kollermühle 33/390 10 mm (dLoch)	3	2,9 ±0,4	72,4 ±4,1 ab	11,3 ±2,1 a	10,4 ±2,7 d
Kollermühle 33/390 8 mm (dLoch)	0,1 ±0,2	1,1 ±0,3	75,9 ±2,7 b	6,5 ±0,6 bc	16,4 ±2,1 bcd
Kollermühle 33/390 6 mm (dLoch)	0	0,4 ±0,2	66,1 ±2,9 c	14,2 ±1,9 a	19,3 ±1,2 b

4.3.2.4 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die physikalische Pelletqualität

Um den Einfluss der Korngrößenverteilung, der durch das Zerkleinerungsverfahren beeinflusst wird, zu untersuchen, wurden die Mischpellets aus dem in Kapitel 3.3.2.3 beschriebenen Versuch analysiert. Diese Miscanthus- Fichten- Mischpellets zeichneten sich dadurch aus, dass über alle drei Varianten hinweg der Miscanthusanteil eine definierte Korngrößenverteilung aufwies.

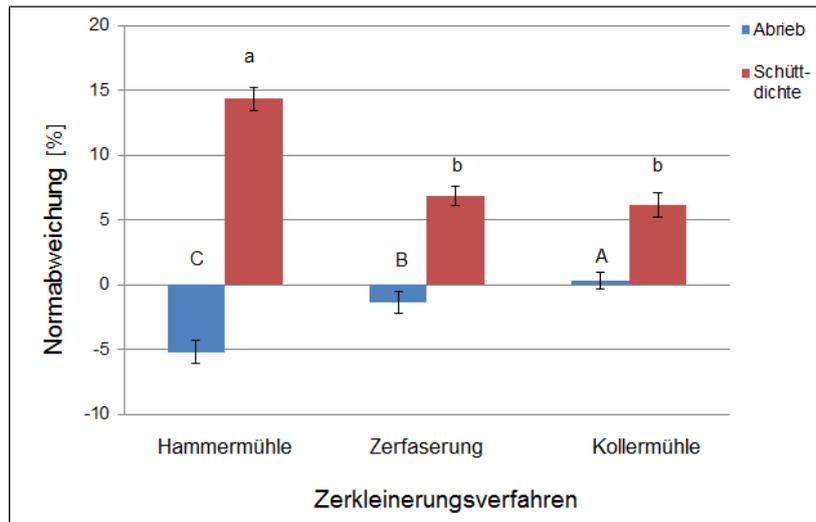


Abbildung 38: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Fichten-Pellets, deren Miscanthus-Partikelgröße einheitlich eingestellt wurde, in Abhängigkeit zum Zerkleinerungs-verfahren für den Miscanthusanteil (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, (p≤0,05), n=4)

Nach Anpassung der Korngrößenverteilung des Miscanthusanteils an die Ergebnisse der in Kapitel 4.3.2.3 dargestellten Siebkennlinie der Variante Zerkaserung (Typ 22/600), verändert sich Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Mischpellets. Im Gegensatz zu Abbildung 37 erfüllt nun die Variante Kollermühle die Anforderungen der Pelletnorm. Die Variante der Zerkaserung zeigt im Vergleich zu der Variante Kollermühle eine etwas höhere Schüttdichte, wobei die Abriebfestigkeit knapp 2% unterhalb des Norm-Grenzwerts liegt. Die Variante der Hammermühle weicht, wie schon in Abbildung 37 dargestellt, tendenziell am stärksten von der Norm ab. Dabei liegt die Schüttdichte mit 14% Normabweichung über den geforderten 600 kg m⁻³ und die Abriebfestigkeit 5% unter der Norm.

4.3.3 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse

Wie in Kapitel 3.3.1 dargestellt, wurde neben Miscanthus ebenfalls die Zerkleinerung von holzartiger Biomasse mittels Hammer- und Kollermühle untersucht. Die beiden folgenden Abschnitte stellen die Ergebnisse dieser Versuche dar.

4.3.3.1 Hammermühle

Die Zerkleinerungsversuche der verschiedenen Biomassen mittels Hammermühle verdeutlichen, dass die Zerkleinerung der Fichtensägespäne den signifikant geringsten Energieaufwand benötigt (21 kWh t⁻¹). Den signifikant höchsten spezifischen Energiebedarf hat die Zerkleinerung der Paulownia-Hackschnitzel mit einer durchschnittlichen

geometrischen Kantenlänge von 18 mm (64 kWh t^{-1}). Der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Fichten- und Paulownia-Hackschnitzel mit durchschnittlich 14 mm Kantenlänge unterscheidet sich nicht signifikant voneinander. Allerdings benötigt bei gleicher Kantenlänge die Variante Paulownia (53 kWh t^{-1}) 8% weniger Energie als die Fichte (57 kWh t^{-1}). Die Variante Miscanthus-Häcksel (40 kWh t^{-1}) hat dagegen einen signifikant niedrigeren spezifischen Energiebedarf als die beiden zuvor genannten Varianten. In Abbildung 39 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

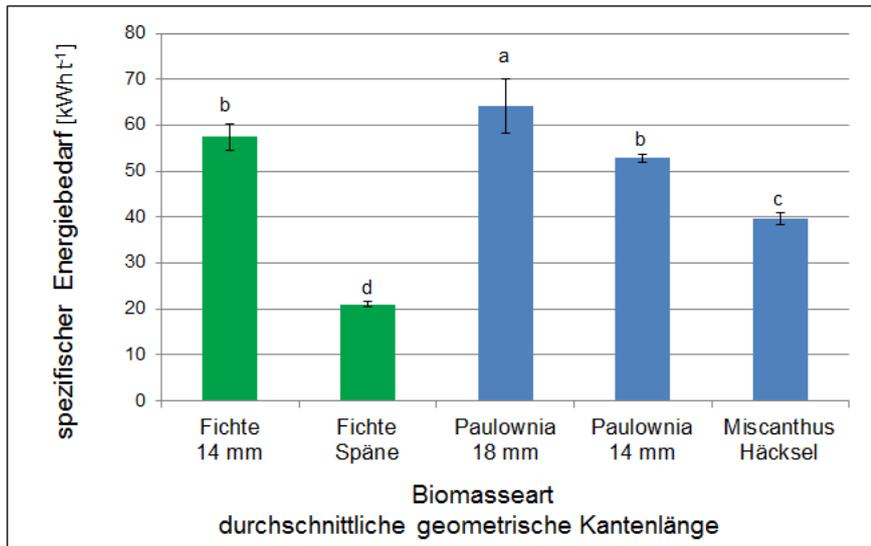


Abbildung 39: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Hammermühle in Abhängigkeit der Biomasseart und L_{Kante} (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

4.3.3.2 Kollermühle

Im Rahmen des zweiten Zerkleinerungsversuches (2012) bei der Firma Amandus Kahl wurde neben Miscanthus auch Paulownia mittels der Kollermühle zerkleinert.

Dabei ergab die Energiebedarfsmessung, dass die Zerkleinerung von Paulownia mit einem Ausgangsfeuchtegehalt von 9,2 M.-% und einer L_{Kante} von 14 mm andere Zerkleinerungseigenschaften aufweist als Miscanthus.

Die Abbildung 40 zeigt den Leistungs- und spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia in Abhängigkeit von der Wasserzugabemenge auf.

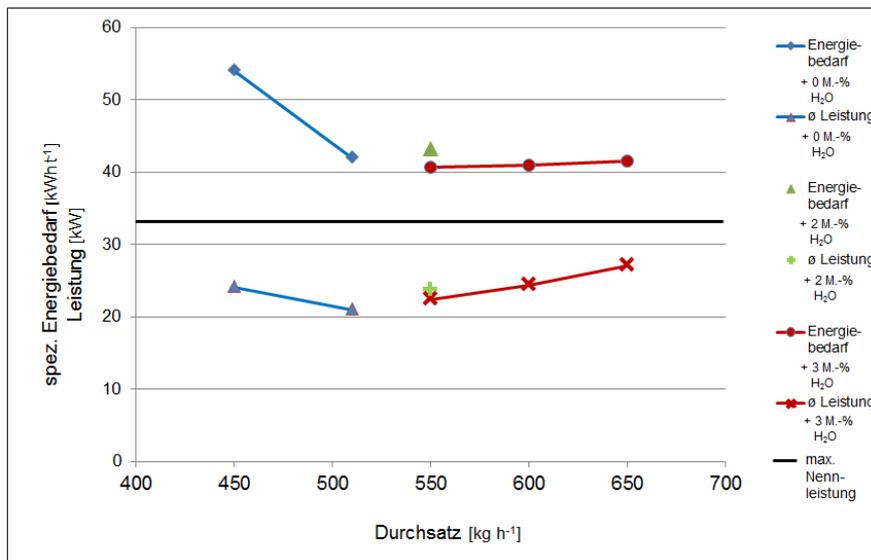


Abbildung 40: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (n=1)

Im Gegensatz zu den Werten des in Kapitel 4.3.1.2 beschriebenen Versuches führt eine Wasserzugabe zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Paulownia. Den höchsten spezifischen Energiebedarf zeigt die Variante mit 0 M.-% und einem Durchsatz von 450 kg h^{-1} auf. Dabei beträgt der Leistungsbedarf der Kollermühle 72% der maximalen Nennleistung. Die Erhöhung des Durchsatzes um 13% führt zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes um 22%. Parallel zu dieser Durchsatzerhöhung sinkt auch der Leistungsbedarf um 12%. Dieses Ergebnis steht ebenfalls im Widerspruch zu den Ergebnissen des Zerkleinerungsversuches mit Miscanthus, da bei allen anderen Varianten der Leistungsbedarf bei einer Erhöhung des Durchsatzes ansteigt. Weiterhin zeigt die Abbildung 40, dass eine Wasserzugabe von 2 M.-% es ermöglicht, den Durchsatz um 8% zu erhöhen, ohne dass es zu einer markanten Zunahme des spezifischen Energiebedarfes kommt. Eine weitere Erhöhung der Wasserzugabemenge auf 3 M.-% führt dazu, dass bei einem gleichbleibenden Durchsatz der Leistungsbedarf um 6% sinkt, was eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfes um 6% bewirkt. Zuletzt wurde der Durchsatz in zwei Stufen um jeweils 50 kg h^{-1} angehoben. Diese lineare Durchsatzsteigerung, unter Beibehaltung der Wasserzusatzmenge von 3 M.-%, führt zu einem linear ansteigenden Leistungsbedarf, was wiederum eine geringfügige Anhebung des spezifischen Energiebedarfes verursacht. Im Vergleich zu der Variante mit einem Durchsatz von 550 kg h^{-1} hat die Variante mit einem Durchsatz von 650 kg h^{-1} einen um 2% höheren spezifischen Energiebedarf von 42 kWh t^{-1} . Im gleichen Zug erhöht sich der Leistungsbedarf um 22% auf 82% der maximalen Nennleistung der Kollermühle.

Dieser Versuch zeigt, dass die Zerkleinerung von Paulownia mit einer Ausgangsfeuchte von 9,2 M.-% einen geringeren spezifischen Energiebedarf aufweist, wenn während der Zerkleinerung Wasser zugeführt wird. Des Weiteren ist dargestellt, dass die Variante mit 3 M.-% Wasserzugabe mit einem Durchsatz von 550 kg h^{-1} und 600 kg h^{-1} den geringsten spezifischen Energiebedarf hat. Jedoch führt bei der gleichen Wasserzugabemenge eine Erhöhung des Durchsatzes auf 650 kg h^{-1} nur zu einer minimalen Anhebung des spezifischen Energiebedarfes.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Paulownia in Bezug auf die Zerkleinerung mittels Kollermühle bei einem geringeren Durchsatz, einen signifikant höheren Leistungsbedarf als Miscanthus hat (siehe Abb. 41).

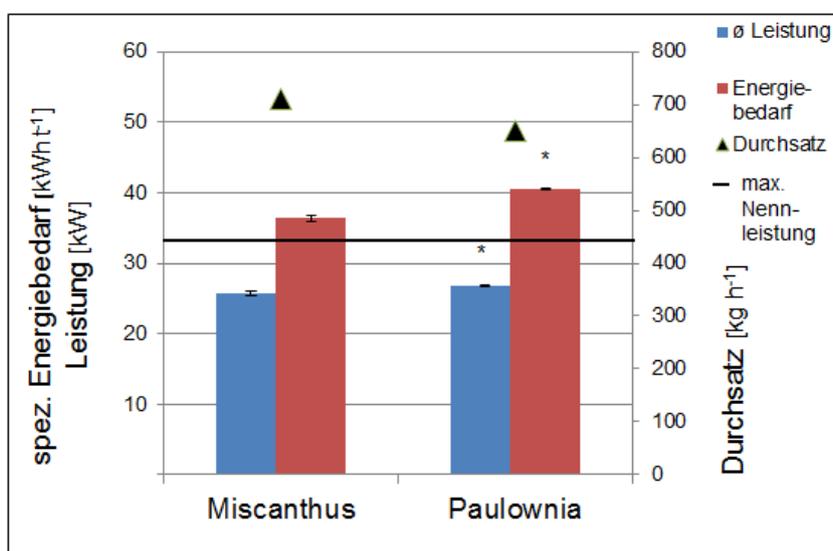


Abbildung 41: Spezifischer Energie- bzw. Leistungsbedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes der Zerkleinerung von Paulownia und Miscanthus mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuchsjahr 2012) (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

Daraus resultiert, dass der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia-Hackschnitzeln größer ist als der von Miscanthus-Häckseln. Allerdings verringert, im Gegensatz zu Miscanthus, die Zugabe von Wasser den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia.

4.3.3.3 Zerkleinerungsversuche von Holz mittels Zerkleinerung

Der Zerkleinerungsversuch von Fichten-Holz mittels Zerkleinerung konnte aus technischen Gründen mit der zur Verfügung stehenden Anlage nicht durchgeführt werden. Zu Beginn des Versuches brachen die Sägeblätter.

4.4 Eigenschaften der Mischpellets und deren Produktion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu der Brennstoffanalyse, der Pelletierung und der Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpellets dargestellt. Des Weiteren wird aufgezeigt, inwiefern das Additiv Kaolin das Ascheschmelzverhalten der Mischpellets beeinflusst, und ob Traubentrester ein geeignetes Additiv für die Mischpelletproduktion ist.

4.4.1 Brennstoffeigenschaften der Mischpellets

Die Tabelle 19 beschreibt die Ergebnisse der in Labor I durchgeführten Analyse der Brennstoffeigenschaften von Mischpellets aus 50 M.-% Miscanthus, 50 M.-% Paulownia und einem Zuschlag von 1 M.-% Trester.

In Bezug auf den Aschegehalt (1,45 M.-%), den Stickstoffgehalt (0,3 M.-%) und den Brennwert (19,3 MJ kg⁻¹) können die Mischpellets die Anforderungen der Pelletnorm erfüllen. Dagegen liegen der Schwefel- und Chlorgehalt der Pellets über den Grenzwerten der Pelletnorm.

Tabelle 19: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT von Mischpellets mit einem Miscanthus- und Paulownia- Gehalt von jeweils 50 M.-% und einem Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester im Vergleich zu der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2), *Umrechnung Heizwert (Hu) zu Brennwert nach KALTSCHMITT et al. (2009) (n≤4)

Parameter	Mischpellet	Pelletnorm
Aschegehalt [M.-% (TM)]	1,45	≤ 1,5
Stickstoffgehalt [M.-% (TM)]	0,3	≤ 0,5
Schwefelgehalt [M.-% (TM)]	0,1	≤ 0,03
Chlorgehalt [M.-% (TM)]	0,03	≤ 0,02
Brennwert (Ho) [MJ kg ⁻¹]	19,3	17,5* – 21*
Ascheerweichungstemperatur (DT) [°C]	915 ^{opt.}	≥ 1.100

Die Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens der Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia nach optischer Methode ergab, dass die Ascheerweichungstemperatur (DT) der Pellets mit 915°C, 100°C unterhalb der DT von Miscanthus und knapp 400°C unter der DT von Paulownia liegt. Des Weiteren wird in der folgenden Abbildung die DT der Mischpellets den DTs der beiden Mischungspartner Paulownia und Miscanthus gegenübergestellt.

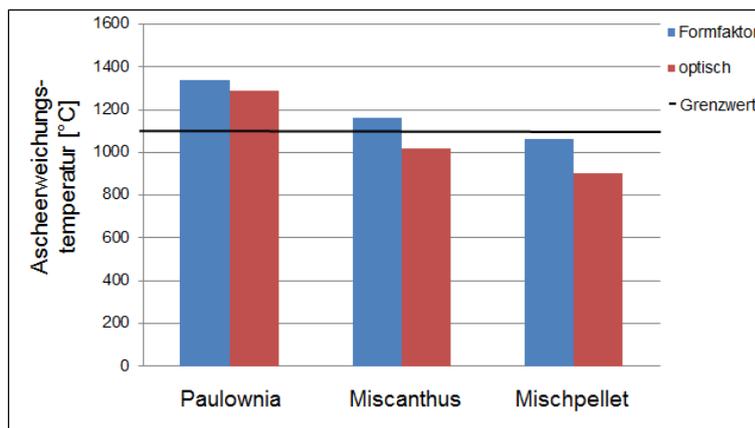


Abbildung 42: Ascheerweichungstemperaturen (bestimmt nach Formfaktor- und optischer Methode) von *Paulownia tomentosa*, *Miscanthus x giganteus* (34 Kenn 8. J.) und Mischpellets aus den beiden Biomassen (n=2)

Die Analyseergebnisse nach Formfaktor-Methode liegen bei allen drei Varianten zwischen 50 und 140°C über den Werten nach optischer Methode. Jedoch wird auch bei der Bestimmung der Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets nach Formfaktor-Methode der Grenzwert von 1.100°C nicht erreicht.

4.4.2 Einfluss von Kaolinzugaben auf die DT der Mischpellets

Am Beispiel von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets sollte gezeigt werden, wie sich eine Kaolinzugabe auf das Ascheerweichungsverhalten von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets auswirkt. Um konditionierungsbedingte methodische Fehler auszuschließen, wurden verschiedene Gemischformen mit Kaolin untersucht. Diese Gemischformen waren Mischpellets, denen das Kaolin schon vor dem Pelletieren zugegeben wurde, das gleiche Gemisch in unpelletierter Form und die Asche des Gemisches, der erst nach Veraschung das Kaolin beigemischt wurde.

Die Abbildung 43 verdeutlicht, wie bei den verschiedenen Gemischformen eine Erhöhung der Kaolinbeimischung die DT verändert. Durch die optische Bestimmung der DT der verschiedenen Varianten mittels LEM stellte sich heraus, dass eine Erhöhung des Kaolinzusatzes bei jeder Gemischform zu einer höheren DT führt. Die DT der verschiedenen Gemischformen ohne Kaolin liegen bei 900°C bis 950°C. Schon die Zugabe von 0,25 M.-% Kaolin führt – je nach Gemischform – zu einem Anstieg der DT auf 1.100°C bis 1.180°C, sodass der Grenzwert der EN_{plusA2} erreicht wird. Die höchsten Ascheerweichungstemperaturen haben die drei Gemischformen, welchen 1 M.-% Kaolin beigemischt wurde (1.320°C bis 1.450°C). Mit Ausnahme der Variante 0 M.-% Kaolin hat die Variante Brennstoffgemisch bei allen Varianten eine niedrigere DT als die anderen beiden Gemischformen.

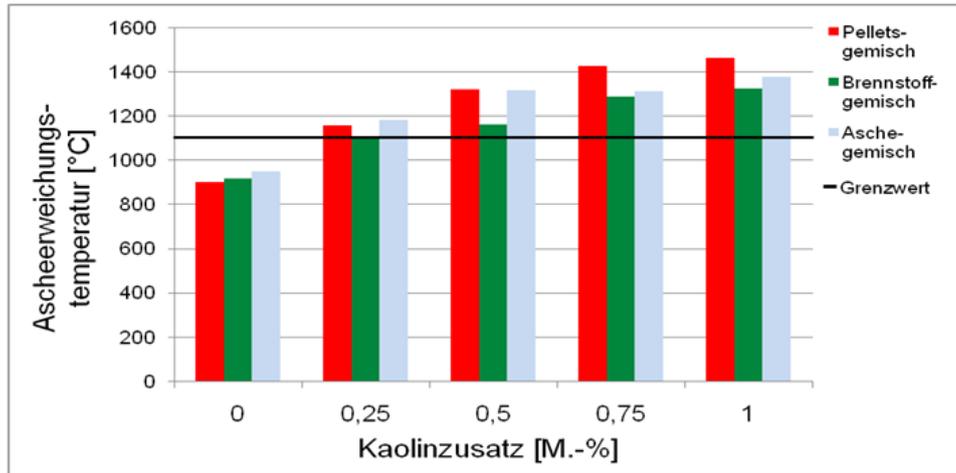


Abbildung 43: Ascheerweichungstemperaturen (bestimmt nach optischer Methode) von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN_{plusA2} Pellets (n=2)

4.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe

Tabelle 20 zeigt, dass Melasse aus Zuckerrüben den höchsten und Stärke den niedrigsten Aschegehalt aufweist. Der Aschegehalt des Traubentresters liegt mit 5,4 M.-% genau dazwischen und 3,9 M.-% über dem Grenzwert der Pelletnorm.

Tabelle 20: Aschegehalte der Additive Melasse, Traubentrester und Stärke (n=6)

Biomasseart	Melasse	Traubentrester	Stärke
Aschegehalt [M.-%] (TM)	10,5	5,4	≤ 0,1

Die Ergebnisse der Prüfung zur Eignung von Traubentrester als Presshilfsstoff sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt. Abbildung 44 zeigt dabei auf, dass der Zuschlag von 1 M.-% den Leistungs- und den spezifischen Energiebedarf des Pressvorgangs um jeweils 9% signifikant verringert. Die Analyse der physikalischen Qualitätsparameter zeigt, dass eine Tresterzugabe von 1 M.-% keine signifikante Veränderung der Abriebfestigkeit und Schüttdichte zur Folge hat (siehe Abb. 45). Beide Varianten erfüllen die Anforderungen der Norm.

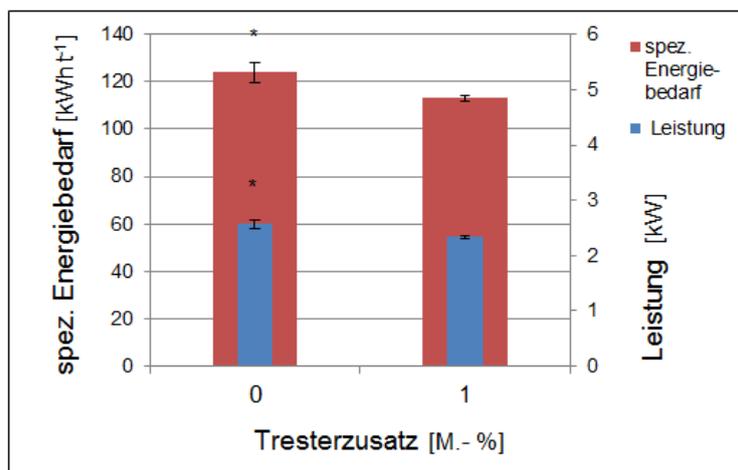


Abbildung 44: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* und Paulownia mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei Zugabe von 0 M.-% und 1 M.-% Traubentrester (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

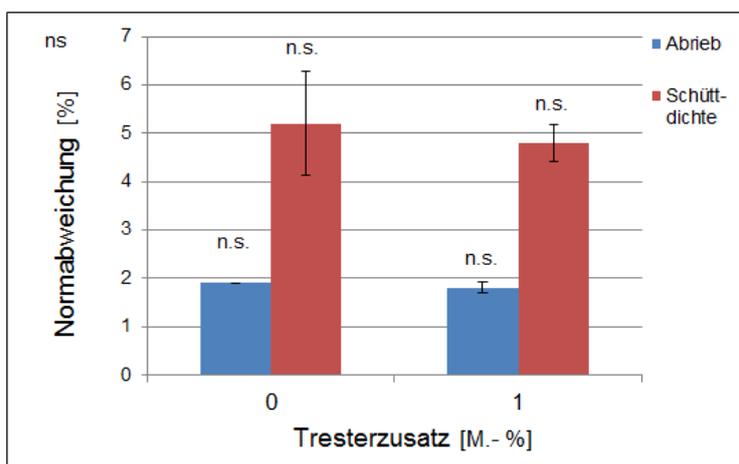


Abbildung 45: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der Miscanthus-Paulownia- Pellets ohne und mit 1 M.-% Traubentrester (Signifikanz: t-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

4.4.4 Pelletierungspraxisversuch

In dem folgenden Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse des Vorversuches aus Kapitel 3.4.4.1 dargestellt.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden im weiteren Verlauf des Praxisversuches die Maschineneinstellungen angepasst. Die Beurteilung der jeweiligen Güte der Einstellungen erfolgte anhand des Durchsatzes, der visuellen Qualität der Pellets und des spezifischen Energiebedarfes.

Im zweiten Teil werden dann die Ergebnisse des Hauptversuches erläutert.

4.4.4.1 Tastversuch

Aus der folgenden Tabelle (Versuchsnr. 1 – 5) und Abbildung 46 geht hervor, welche Modifikation der Pelletpresse die beste Pelletqualität und den geringsten spezifischen Energiebedarf bei möglichst maximalem Durchsatz während der Pelletierung des Gemisches von *P. tomentosa* und Miscanthus zur Folge hat. Des Weiteren zeigen die Versuchsnummern 6 – 8 welche Presskanalverhältnisse für die Pelletierung des Gemisches aus Fichte und Miscanthus geeignet sind.

Tabelle 21: Visuelle Qualität und Temperatur der Pellets (T_P) aus den beiden Gemischen von *M. x g.* und Paulownia bzw. Miscanthus (34 Kenn 8. J.) und Fichte mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin, die während des Vorversuches produziert wurden, in Abhängigkeit von Durchsatz bzw. Presskanalverhältnis bei einem d_{Loch} von 6 mm ($n=1$)

Nr.	Variante	Biomasse	$d_{Loch} : L_{Presskanal}$	Durchsatz [kg h ⁻¹]	Visuelle Qualität	T_P [°C]
1	2	<i>M. x g.</i> + <i>P. t.</i> + Ka	1 : 7	250	3	80
2	2	<i>M. x g.</i> + <i>P. t.</i> + Ka	1 : 7	290	3	86
3	2	<i>M. x g.</i> + <i>P. t.</i> + Ka	1 : 7	350	2	91
4	2	<i>M. x g.</i> + <i>P. t.</i> + Ka	1 : 7	385	2	93
5	2	<i>M. x g.</i> + <i>P. t.</i> + Ka	1 : 7	400	1	95
6	4	<i>M. x g.</i> + Fichte + Ka	1 : 7	350	-	-
7	4	<i>M. x g.</i> + Fichte + Ka	1 : 6	350	-	-
8	4	<i>M. x g.</i> + Fichte + Ka	1 : 5	390	1	86

Die Versuchsnummern 1 bis 5 (Gemisch aus *M. x g.* und *P. tomentosa*) zeigen, dass bei Einsatz einer 6 mm Lochmatrize mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 7 die visuelle Qualität der Pellets mit steigendem Durchsatz erhöht wird. Gleichzeitig sinkt mit zunehmendem Durchsatz der spezifische Energiebedarf bis zu dem Punkt, an welchem der Leistungsbedarf der Pelletierung knapp 90% der maximalen Nennleistung des Elektromotors beträgt (siehe Abb. 46).

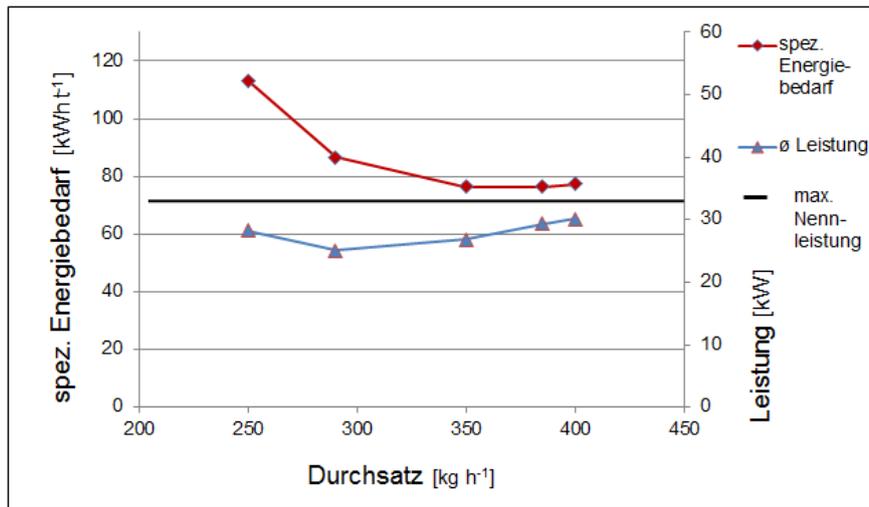


Abbildung 46: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung des Gemisches *M. x g.* (34 Kenn 8. J.) und *P. tomentosa* mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin bei verschiedenen Durchsätzen ($n=1$)

Bei der Pelletierung des Gemisches aus Miscanthus und Paulownia zeigt sich, dass die Versuchsnummer 4 (siehe Abb. 47) bei möglichst hohem Durchsatz (385 kg h^{-1}) und geringst möglichem spezifischen Energiebedarf (76 kWh t^{-1}) die besten Pelletierungseigenschaften hat.



Abbildung 47: Optimierte Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die unter den in Tabelle 11 (Versuchsnummer 4) dargestellten Bedingungen, während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden

Die visuelle Qualität der Pellets dieser Versuchsnummer wurde lediglich mit 2 bewertet. Bei der Pelletierung des Gemisches aus *M. x g.* und Fichte mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin zeigte sich, dass eine 6 mm Lochmatrize mit dem Presskanalverhältnis von 1 : 7 zu einem Verstopfen der Matrize führte. Daraufhin wurde der Versuch abgebrochen. Aus Tabelle 23 geht weiterhin hervor, dass der Einsatz einer Matrize mit einem Presskanalverhältnis von

1 : 6 ebenfalls zu Verstopfungen führte. Erst mit einer 6 mm Matrize und einem Presskanalverhältnis von 1 : 5 konnte ein konstanter Materialdurchfluss gewährleistet werden. Die so produzierten Miscanthus-Fichten-Pellets weisen eine gleichmäßige Form mit einer sehr gut verglasten Oberfläche auf (siehe Abb. 48).



Abbildung 48: Miscanthus-Fichten-Mischpellets, die unter den in Tabelle 11 (Versuchsnummer 8) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden

4.4.4.2 Hauptversuch

Auf Grundlage der Ergebnisse des Vorversuches wurden die vier Gemischvarianten von *M. x g.* und *P. t.* bzw. *M. x g.* und Fichte pelletiert. Dabei zeigt sich, dass die Pelletierung der Variante Miscanthus und Paulownia ohne Kaolin mit 72 kWh t^{-1} den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf hat. Der spezifische Energiebedarf der Pelletierung der Variante Paulownia bzw. Fichte mit Miscanthus und Kaolin unterscheidet sich nicht signifikant. Dieser liegt mit knapp 75 kWh t^{-1} 12% signifikant unter dem spezifischen Energiebedarf der Pelletierung des *M. x g.*-Fichten-Gemisches (85 kWh t^{-1}). Folgende Abbildung stellt die Ergebnisse der Messungen des spezifischen Energiebedarfes der Pelletierung zusammenfassend dar.

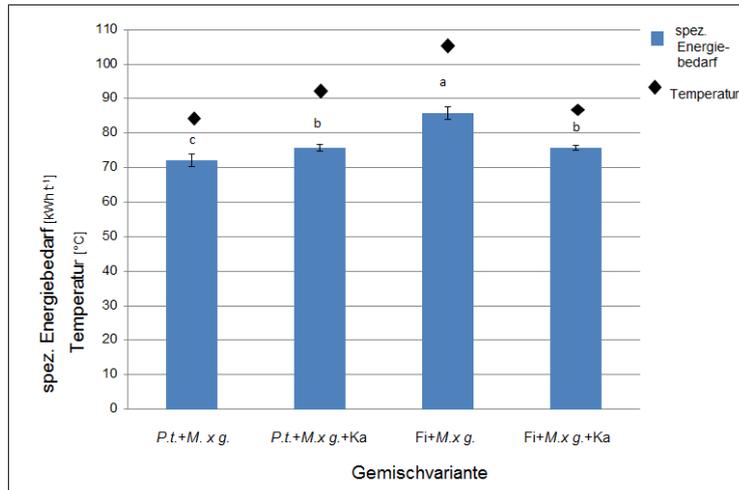


Abbildung 49: Spezifischer Energiebedarf der Pelletierung und Pellettemperatur der in Tabelle 23 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl (n=1)

Die Analyseergebnisse von Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Pellets, die während des Hauptversuches produziert wurden, sind in der Abbildung 50 aufgezeigt. Von allen vier Varianten hat die Variante *M. x g.* und Fichte ohne Kaolinbeimischung (*Fi + M. x g.*) die besten physikalischen Eigenschaften, da sowohl Abriebfestigkeit und Schüttdichte über den Anforderungen der Norm liegen. Die Variante *M. x g.* und Paulownia mit Kaolinbeimischung (*P. t. + M. x g. + Ka*) erfüllt ebenfalls die Anforderungen der Pelletnorm, allerdings ist die Schüttdichte signifikant geringer als bei der Variante (*Fi + M. x g.*). Die beiden Varianten *P. t. + M. x g.* und *Fi + M. x g. + Ka* erfüllen nicht die physikalischen Anforderungen der Pelletnorm.

Dabei zeigt die Variante *Fi + M. x g. + Ka* die signifikant geringste Abriebfestigkeit. Die Variante *P. t. + M. x g.*, bei welcher als einzige Variante beide Parameter unter den Anforderungen der Pelletnorm liegen, hat die signifikant geringste Schüttdichte.

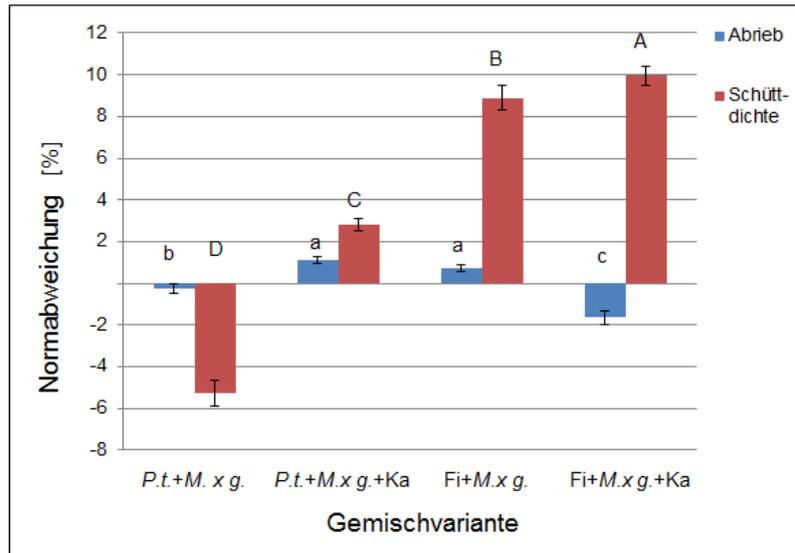


Abbildung 50: Abriebfestigkeit (0% = 97,5 M.-%) und Schüttdichte (0% = 600 kg m⁻³) der in Tabelle 23 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl in Relation zu dem Norm-Grenzwert. (Signifikanz: ANOVA, Tukey-HSD-Test, ($p \leq 0,05$), $n=4$)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Pelletierung der Variante **Miscanthus und Paulownia ohne Kaolin** den geringsten spezifischen Energiebedarf aufweist, aber die Pellets die schlechtesten physikalischen Eigenschaften haben. Dagegen benötigt die Variante **Miscanthus und Paulownia mit Kaolin** etwas mehr Energie für die Pelletierung, wobei die Pelletierung dafür aber auch beide physikalischen Anforderungen erfüllt. Die Variante **Miscanthus und Fichte ohne Kaolin** hat die besten physikalischen Eigenschaften aber den signifikant höchsten Energiebedarf.

4.4.5 Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

4.4.5.1 Gewinn und interne Rendite

Die Darlegungen aus Kapitel 3.4.5.1 ergeben bei einer theoretischen Produktionsmenge von 10.000 t a⁻¹ Produktionskosten von rund 1,84 Mio. € und einen Erlös von 1,61 Mio. €.

Bei einem statischen Preisniveau der Produktionskosten und Erlöse ergibt die Gewinnrechnung, dass die Unternehmung einen jährlichen Verlust von 238.127 € erwirtschaften würde (siehe Abbildung 51).

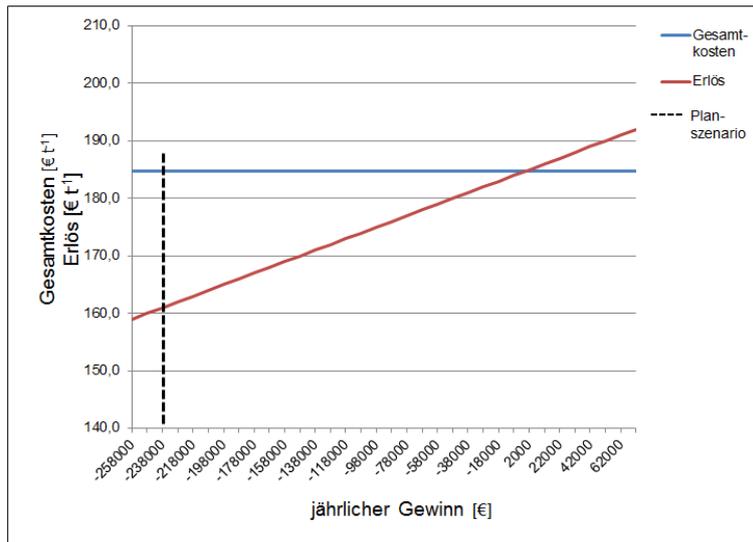


Abbildung 51: Gewinn der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von konstanten Gesamtkosten und variierendem Erlös in Relation zu dem Planszenario

Neben dem jährlichen Verlust der geplanten Unternehmung verdeutlicht die vorab dargestellte Graphik, dass bei gleichbleibenden Gesamtkosten der Marktpreis der Pellets mindestens $184,4 \text{ € t}^{-1}$ betragen muss, damit die Gewinnschwelle erreicht wird. Dies entspricht einer Marktpreissteigerung von knapp 15% je t Mischpellets. Die interne Rendite des geplanten Szenarios beträgt somit -12,9%.

Die folgende Abbildung soll verdeutlichen, wie hoch der Gewinn sein muss, um eine bestimmte Rendite für die geplante Unternehmung zu erzielen.

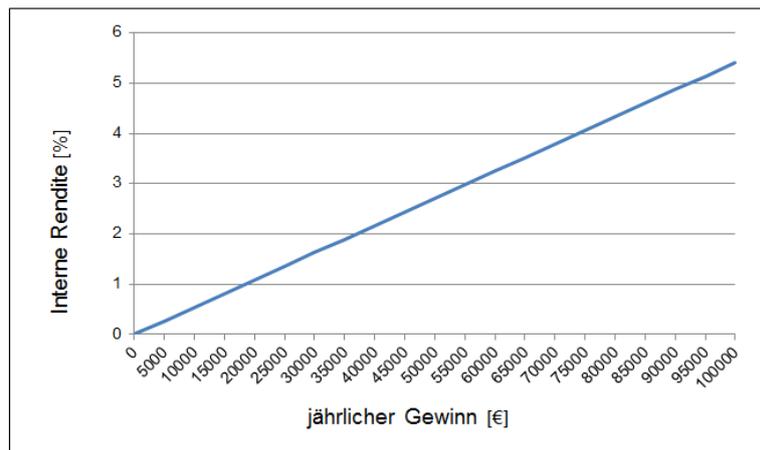


Abbildung 52: Interne Rendite der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit des jährlichen Gewinnes

Aus dieser geht hervor, dass die geplante Unternehmung einen Gewinn von 92.000 € erwirtschaften müsste, damit eine interne Rendite von 5% erreicht wird. Somit müsste die Mischpelletproduktion jährlich einen Erlös von rund 1.94 Mio. € erbringen.

Daraus resultiert, dass der Preis der Mischpellets mindestens 194 € t^{-1} betragen müsste, was einer Erlössteigerung von 20,5% entspricht.

4.4.5.2 Sensitivitätsanalyse

Kosten

In der folgenden Abbildung sind die Gesamtkosten der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Kostenpositionen unterteilt dargestellt.

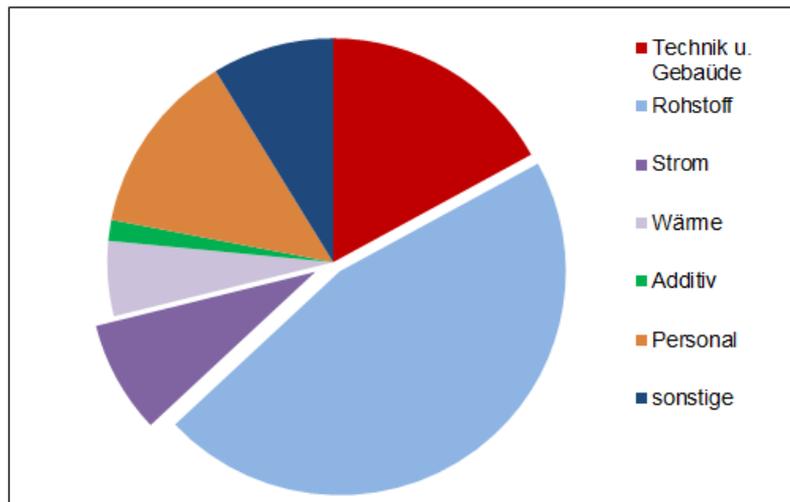


Abbildung 53: Anteil der verschiedenen Kostenpositionen an den Gesamtkosten der geplanten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

Bei näherer Analyse der Kosten wird ersichtlich, dass knapp die Hälfte der Gesamtkosten aus Rohstoffkosten besteht. Des Weiteren ist der Kostenfaktor Energie (elektrisch) mit 15 € pro t Mischpellets ein weiterer bedeutender Kostenfaktor.

Die folgenden beiden Abbildungen sollen verdeutlichen, inwieweit sich bei gleichbleibendem Erlös und konstanten sonstigen Gesamtkosten die Rohstoff- bzw. Energiekosten verringern müssten, damit der kritische Wert erreicht wird.

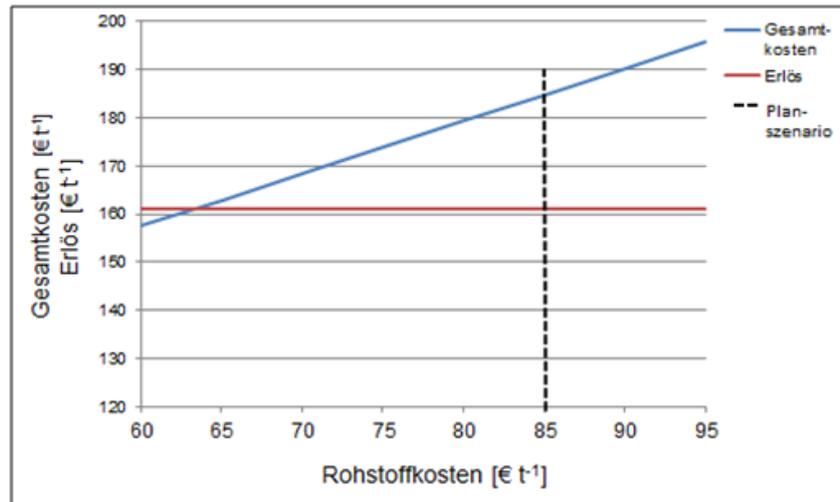


Abbildung 54: Ermittlung des kritischen Wertes (Gewinnschwelle) des Planszenarios der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von variierenden Rohstoffkosten und einem konstanten Erlös

Abbildung 54 zeigt, dass die Rohstoffkosten um 25% auf $63,5 \text{ € t}^{-1}$ sinken müssten, damit der kritische Wert, der die Gewinnschwelle darstellt, erreicht wird.

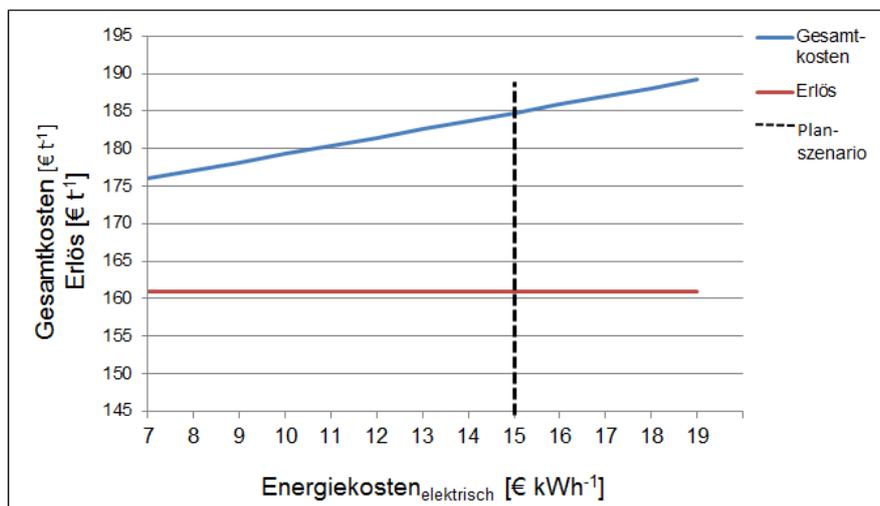


Abbildung 55: Gesamtkosten der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit der elektrischen Energiekosten bei konstantem Erlös

Abbildung 55 verdeutlicht, dass die Unternehmung bei einer Reduktion der Stromkosten um 50% immer noch einen Verlust erwirtschaften würde.

Erlös

Neben den Kosten der Mischpelletproduktion bestimmt der Erlös aus dem Verkauf der Pellets den Gewinn.

Die folgenden beiden Abbildungen stellen bei konstanten Kosten dar, welche Faktoren der Erlösbildung den Gewinn beeinflussen.

Zum einen wird der Erlös und somit auch der Gewinn durch den angenommenen Marktpreis der Mischpellets bestimmt. Wie in Abbildung 56 dargestellt, dürfte der Marktpreis der Mischpellets maximal 20% niedriger sein, als der von EN_{plusA1}-Pellets (bei einem aktuellem Marktpreis von 230 € t⁻¹), damit die Unternehmung einen Gewinn erwirtschaften kann.

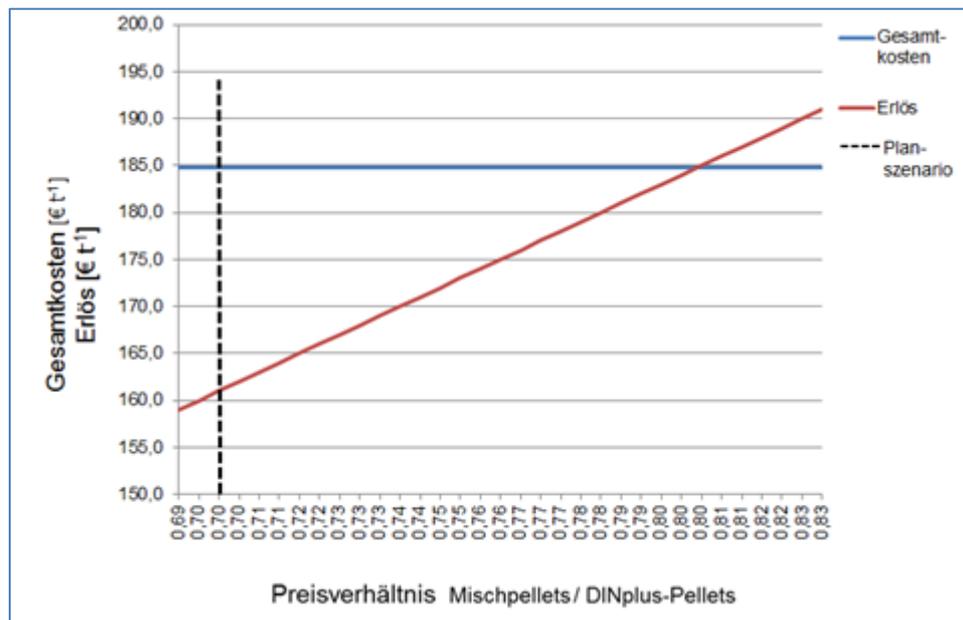


Abbildung 56: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

Somit beträgt der kritische Wert des Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion 0,8.

Zum anderen ist der Erlös von dem aktuellen Marktpreis der EN_{plusA1}-Pellets abhängig. Die nachfolgende Abbildung beschreibt für die Mischpelletproduktion - bei konstanten Gesamtkosten - den kritischen Wert des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets. Dabei wurden, wie in Kapitel 4.8.1 dargelegt, für die Bestimmung des Marktpreises der Mischpellets ein Preisverhältnis Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets von 0,7 angenommen.

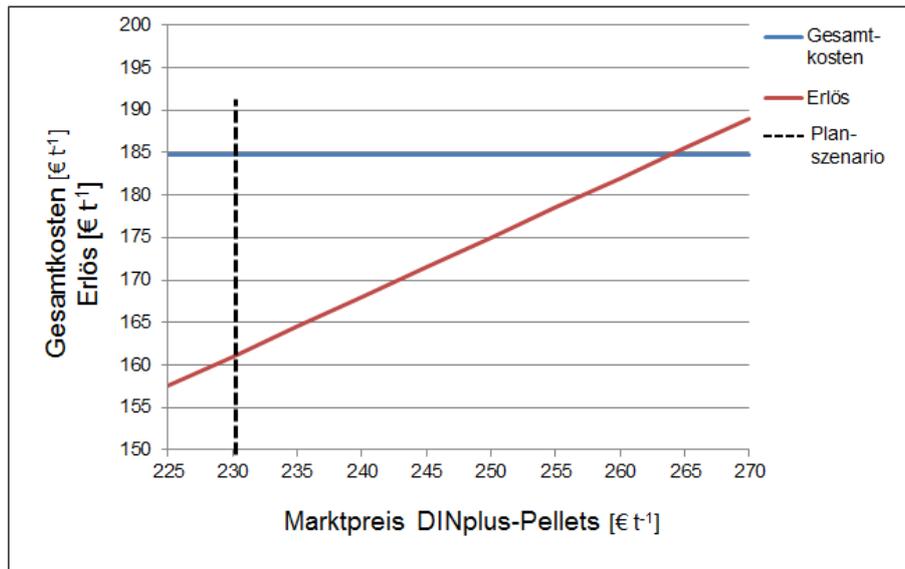


Abbildung 57: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

Es kann festgestellt werden, dass der Marktpreis für EN_{plusA1}-Pellets um 14,5% auf 263,5 € t⁻¹ ansteigen müsste, damit das Planszenario die Gewinnschwelle erreicht.

5. Diskussion

5.1 Eignung von *Miscanthus x giganteus* für die Mischpelletproduktion

Das erste Kapitel der Diskussion erörtert anhand der Ergebnisse der Brennstoffanalysen und der Pelletierungsversuche, ob die Biomasse der umweltverträglichen „low input“- Kultur *Miscanthus* ein geeigneter Rohstoff für die Pelletproduktion ist.

5.1.1 Einfluss ausgewählter kulturtechnischer Faktoren auf die Brennstoffqualität

Dieses Unterkapitel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt wird anhand des Aschegehaltes, der laut FRITZ und FORMOWITZ (2009) ein Indiz für die Gehalte von verbrennungskritischen Elementen wie Stickstoff, Chlor oder Schwefel ist, der Einfluss verschiedener kulturtechnischer Faktoren auf die allgemeine Brennstoffqualität diskutiert.

Im zweiten Abschnitt werden nähergehend die verbrennungstechnischen Eigenschaften von *Miscanthus* diskutiert.

5.1.1.1 Aschegehalt

In den Versuchen zeigte sich, dass der Aschegehalt von *Miscanthus* unter anderem von den Faktoren Standort, Genotyp, Bestandsalter und Erntejahr abhängig ist (Abbildung 17). Generell ist aus den Analyseergebnissen zu erkennen, dass einige Varianten Aschegehalte unter 2% aufweisen.

Im Allgemeinen werden die Aschegehalte von *Miscanthus x giganteus* mit 2,6 bis 3,9% angegeben (FRITZ und FORMOWITZ, 2009; KALTSCHMITT et al., 2009.; KRISTÖFEL und WOPIENKA, 2012). Dagegen hat einer der hier untersuchten Typen (Misc. 17 (2010), siehe Abb. 14) einen Aschegehalt von 1,6%. Die Untersuchungsergebnisse decken sich mit einigen neueren Veröffentlichungen. So zeigen STOLZENBURG und MASTEL (2010) oder auch SCHWARZ und RAUTENBERG (2011), dass *Miscanthus x giganteus* Aschegehalte von 1,5% – 2% aufweisen kann. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass die Aschegehalte von *Miscanthus* niedriger sein können als bisher angenommen. Folgerichtig ist es sinnvoll, nähergehend Faktoren der Akkumulation mineralischer Bestandteile im *Miscanthus* zu beleuchten.

BAXTER et al. (2012) beschreiben, dass der Erntezeitpunkt einen sehr hohen Einfluss auf den Aschegehalt hat. Dabei gilt, dass spätere Erntezeitpunkte zu niedrigeren Aschegehalten führen. Dies ist nach BAXTER et al. (2012) auf den geringeren Blattanteil späterer Ernten zurückzuführen. In diesem Kontext beschreibt PUDE (2005), dass in den Blättern ein Großteil der Nährstoffe gespeichert ist, was negative Auswirkungen auf die Verbrennungs-

eigenschaften von *Miscanthus* hat. Dazu stellen CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002) fest, dass ein späterer Erntetermin den Asche-, Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte von *Miscanthus* reduziert.

Somit ist zu vermuten, dass das Blatt- / Stängelverhältnis, das unter anderem durch den Erntezeitpunkt beeinflusst wird, ein Indiz für die Abschätzung des Aschegehaltes und dadurch auch für Verbrennungseigenschaften, wie z. B. den Chlorgehalt sein kann. Diese Annahme wird auch durch RÖHRICHT et al. (2002) bestätigt. Im Rahmen deren Untersuchungen wurde *Miscanthus* mit einem Wassergehalt von 34% geerntet. Dieser *Miscanthus*, der zum Zeitpunkt der Ernte noch eine hohe Blattmasse aufwies, zeigte sehr hohe Aschegehalte. Diese Vermutung wurde durch die Untersuchungen von SUSSYK (2012) bestätigt, da in dessen Untersuchungen der Aschegehalt positiv mit dem Blattanteil korrelierte. Im Besonderen untersuchte dieser 2012 die verschiedenen *M. x g.* Genotypen des Standortes CKA. Somit kann bestätigt werden, dass das Blatt- / Stängelverhältnis der ausschlaggebende Grund für die Unterschiede der Aschegehalte ist.

Neben dem Erntezeitpunkt beeinflussen laut BAKKER und ELBERSON (2005) weitere Faktoren das Blatt- / Stängelverhältnis. Diese sind Bestandsalter, Genotyp, Standort und kulturtechnische Maßnahmen.

In Abbildungen 14 und 16 (siehe Kapitel 4.1.1.1) wird aufgezeigt, dass die Aschegehalte eines *M. x g.*- Typs zwischen dem 1. – 3. Vegetationsjahr bis zu 1,6% variieren können. Die weiteren Ergebnisse weisen darauf hin, dass diese Unterschiede multifaktoriell hervorgerufen werden. Dazu postulierten CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002), dass unterschiedliche Aschegehalte eines Typs neben dem Erntezeitpunkt primär durch das Bestandsalter beeinflusst werden. Bei nähergehender Betrachtung der eigenen Ergebnisse kann diese These nicht gänzlich aufrechterhalten werden. Am Beispiel der *Miscanthus*bestände in Kenn, die sich im Bestandsalter unterschieden (siehe Abb. 16, Kap. 4.1.1.1), zeigt sich, dass der Aschegehalt bei unterschiedlich alten Beständen weniger als 1 M.-% variiert. Diese Tendenz wird ebenfalls durch einen Vergleich der Typen de 34 (CKA vs. DKH) in Abbildung 15 deutlich. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Witterungsbedingungen während des Jahres vor der Ernte einen starken Einfluss auf den Aschegehalt und die damit verbundenen Brennstoffqualität von *Miscanthus* hatten. Diese Vermutung wird durch die Untersuchungen von ATIENZA et al. (2003) gestützt, da diese ebenfalls annehmen, dass die Umweltbedingungen sehr stark auf die Qualität von *Miscanthus* wirken. Die Vermutung, dass die Jahreswitterungsbedingungen und somit das Erntejahr einen stärkeren Einfluss auf den Aschegehalt haben als das Bestandsalter, lässt sich aus Abbildung 17 ableiten, da über alle Typen hinweg bei steigendem Bestandsalter der Aschegehalt nicht konstant abnimmt. Der weitere Anstieg der Aschegehalte über die Jahre kann damit erklärt werden, dass im Winter 2010/2011 die sehr lang anhaltende

Schneebedeckung einen Windschutz bildete, der den Blattfall reduzierte. Zusätzlich könnten die Schneebedeckung und mangelnder Niederschlag dazu geführt haben, dass es nicht zu Auswaschungen von Mineralstoffen aus den Blättern kam. Dieser Effekt, der auch als „leaching“ bezeichnet wird, ist laut LEWANDOWSKI und HEINZ (2003) ein wichtiger Faktor, der die Gehalte von K und Cl reduziert. Im Gegensatz zum vorherigen Vegetationsjahr waren Herbst und Frühwinter 2011/2012 überdurchschnittlich warm (ANONYMUS 6, 2012), was vermutlich eine nur in begrenztem Maße stattgefundenene Rückverlagerung von Nährstoffen zur Folge hatte. PUDE et al. (1997) beschreiben, dass eine frühe Seneszenz im Herbst mit einer Rückverlagerung von Nährstoffen aus den oberirdischen Organen in die Rhizome einhergeht. Dazu beobachteten CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2000), dass höhere Temperaturen (8 - 12°C) diese Abreife einschränken können.

Nach PUDE (2005) ist die Rückverlagerung von Nährstoffen ein weiterer Faktor, der den Gehalt an verbrennungstechnisch problematischen Elementen in Blatt und Stängel reduziert. Laut COSENTINO et al. (2007) wird durch diese Rückverlagerung primär N und P in die Rhizome zurückgeführt.

Da im Rahmen vorliegender Arbeit die Elemente K und P, die mit N einen Hauptbestandteil der Asche bilden (CHRISTIAN et al., 2008), nicht untersucht wurden, kann der Einfluss der jeweiligen Faktoren auf den Aschegehalt nicht nähergehend quantifiziert werden.

Aus den Ergebnissen vorliegender Arbeit kann zusammengefasst werden, dass die Aschegehalte der verschiedenen Varianten stärker durch das Erntejahr, als durch das Bestandsalter beeinflusst wurden.

Derzeit ist eines der Hauptthemenfelder der *Miscanthus*-forschung die Züchtung neuer Hybridsorten und Selektion von Genotypen (LEWANDOWSKI und KALININA, 2012; MÜLLER-SÄMANN, 2012 und TIESSEN, 2012). Im Zusammenhang mit diesem Themengebiet sprechen unterschiedliche Autoren oft nur von verschiedenen Genotypen (CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI, 2002; LEWANDOWSKI und KALININA, 2012). Dabei muss aber beachtet werden, dass Genotypen verschiedene Herkünfte einer Art sind.

Die Untersuchungsergebnisse vorliegender Arbeit zeigen, dass sich die Aschegehalte der drei *Miscanthus x giganteus*-Herkünfte über die drei Erntejahre hinweg nur leicht voneinander unterscheiden. Die höchsten Schwankungen des Aschegehaltes der drei Genotypen innerhalb eines Jahres liegen bei einer Differenz von nur 0,4%. Auch CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002) untersuchten fünf verschiedene *Miscanthus x giganteus*-Genotypen. Aus deren Analyseergebnissen lassen sich ähnlich niedrige Schwankungen im Aschegehalt feststellen.

Im Allgemeinen sind diese Unterschiede vermutlich auf morphologische Unterschiede zurückzuführen, wobei das Blatt- / Stängelverhältnis dabei das wichtigste Kriterium darstellt. Sowohl PUDE (2005) als auch SUSSYK (2012) untersuchten die identischen Genotypen und

stellten dabei fest, dass sich diese in ihrer Morphologie tendenziell unterscheiden. Durch den Vergleich der Typen 17, 34 und 35 (siehe Abbildung 14) geht hervor, dass mit Ausnahme des Erntejahres 2012 der Typ 34 den signifikant höchsten Aschegehalt aufweist. 2010 und 2011 erfolgte jedoch keine Bestimmung des Blatt- / Stängelverhältnisses, sodass nicht geklärt werden kann, wodurch der Aschegehalt beeinflusst wurde. Erst 2012 untersuchte SUSSYK (2012) das Blatt- / Stängelverhältnis dieser Genotypen. Dabei zeigte sich, dass Typ 35, der auch den höchsten Aschegehalt aufwies, den höchsten Blattanteil hatte.

Aufgrund der durch die Erntejahre bedingten unterschiedlichen Ergebnisse kann nicht abschließend festgelegt werden, welcher Genotyp von *Miscanthus x giganteus* am besten für die Mischpelletproduktion geeignet ist. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der Genotyp einen Einfluss auf die Eignung von *Miscanthus* für die thermische Verwertung hat (CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI, 2002). Aus diesem Grund sollten zukünftige Forschungsarbeiten, in Hinblick auf die verbrennungstechnischen Merkmale, einen weiteren Fokus auf die Selektion von *M. x g.*-Genotypen legen. Mit Hilfe solcher zukünftiger Untersuchungen könnte die genetische Breite von *Miscanthus x giganteus*, der im Vergleich zu anderen Arten den höchsten Biomasseertrag aufweist (JORGENSEN, 1997 und JEZOWSKI et al., 2010), erweitert werden.

Der Einfluss des Standortes auf den Aschegehalt von *Miscanthus* ist ein bisher kaum erforschter Aspekt. Dennoch geht aus einigen Veröffentlichungen hervor, dass der Standort einen Einfluss auf den Aschegehalt von *Miscanthus* hat (LEWANDOWSKI und KICHERER, 1997 und LEWANDOWSKI und HEINZ, 2003).

Die in Kapitel 4.1.1.1 dargestellten Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass der Faktor Standort den Aschegehalt beeinflusst. Im Detail hatte im Jahr 2011 der Typ 34 einen um 1,5 M.-% höheren Aschegehalt als der Typ 34 Kenn 3. J. Dieser Unterschied kann durch zwei Faktoren bedingt sein. Zum einen könnten sich die Standorte durch die Höhe des Gehaltes an pflanzenverfügbaren Nährstoffen unterscheiden und zum anderen könnten klimatische Bedingungen die verschiedenen Aschegehalte beeinflusst haben. Aus Düngerversuchen von SCHWARZ et al. (1994) geht hervor, dass der Aschegehalt von *Miscanthus* nicht durch den Gehalt von pflanzenverfügbaren Nährstoffen beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass standortbedingte Nährstoffgehalte nicht der Grund für die unterschiedlichen Aschegehalte waren. Vielmehr ist zu vermuten, dass unterschiedliche Witterungs- und Bodenfeuchtebedingungen zu diesen Unterschieden geführt haben. So stellten LEWANDOWSKI und HEINZ (2003) fest, dass insbesondere die Wasserversorgung einen starken Einfluss auf den Gehalt von verbrennungstechnisch relevanten Elementen hat.

Für die im weiteren Verlauf der vorliegende Arbeit durchgeführten Zerkleinerungs- und Pelletierungsversuche wurde *Miscanthus* vom Typ 34 Kenn 8. J. ausgewählt. Gründe dafür lagen in dem geringen Aschegehalt (1,8 M.-%) und in der hohen Verfügbarkeit. Des Weiteren war dieser *Miscanthus*-Typ relativ fein gehäckselt (14 mm L_{Kante}). Diese geringe Häckselgröße sollte eine störungsfreie Weiterverarbeitung ermöglichen.

Neben den praktischen Erkenntnissen geht aus den Ergebnissen hervor, dass angenommen werden muss, dass der realistische Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus* in Höhe von 2 bis 2,5 M.-% liegt und durch die Faktoren Erntejahr, Standort, Genotyp und Bestandsalter beeinflusst wird. Weiterhin fasst die folgende Tabelle die eigens ermittelten Schwankungsbreiten der Aschegehalte in Abhängigkeit zu den jeweiligen Einflussfaktoren zusammen. Zusätzlich sind in dieser Tabelle aus anderen Untersuchungen Schwankungsbreiten des Aschegehaltes in Abhängigkeit des Einflussfaktors dargestellt.

Tabelle 22: Vergleich der Einflussfaktoren auf den Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus* der eigenen Untersuchungen mit Literaturwerten

Faktor	eigene Untersuchungen [%]	Literatur [%]
Erntejahr	75	72 - 30 ¹²³
Standort	52	60 ³
Genotyp	44	10 ²
Bestandsalter	21	
Quelle: ¹ SCHWARZ et al. (1994); ² CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002); ³ LEWANDOWSKI und HEINZ (2003)		

Der Vergleich zeigt, dass die Literaturwerte von den eigenen Erkenntnissen teilweise stark abweichen. Aus diesem Grund können in Hinsicht auf die Rohstoffauswahl keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden, welcher Faktor am stärksten den Aschegehalt beeinflusst. Generell ist davon auszugehen, dass das Blatt- / Stängelverhältnis den Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus* sehr stark beeinflusst. Dabei ist das Blatt- / Stängelverhältnis maßgeblich von den Faktoren Erntejahr, Standort, Genotyp und Bestandsalter abhängig. Allgemein sind möglichst geringe Blattanteile in der Biomasse zu empfehlen.

Es zeigt sich, dass in Bezug auf die Rohstoffqualität von *Miscanthus* für die Mischpelletproduktion, in jedem Erntejahr vermutlich mit variierenden Qualitäten gerechnet werden muss. Aus diesem Grund muss wahrscheinlich jedes Jahr das Mischungsverhältnis von *Miscanthus* und einem potentiellen Mischungspartner angepasst werden.

Dennoch geht aus den Untersuchungen die Empfehlung hervor, dass der *Miscanthus* für die Mischpelletproduktion von Ende März bis Anfang April geerntet werden sollte, da dann wie schon im Abschnitt Erntezeitpunkt beschrieben, der Blattanteil am geringsten ist.

Des Weiteren sollte bei der Ernte die Schnitthöhe so hoch sein, dass die abgefallenen Blätter, die sich teilweise in den Stängelhorsten sammeln, nicht miteingezogen werden.

Neben diesen allgemein gültigen Empfehlungen, die ebenfalls LEWANDOWSKI und HEINZ (2003) und BAXTER et al. (2012) geben, könnte der Blattanteil möglicherweise durch geringfügige Modifikationen der Erntetechnik reduziert werden. Eine theoretische Option wäre der Anbau von Gebläsen im Einzugsbereich der Einzugsorgane des Mähhäckslers, die einen Luftstrom erzeugen, um die Blattmasse von den Stängeln zu trennen, sodass diese nicht miteingezogen würde. Diese Problemstellung müsste jedoch durch zukünftige landtechnische Forschungen untersucht werden.

Weiterführend sollten zukünftig durch züchterische Maßnahmen blattarme *Miscanthus*-Typen selektiert werden, um allgemein die Brennstoffqualität von *Miscanthus* zu verbessern.

5.1.1.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften

Neben mechanischen Problemen im Bereich der Ascheaustragung aus dem Brennkessel, die aus zu hohen Aschegehalten der Pellets resultieren (KALTSCHMITT et al., 2009), können aufgrund der Rohstoffzusammensetzung weitere verbrennungstechnische Fragestellungen entstehen.

Unter anderem können aufgrund zu hoher Stickstoffgehalte emissionsrechtliche Grenzwerte überschritten werden (VAN LOO und KOPPEJAN, 2008). Weiterhin können zu hohe Schwefel- und Chlorgehalte direkt zu einer verstärkten Korrosion des Brennkessels führen (LENZ, 2010) und zusätzlich indirekt auf die Ascheerweichungstemperaturen wirken (WEI et al., 2005). Neben den Gehalten von Störelementen ist insbesondere das Ascheerweichungsverhalten von Biomassen ein bedeutendes Kriterium für deren störungsfreie Verbrennung (ÖHMANN et al., 2009; BAXTER et al., 2012; KARAMPINIS et al., 2012).

Der folgende Abschnitt diskutiert inwieweit Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt und Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Standort, Genotyp und Erntejahr variieren kann.

Die Bestimmung der Brennwerte von vier verschiedenen *Miscanthus x giganteus* Typen ergab, dass die Brennwerte nur minimal variieren (siehe Tabelle 13). Dabei liegen die Brennwerte alle innerhalb der Normwerte der DIN_EN 14961-2(A2).

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen von BIERTÜPFEL et al. (2011) und SCHNEIDER (2011). Daraus wird ersichtlich, dass Standort, Erntejahr und Genotyp nur minimalen Einfluss auf diesen Qualitätsparameter haben. Generell kann davon ausgegangen werden, dass Biomasse aus *Miscanthus x giganteus* in Bezug auf den Brennwert pelletnormkonform ist.

Abbildung 18 (Kapitel 4.1.1.2) zeigt, dass alle vier untersuchten *Miscanthus*-Varianten die Stickstoffgrenzwerte einhalten. Dagegen überschreitet *Miscanthus* generell die Grenzwerte

für Schwefel- und Chlorgehalte. Die Ergebnisse der Schwefelgehalts-Analysen sind infrage zu stellen, da diese bei allen Varianten 0,1% beträgt. Diese homogenen Schwefelgehalte sind vermutlich auf Analysegrenzen zurückzuführen, die durch die Untersuchungsmethode limitiert wurden. Allgemein weichen diese Werte von den bisherigen Literaturangaben ab. LEWANDOWSKI et al. (2000), RÖHRICHT et al. (2002), OBERNBERGER et al. (2006) BIERTÜPFEL et al. (2011) und SCHNEIDER (2011) ermittelten deutlich höhere Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte.

Die Differenz zwischen den eigenen Daten und den Angaben von LEWANDOWSKI et al. (2000) und RÖHRICHT et al. (2003) kann unter anderem durch den Zeitpunkt der Ernte erklärt werden. In den eigenen Untersuchungen wurden die *Miscanthus*-Varianten im April geerntet. Dagegen erfolgten die Ernten der beiden anderen Untersuchungen im Winter. Wie schon in Kapitel 5.1.1.1 aufgezeigt wurde, beschreiben CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002) und LEWANDOWSKI UND HEINZ (2003) den Erntezeitpunkt als einen wichtigen Einflussfaktor auf den Aschegehalt. Da der Gehalt an Stickstoff, Schwefel und Chlor in der Biomasse eng mit dem Aschegehalt korreliert (siehe Abb. 58), ist davon auszugehen, dass neben dem Standort, dem Bestandsalter und der Jahreswitterung der Erntezeitpunkt einen deutlichen Einfluss auf diese Werte hatte.

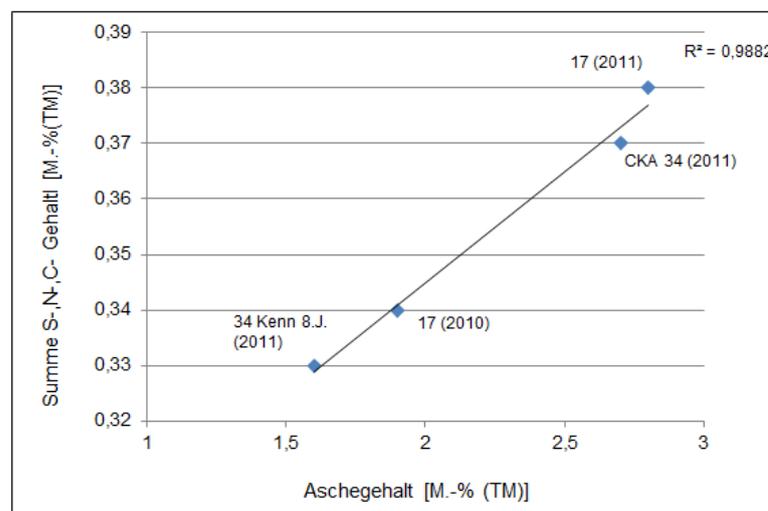


Abbildung 58: Korrelation zwischen Aschegehalt und Summe der Gehalte von Schwefel, Stickstoff und Chlor von verschiedenen *Miscanthus x giganteus* Typen

Des Weiteren kann durch den Vergleich der N-, S- und Cl- Gehalte der Varianten gefolgert werden, dass der Genotyp ebenfalls den Gehalt dieser Elemente beeinflusst. Da die Wirkung dieser Faktoren auf den Gehalt an verbrennungstechnisch problematischen Mineralstoffen bisher nicht untersucht worden ist, sollten weitere wissenschaftliche Arbeiten dies beleuchten.

Die vorliegenden Untersuchungen ergaben, dass die ermittelten Werte bereits im unteren Bereich der Literaturangaben liegen. In Bezug zu den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2(A2) bleibt bei allen vier *Miscanthus x giganteus*-Typen lediglich der Stickstoffgehalt unterhalb dieser Grenzwerte. Dagegen überschreiten, mit Ausnahme des Typs 34 Kenn 8. J. die Cl- und S- Gehalte aller Varianten die Grenzwerte um mehr als das Doppelte.

Generell ist es fraglich, ob die besonders kritischen S- und Cl- Gehalte durch weitere acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen reduziert werden können. Theoretisch könnte der Gehalt an Cl in der Biomasse durch einen künstlichen „leaching“- Effekt reduziert werden (TONN et al., 2011). Dieser Effekt bedeutet, dass abgeschnittener Miscanthus-Biomasse durch Wasser Chloride ausgewaschen werden. Dies könnte zum einen durch natürliche Niederschläge auf dem Feld erfolgen (MEEHAN et al., 2012) und zum anderen durch eine künstliche Bewässerung auf Mieten erreicht werden. Gegen diese Möglichkeit spricht jedoch, dass solche Maßnahmen in der Praxis noch nicht erprobt worden sind und andererseits die Erntekosten, die nach SIEVERDINGBECK et al. (2010) einen Großteil der Produktionskosten bestimmen, deutlich ansteigen würden. Aus diesen Gründen kann für die Produktion von Miscanthus für Mischpellets nur empfohlen werden, dass die Ernte erst Ende März bzw. Anfang April erfolgen sollte, da der Gehalt an Mineralstoffen zu diesem Zeitpunkt am geringsten ist (LEWANDOWSKI et al., 2003).

Die Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens von Miscanthus (Typ 34 Kenn 8. J.) nach optischer Methode ergab eine DT von 1.020°C. Damit liegt die DT des Miscanthus, die vergleichbar zu den Ergebnissen von CARVALHO et al. (2007) ist, unterhalb der von EN_{plusA2}- Pellets geforderten DT von 1.100°C (siehe Tabelle A2, Anhang).

Da die Verbrennung von Pellets in KFAs meist bei Brennraumtemperaturen von über 1.000°C stattfindet (KALTSCHMITT et al., 2009), muss davon ausgegangen werden, dass es bei der Verbrennung von Miscanthus in Mischpelletform zu Verschlackungen im Brennraum kommen kann. Die Verschlackungsneigung von Biomassen ist laut ÖHMANN et al. (2009) und JENKINS et al. (1998) auf das Alkali- bzw. Erdalkali- Verhältnis in Relation zum Siliziumgehalt zurückzuführen. Dabei kann bei hohen Siliziumgehalten eine Erhöhung des Kaliumgehaltes zu einer Verringerung der DT führen. Miscanthus enthält im Vergleich zu anderen Biomassen hohe Gehalte an Silizium (KARAMPINIS et al., 2012), welches primär im Blattanteil der Biomasse in Form von Kieselsäure ($\text{SiO}_{2(s)}$) gebunden ist (PUDE et al., 2005). RAMPEREZ-CARRASCO et al. (2012) beschreiben, dass eine Erhöhung des Kaliumgehaltes in Miscanthus zu einer Verringerung der DT führt. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von BAXTER et al. (2012), die für Miscanthus eine enge Korrelation zwischen Ascheerweichungstemperatur und K_2O - Gehalt ermittelten. Des Weiteren empfehlen diese und auch MONTI et al. (2008) als Optimierungsmaßnahme zur Erhöhung der DT, dass der

Miscanthus möglichst spät (Ende März) geerntet werden sollte, um die Blattmasse, in der Kalium akkumuliert wird, im Erntegut zu verringern.

Als eine weitere Strategie zur Minderung des Gehaltes von Alkali- und Erdalkalimetallen (K, Na und Ca) benennen JENKINS et al. (1998) das künstliche „leaching“, welches auch zur Reduktion des Cl-Gehaltes genutzt werden könnte. In dem vorherigen Abschnitt wurde jedoch schon aufgezeigt, dass diese Maßnahme unpraktikabel ist. Eine zusätzliche praktikable kulturtechnische Maßnahme zur Verringerung des Kaliumgehaltes ist jedoch, dass bei einer möglichen Ertragserhaltungsdüngung darauf geachtet werden sollte, keine Kaliumdünger einzusetzen. Aus Sicht der Ertragsbildung führt laut SMITH und SLATER (2010), bei einer ausreichenden N-Versorgung, eine Kaliumdüngung zu keiner Ertragssteigerung. Auf Grund der Ertragsbildung und der Brennstoffeigenschaften ist somit auf eine K-Düngung zu verzichten (CADOUX et al., 2012).

Zusätzlich zu dem negativen Einfluss von Kalium weisen BAXTER et al. (2012) darauf hin, dass insbesondere Calcium und Magnesium in einer Wechselwirkung mit Silizium die DT beeinflussen. Dies bestätigen auch die Analysedaten von MONTI et al. (2008) und MICHEL et al. (2012). Aus diesen Literaturquellen wird ersichtlich, dass genaue Wirkmechanismen der Ascheerweichung von Miscanthus bisher noch unzureichend untersucht worden sind.

Zwischenfazit

Die Untersuchungen der Brennstoffeigenschaften haben gezeigt, dass die Biomasse der „low input“-Kultur *Miscanthus x giganteus* mit Ausnahme des S-, des Cl-Gehaltes und der Ascheerweichungstemperatur die verbrennungsrelevanten stofftechnischen Anforderungen von EN_{plusA2}- Pellets erfüllen kann. Daher ist *Miscanthus x giganteus* potentiell für die Mischpelletproduktion geeignet.

Als allgemeine Optimierungsmaßnahme, zur Reduktion der S- und Cl-Gehalte in der Miscanthus-Biomasse und zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur wird empfohlen, die Ernte erst Ende März bzw. Anfang April durchzuführen. Zusätzlich sollte dem Bestand kein K in Form von Düngemitteln zugeführt werden, um die K-Akkumulation in der Pflanze zu verringern.

Eine generelle Empfehlung zu Genotyp- und Standortwahl kann nicht gegeben werden, da deren Einfluss auf die Brennstoffeigenschaften noch nicht ausreichend erforscht worden ist.

5.1.2 Pelletierungseigenschaften

Im folgenden Kapitel wird anhand der Ergebnisse aus den Versuchen zum Einfluss ausgewählter Faktoren auf die Pelletierung (siehe Kapitel 4.1.2) diskutiert, ob Miscanthus aus prozesstechnischer Sicht für die Mischpelletproduktion geeignet ist.

5.1.2.1 Wassergehalt

Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass Biomasse für die Pelletierung einen Wassergehalt von 9 bis 12 M.-% aufweisen sollte, um eine ausreichende physikalische Qualität der Pellets zu garantieren (RHEN et al. 2005; KALIYAN und MOREY, 2009, SAMUELSON et al. 2012). Diese Aussage kann für Miscanthus-Mischpellets nach eigenen Untersuchungen nur bedingt bestätigt werden. Abbildung 20 (siehe Kapitel 4.1.2.1) zeigt, dass ab einem Wassergehalt von 12 M.-% lediglich die Schüttdichte mit zunehmendem Wassergehalt kontinuierlich abnimmt. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Abriebfestigkeit der Pellets mit Wassergehalten von 12 bis 15 M.-% nicht signifikant voneinander. Erst ab einem Wassergehalt von 16 M.-% ist eine tendenziell verringerte Abriebfestigkeit zu erkennen. Weiterhin zeigt sich, dass die Matrizentemperatur bei zunehmendem Wassergehalt sinkt. Zusätzlich verringert sich der Leistungsbedarf der Pelletierung minimal, was bei gleichbleibendem Durchsatz eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfes zur Folge hat.

Die Abnahme der Schüttdichte mit zunehmendem Wassergehalt kann durch die verringerte Reibung zwischen Material und Matrizen erklärt werden. Laut KALIYAN und MOREY (2009) führt eine verringerte Reibung aufgrund eines geringeren Drucks in der Matrizen letztendlich zu einer verringerten Schüttdichte.

Die konstante Abriebfestigkeit der Pellets ist vermutlich auf das Ligninerweichungsverhalten zurückzuführen. Lignin beginnt bereits ab Temperaturen von 60°C zu erweichen, wobei höhere Wassergehalte – bezogen auf einen Bereich bis zu 25 M.-% H₂O – zu einer Absenkung der T_g führen (KALIYAN und MOREY, 2009 und SAMUELSON et al. 2012). Da die eigenen Versuche bei Matrizentemperaturen von über 90°C durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass bei allen Varianten eine ähnlich hohe Ligninerweichung stattgefunden hat. Weil dieser Verglasungseffekt maßgeblich die Abriebfestigkeit bestimmt (STELTE et al., 2011a), ist davon auszugehen, dass dies der Grund für die gleichbleibende Abriebfestigkeit ist.

Neben den physikalischen Eigenschaften beeinflusst der Wassergehalt auch den spezifischen Energiebedarf (siehe Abbildung 19). Der für die Pelletierung optimale Wassergehalt des Biomassegemisches kann durch den geringsten spezifischen Energiebedarf bei Einhaltung der Grenzwerte der physikalischen Pelletqualität bestimmt werden. Die vorangehenden Versuche wurden mit einem Gemisch aus Miscanthus und Fichte (je 50 M.-%) durchgeführt. Zur Absicherung dieser Ergebnisse wurden zusätzlich, wie in Abbildung 21 ersichtlich, der spezifische Energiebedarf, die Temperatur und der Leistungsbedarf der Pelletierung eines Miscanthus-Paulownia-Gemisches in Abhängigkeit des Wassergehaltes untersucht. Dabei zeigen sich die gleichen Tendenzen wie bei dem

Gemisch mit Fichte. Somit ist anzunehmen, dass diese Ergebnisse auf andere Miscanthus-Gemische übertragbar sind.

Der Vergleich mit Literaturangaben zeigt, dass für jede Pelletierungsanlage und Biomasse der optimale Wassergehalt zwischen 10 und 14 M.-% schwanken kann. Aus diesem Grund sollte dieser für jedes Produktionsszenario durch den Produzenten von Miscanthus-Mischpellets überprüft werden, um gegebenenfalls die Pelletproduktion zu optimieren.

5.1.2.2 Presskanallänge

Die Abbildungen 23 und 24 (siehe Kapitel 4.1.2.2) zeigen, dass die Länge der Presskanäle in der Matrize den Pelletierungsvorgang maßgeblich beeinflusst.

Im Versuch hatte die Verlängerung der Presskanallänge zur Folge, dass die Durchsatzmasse reduziert werden musste, da die Leistung bei beiden Varianten 90% der max. Nennleistung der Pelletpresse nicht überschreiten sollte, um eine Überlastung der Pelletpresse zu vermeiden. Diese Verringerung der Durchsatzmasse hat zur Folge, dass sich der spezifische Energiebedarf erhöht.

HOLM et al. (2006) und STELTE et al. (2011b) benennen das Verhältnis aus D_{Loch} zu $L_{\text{Presskanal}}$ als einen wichtigen Faktor, der den Kraftaufwand für den Pressvorgang bestimmt. Dabei erhöht eine Verlängerung der Presskanäle alle in Kapitel 2.2.2.3 beschriebenen Reibungskoeffizienten. Nach den Aussagen von POPOV (2009) steigt somit der Kraftaufwand für den Pressvorgang. Diese Wirkbeziehung spiegelt sich in den ermittelten Werten wider. HOLM et al. (2006) schreiben dazu, dass der Kraftaufwand bei steigender Presskanallänge sogar exponentiell zunehme.

Neben den Kriterien Durchsatz und Energiebedarf veränderte sich durch eine Verlängerung der Presskanallänge auch die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Pellets. Abbildung 24 stellt dar, dass die Abriebfestigkeit bei steigender Presskanallänge signifikant sinkt während die Schüttdichte signifikant zunimmt. Die Zunahme der Schüttdichte kann durch die von HOLM et al. (2006) beschriebene Steigerung des Pressdruckes in der Matrize erklärt werden. Im Gegensatz dazu ist es schwierig, das Abnehmen der Abriebfestigkeit zu erklären. Da bei den Versuchen die Durchsatzmasse an den Leistungsbedarf der Pelletpresse angepasst wurde, erhöhte sich die Temperatur in der Matrize nur minimal um 1°C. Wegen dieser minimalen Temperaturerhöhung kann angenommen werden, dass bei einer längeren Versuchsdauer die Matrizentemperatur, aufgrund des höheren Reibungskoeffizienten, weiter angestiegen wäre. Dieser Temperaturanstieg hatte zur Folge, dass mehr Wasser während des Pressvorgangs verdampfte, was während des Versuches auch beobachtet werden konnte. Da laut PLACET et al. (2008) Lignin bei höheren Wassergehalten schneller erweicht, ist davon auszugehen, dass der durch das Verdampfen verringerte Wassergehalt eine

schlechtere Ligninverschmelzung hervorrief. Dies hatte eine schlechtere Partikelbindung zur Folge, sodass nach KALIYAN und MOREY (2009) die Abriebfestigkeit abnehmen musste. Theoretisch müsste nach Placet et al. (2008) eine Erhöhung des innerpartikulär gebundenen Wassergehaltes dieser Entwicklung entgegenwirken, sodass trotz höherer Reibung eine Verbesserung der Abriebfestigkeit erreicht würde. Diese Wassererhöhung, die durch die Nutzung erntefrischer Biomasse (12-15 M.-% H₂O) erreicht werden kann, könnte womöglich ebenfalls den Reibungskoeffizienten absenken, sodass der Energiebedarf ebenfalls sinken müsste. Diese Annahme konnte jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass verschiedene Biomassearten unterschiedliche Pelletierungseigenschaften haben (STELTE et al., 2011a), wobei diese Unterschiede von der stofflichen Zusammensetzung der Biomasse abhängen. Neben dem Gehalt an Cellulose, Hemicellulose, Ölen und anderen flüchtigen Bestandteilen ist besonders der Gehalt an Lignin für die Partikelbindung von Bedeutung (BACK und SALMEN, 1982 und BLECHSCHMIDT et al., 1986). Aufgrund dieser variierenden Pelletierungseigenschaften sollte ein Mischpelletproduzent die Presskanallänge an die Biomasse anpassen.

5.1.2.3 Durchsatzmasse

In den vorherigen Kapiteln wurde schon mehrfach beschrieben, dass eine Durchsatzerhöhung oft zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes führt (siehe auch Abbildung 25). Die Durchsatzmasse der Pelletpresse wird neben dem Zerkleinerungsprodukt (Biomasseart, Partikeleigenschaften u. Feuchtegehalt), durch Maschineneinstellungen und Antriebsleistung des Elektromotors bestimmt (BHATTACHARYA et al., 1989). In Bezug auf die Antriebsleistung ist dabei die maximale Nennleistung des Motors der limitierende Faktor für die Durchsatzmasse. Im Allgemeinen sind schon Überlastschalter in die Steuerung der Pelletpresse integriert, sodass die Pelletpresse bei Überschreitung dieser maximalen Nennleistung abgeschaltet wird.

Neben dem spezifischen Energiebedarf kann aber auch die Pelletqualität durch die Durchsatzmasse beeinflusst werden. Aus Abbildung 26 geht hervor, dass eine Erhöhung des Durchsatzes bei Beibehaltung aller weiteren Versuchsparameter zu einer Verringerung der physikalischen Pelletqualität führen kann. Dabei verringert die Erhöhung der Durchsatzmasse die Schüttdichte signifikant. Dagegen sinkt die Abriebfestigkeit nur minimal ab. Allerdings liegen in der Versuchsreihe alle Durchsatz-Varianten weit über den Grenzwerten der Pelletnorm. Die Abnahme der Schüttdichte ist vermutlich auf eine verringerte Kompaktierung zurückzuführen. Da das Material der Variante 20,7 kg h⁻¹ - im Gegensatz zu den anderen Varianten - aufgrund einer längeren Verweilzeit in der Matrize, stärker kompaktiert wurde, hat diese Variante die höchste Schüttdichte.

In den vorangehenden Abschnitten wurde bereits aufgezeigt, dass die Matrizentemperatur einen indirekten Einfluss auf die Abriebfestigkeit hat. Dieser Einfluss ist auf die Ligninerweichung zurückzuführen. Abbildung 25 zeigt, dass die Variante 20,7 kg h⁻¹ eine niedrigere Matrizentemperatur hat, als die anderen beiden Varianten. Im Gegensatz dazu war aber, wie schon vorher erwähnt, die Verweilzeit des Materials in der Matrize länger. Da sich zwischen den drei Varianten die Abriebfestigkeit nur minimal veränderte, ist davon auszugehen, dass die Ligninerweichung neben der Temperatur und dem Wassergehalt auch von der Durchsatzmasse abhängt.

Insgesamt gilt zu beachten, dass die Durchsatzmasse neben der Antriebsleistung stark von den in Kapitel 2.2.2 dargestellten Faktoren beeinflusst wird.

BUSCHHART (2012) erläutert, dass der Leistungsbedarf einer Pelletpresse, während des Prozessschrittes der Pelletierung, möglichst 80 – 90% der max. Nennleistung betragen sollte, um eine gute Pelletqualität bei möglichst geringem spezifischem Energiebedarf zu erreichen. Diese Angabe konnte durch die eigenen Untersuchungen bestätigt werden.

5.1.2.4 Zwischenfazit

Die Pelletierungsversuche verdeutlichen exemplarisch, dass eine Vielzahl von Faktoren die Qualität des Pelletierungsprozesses beeinflusst. Aus diesem Grund können keine allgemeingültigen Aussagen zur Optimierung der verschiedenen Faktoren getroffen werden. Allerdings sollte im Verlauf einer Mischpelletproduktion Maschineneinstellungen überprüft und gegebenenfalls an das jeweilige Biomassegemisch angepasst werden, um die Qualität der Produktion zu sichern.

Allgemein geht aus diesen Versuchen hervor, dass die Pelletierung von *Miscanthus*-Mischpellets unter optimierten Maschineneinstellungen aus prozesstechnischer Sicht problemlos möglich ist und die gesetzlich vorgeschriebenen physikalischen Normen eingehalten werden können.

5.1.3 Fazit

Aus den vorherigen Ausführungen geht hervor, dass *Miscanthus x giganteus* in Bezug auf die Brennstoffeigenschaften zwar nicht alle Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) einhalten kann, aber dennoch als potentieller Mischungspartner für die Mischpelletproduktion geeignet ist. Dabei gilt es besonders zu beachten, dass die Qualität der Biomasse von *Miscanthus* durch verschiedene Umweltbedingungen und Kulturmaßnahmen beeinflusst wird.

Als wichtigste Empfehlung für Landwirte, die Miscanthus für die Mischpelletproduktion anbauen möchten, gilt, dass die Ernte Ende März bzw. Anfang April erfolgen sollte, da dann der Gehalt an störenden verbrennungstechnisch relevanten Elementen am geringsten ist.

Auch aus Sicht des Pelletierungsprozesses ist Miscanthus als Rohstoff für die Mischpelletproduktion geeignet. Neben dem Vorteil, dass Miscanthus mit 85 M.-% TM geerntet wird, sodass keine weitere Trocknung notwendig ist, erfüllen die Mischpellets die physikalischen Qualitätsanforderungen der DIN_EN 14961-2(A2).

Somit kann die erste Arbeitshypothese, dass *Miscanthus x giganteus* für die Produktion von Qualitäts-Mischpellets geeignet ist, bestätigt werden.

5.2 Eignung von *Paulownia tomentosa* für die Mischpelletproduktion

Das zweite Kapitel der Diskussion behandelt die Eignung von Paulownia als Rohstoff für die Miscanthus-Mischpelletproduktion. Darin wird in einem ersten Schritt anhand der Wuchsleistung der schnellwachsenden Baumart *P. tomentosa* geprüft, ob der Biomassertrag den Anbau von Paulownia in Deutschland rechtfertigt. In den weiteren Schritten wird - ähnlich wie in Kapitel 5.1 - überprüft, ob Paulownia aufgrund seiner Brennstoff- und Pelletierungseigenschaften als Rohstoff für die Mischpelletproduktion geeignet ist .

5.2.1 Biomasseertrag

Im Gegensatz zu Miscanthus und den klassischen Kurzumtriebskulturen ist die Wuchsleistung von *Paulownia tomentosa* in Mitteleuropa noch weitestgehend unerforscht.

Auch wenn im Rahmen vorliegender Arbeit der Biomasseertrag nur auf einer Versuchsfläche und in der ersten Bestandsentwicklungsphase untersucht wurde, so können die Ergebnisse für eine vorläufige Beurteilung der Kultur genutzt werden.

Um diese Ergebnisse näher einordnen zu können, werden diese mit der Wuchsleistung von den Pappel- und Weidensorten "Max 1" und "Inger", die als Hohertragsorten gelten (RÖHLE et al., 2005 und LIEBHARD, 2007), verglichen.

In Abbildung 27 (Kapitel 4.2.1) ist dargestellt, dass Paulownia auf der Fläche des Campus Klein-Altendorf nach den ersten drei Vegetationsjahren mit 7,9 t (TM) ha⁻¹ einen ähnlich hohen durchschnittlichen jährlichen Zuwachs hat wie die Pappel- und Weidensorte (9,6 bzw. 6,9 t (TM) ha⁻¹). Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit den Erkenntnissen von MEIER und VETTER (2004), die über alle Arten hinweg höhere Biomassezuwächse feststellten. In deren Untersuchungen haben Paulownia und die Pappelsorte einen um 65% und die Weide einen um 41% höheren Ertrag. Diese Ertragsunterschiede sind vermutlich auf zwei Faktoren zurückzuführen.

Zum einen waren die von MEIER und VETTER (2004) untersuchten Bestände zwischen fünf und zehn Jahre alt und zum anderen lagen deren Untersuchungsergebnissen unter-

schiedliche Pflanzdichten zugrunde. Laut LIEBHARD (2007) und SCHOLZ et al. (2006) steigt der dGZ_a von Kurzumtriebsplantagen in den ersten 5 bis 10 Jahren an. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Ertrag der untersuchten Kulturen bei zunehmendem Bestandsalter zunimmt. Diese Annahme wird durch die Daten der Abbildung 28 bestätigt. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass auch bei *Paulownia tomentosa* in den ersten Bestandsjahren der dGZ_a zunimmt (bis zu $12,8 \text{ t ha}^{-1}$ nach dem fünften Vegetationsjahr). Da aber die Untersuchungen nur bis zum Ende des fünften Bestandsjahres reichten, konnte nicht aufgezeigt werden, wann der durchschnittliche jährliche Gesamtzuwachs kulminiert.

Ein weiterer Grund, warum die Bestände von MEIER und VETTER (2004) einen deutlich höheren Biomassezuwachs aufwiesen als die der eigenen Untersuchungen, lag vermutlich in den mindestens doppelt so hohen Pflanzdichten. Bei MEIER und VETTER (2004) wurden die Pappel- und Weidenflächen mit einer Pflanzdichte von bis zu $40.000 \text{ Pflanzen ha}^{-1}$ der Paulownia-Bestand mit $10.000 \text{ Pflanzen ha}^{-1}$ bepflanzt. RÖHLE et al. (2009) stellen dazu dar, dass insbesondere in den ersten Bestandsjahren der Biomassezuwachs mit steigender Pflanzdichte zunimmt. Diese Angabe konnte am Beispiel der Paulownia-Plantage Tornow bestätigt werden, wobei eine vierfach höhere Pflanzdichte zu einem mehr als doppelt so hohen Biomasseertrag führte.

Aus den Ertragsdaten der drei Versuchsflächen von *Paulownia tomentosa* geht hervor, dass bisher nur geringe Aussagen über den Biomassezuwachs getroffen werden können. Dabei zeigt sich, dass insbesondere die Pflanzdichte und das Bestandsalter als wesentliche Einflussfaktoren noch weiter untersucht werden müssen. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchungen sollte auf der zu empfehlenden Pflanzdichte liegen, da der Biomasseertrag vermutlich positiv mit dieser korreliert.

In Bezug auf die optimale Pflanzdichte sind vor allem ökonomische Aspekte zu beachten, da laut PÜHL (2012) die hohen Pflanzgutkosten von Paulownia einen sehr großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Anbaus haben. Mit Hilfe solcher wirtschaftlichen Überlegungen, die neben der Erntetechnik besonders die Anlagekosten dem Biomassezuwachs gegenüberstellen, wurde beispielsweise für Pappeln und Weiden der optimale Pflanzabstand von $16.000 - 22.000 \text{ Pflanzen ha}^{-1}$ ermittelt (HOFMANN, 1998).

Neben den Faktoren Pflanzdichte und Bestandsalter bestimmt auch der Standort die Wachstumsleistung von Paulownia. Dies geht aus dem Vergleich der Ertragsdaten des Langzeitversuches in Klein-Altendorf und der Plantage Tornow hervor. Der Bestand Klein-Altendorf der in demselben Jahr wie die Plantage Tornow angelegt wurde, hat mit einer ähnlich hohen Bestandsdichte einen deutlich höheren Biomassezuwachs als der Bestand Tornow (vgl. Abb. 27 und Abb. 29).

Dieser Vergleich zeigt, dass Paulownia unter bestimmten Standortbedingungen hohe Biomasseerträge erreichen kann. Im Vergleich zu dem Standort Klein-Altendorf, der eine Acker-

zahl von 75 aufweist, einen mittleren Jahresniederschlag von 600 mm und eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9,2°C hat (RAMPEREZ -CARRASCO et al., 2012) hat, ist der Standort der Plantage Tornow für Paulownia deutlich ungeeigneter. Dessen Ackerzahl beträgt lediglich 30 (TORNOW, 2013), der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 900 mm und die Jahresdurchschnittstemperatur ist 8,5°C (ANONYMUS 6, 2012).

Laut ZHAO-HUA et al. (1986) sind tiefgründige und nährstoffreiche Böden, die über eine hohe nutzbare Feldkapazität und gute Drainage verfügen, am besten für den Anbau von Paulownia geeignet. Diese Anforderungen, die für den Standort CKA zutreffen, liegen bei der Plantage nicht vor. Des Weiteren beschreiben ZHAO-HUA et al. (1986) und LONGBRAKE (2001), dass Paulownia - bei ausreichender Wasserversorgung (>500 mm Niederschlag) - bei Temperaturen zwischen 25 und 29°C den höchsten Biomassezuwachs aufweist. Da der Standort CKA eine deutlich höhere Jahresdurchschnittstemperatur als der Standort der Plantage Tornow hat, scheint dieser Faktor ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf den Biomassezuwachs von Paulownia zu haben.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und der Literaturangaben ist anzunehmen, dass der Standort CKA in Bezug auf die abiotischen Umweltbedingungen für den Anbau von KUPs und insbesondere Paulownia ein Gunststandort ist. Dies wird umso deutlicher, wenn man die Ergebnisse von AMTHAUER-GALLARDO und RÖHLE (2012) hinzuzieht. Diese untersuchten im Rahmen des Projektes "ProLoc I" auf 32 Standorten in Deutschland die Klon-Standort Wechselwirkung der Sorten "Max 1" und "Inger". Einer dieser Standorte war Klein-Altendorf. Im Vergleich zu den anderen Standorten hatten diese beiden *Salicaceae*-Arten auf dem Standort CKA den höchsten Biomasseertrag. Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich für folgende Untersuchungen die Fragestellung, ob Paulownia auch auf mäßig guten Standorten in Deutschland ausreichend hohe Biomassezuwächse aufweist, die den Anbau von Paulownia in KUPs rechtfertigen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass *Paulownia tomentosa* in KUPs unter bestimmten Standort- und Kulturbedingungen ähnlich hohe Biomassertäge liefern kann wie Pappeln und Weiden. Somit ist Paulownia potentiell für die Produktion von Hackschnitzeln auf landwirtschaftlichen Flächen geeignet. Um dieses Ergebnis verifizieren zu können, sind jedoch weiter langfristige Untersuchungen auch auf Praxisflächen notwendig.

5.2.2 Brennstoffeigenschaften

5.2.2.1 Aschegehalt

Im Kapitel 4.1.1 wurde gezeigt, dass *Miscanthus x giganteus* unter optimalen Anbaubedingungen einen Aschegehalt von 1,6 M.-% bis 2 M.-% aufweisen kann. Um die von der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2) maximal erlaubten 1,5 M.-% Asche einhalten zu

können, ist es obligatorisch nur Mischungspartner einzusetzen, die Aschegehalte unter 1 M.-% aufweisen.

Abbildung 30 zeigt, dass nur *Paulownia tomentosa*-Holz und Fichten-Holz einen Aschegehalt von unter 1 M.-% haben. Der Aschegehalt der untersuchten Fichtenhackschnitzel von 0,6 M.-% deckt sich mit den Angaben anderer Untersuchungen (KALTSCHMITT et al., 2009). Das Holz von *Paulownia tomentosa* hat einen Aschegehalt von 0,8 M.-%. Diese Daten decken sich weitgehend mit bisherigen Literaturwerten (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: Vergleich der Literaturwerte für den Aschegehalt von *Paulownia tomentosa* mit dem eigenen Analysewert

Quelle	Aschegehalt [M.-%]
MEIER und VETTER (2004)	0,50
GARCIA et al. (2011)	0,90
KARAMPINIS et al. (2012)	0,93
VILLANUEVA et al. (2011)	0,97
Eigene Analyse	0,78

Die eigene Aschegehaltsuntersuchung erfolgte mit *Paulownia*-Biomasse aus einem dreijährigen Bestand (Standort CKA). Dagegen untersuchte MEIER und VETTER (2004) Holz von einem fünf jährigem Bestand. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass der im Vergleich zu MEIER und VETTER (2004) höhere Aschegehalt der eigenen Untersuchung auf das junge Bestandsalter zurückzuführen ist. Mit wachsendem Alter sinkt laut (KALTSCHMITT et al., 2009) der Rindenanteil. Da bei Bäumen die Rinde einen höheren Aschegehalt als Kernholz hat (KAUTNER et al., 2001; PICCHIO et al., 2012) ist davon auszugehen, dass der Aschegehalt von *Paulownia* mit steigendem Bestandsalter aufgrund des sinkenden Rindenanteils abnimmt.

Daraus kann als Empfehlung für die *Miscanthus*-*Paulownia*-Mischpelletproduktion abgeleitet werden, dass *Paulownia*-Holz aus möglichst alten Beständen verwendet werden sollte.

Im Gegensatz zu den eigenen Werten und den Angaben von MEIER und VETTER (2004), ermittelten andere Autoren etwas höhere Aschegehalte, die aus unterschiedlichen Standortbedingungen resultieren könnten.

Die von GARCIA et al. (2011), VILLANUEVA et al. (2011) und KARAMPINIS et al. (2012) untersuchte *Paulownia*-Biomasse stammte aus südeuropäischen Länder (Spanien, Griechenland). PÜHL (2012) zeigt in seinen Untersuchungen auf, dass *Paulownia*-Holz aus der Türkei aufgrund einer längeren Vegetationsperiode andere mechanische Eigenschaften als mitteleuropäisches *Paulownia*-Holz hat. Somit ist es sehr wahrscheinlich, dass der Aschegehalt von *Paulownia* ebenfalls durch klimatische Bedingungen beeinflusst wird.

Es kann zusammengefasst werden, dass in Bezug auf den Aschegehalt *Paulownia*-Holz aus Mitteleuropa ebenso gut für eine Mischpelletproduktion geeignet ist wie Fichten-Holz und somit deutlich bessere Eigenschaften aufweist als das Holz klassischer Kurzumtriebskulturen (Pappeln und Weiden).

5.2.2.2 Verbrennungstechnische Eigenschaften

In dem vorherigen Abschnitt wurde dargestellt, dass *Paulownia tomentosa* mit 0,8 M.-% im Vergleich zu anderen landwirtschaftlich erzeugten Biomassen einen sehr geringen Aschegehalt hat. Der folgende Abschnitt soll erörtern, ob in Bezug auf die weiteren verbrennungstechnisch relevanten Eigenschaften *Paulownia* als Rohstoff für die Mischpelletproduktion geeignet ist.

Der ermittelte Brennwert von *Paulownia* liegt mit $19,4 \text{ MJ kg}^{-1}$ im oberen Bereich der von MEIER und VETTER (2004), KARAMPINIS et al. (2012), LOPEZ et al. (2012) und VILLANEUVA et al. (2013) ermittelten Ho ($18,3 - 19,9 \text{ MJ kg}^{-1}$). Nach KALTSCHMITT et al. (2009) ist der Ho von Hölzern etwa 5% höher als der Heizwert. Somit erfüllt *Paulownia tomentosa* in Bezug auf den Hu die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) ($17,5 - 21 \text{ MJ kg}^{-1}$).

Die Bestimmung der Brennstoffeigenschaften von *Paulownia tomentosa* erfolgte in zwei unabhängigen Laboren. Dabei zeigte sich, dass zwischen den beiden Laboren die Analyseergebnisse von Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt deutlich voneinander abweichen (siehe Tabelle 14, Kapitel 4.2.2.2). Mit Ausnahme von Stickstoff sind die ermittelten Gehalte von Schwefel- und Chlor aus Labor II, welches nach EN-Norm (DIN_CEN/TS 15289) analysierte, niedriger als die aus Labor I, welches nach der alten deutschen Norm untersuchte (DIN 51724-1 bzw. DIN 51727).

Insbesondere am Beispiel des Schwefelgehaltes, der durch Labor I bestimmt wurde, zeigt sich, dass die alten DIN-Normen nur ungenau die Elementgehalte von Biomassen erfassen können. Für den Gehalt an Schwefel ist diese Ungenauigkeit der Analysewerte wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die DIN 51724-1 für die Bestimmung von S in Kohlen, welche laut KILBANE (1989) und BEISING (2002) in der Regel S-Gehalte von 0,2 - 1 M.-% aufweisen, vorgesehen ist. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels nur noch die Analysewerte aus Labor II erörtert.

Im Vergleich zu *Miscanthus* hat *Paulownia* (siehe Tabelle 14, Kapitel 4.2.2.2) mit Ausnahme des Stickstoffgehaltes bessere Brennstoffeigenschaften. *Paulownia* erfüllt in Bezug auf die untersuchten Brennstoffeigenschaften (0,5 M.-% N, <0,02 M.-% Cl) nahezu alle verbrennungstechnisch relevanten Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2). Lediglich der Schwefelgehalt liegt mit 0,037 M.-% knapp über dem Norm-Grenzwert von 0,03 M.-%. Der Chlorgehalt konnte aufgrund methodenbedingter Grenzen nicht exakt festgestellt werden. Allgemein liegen diese Werte im Rahmen der Literaturangaben (siehe Tabelle 24).

Die Angaben aus der Tabelle lassen im Allgemeinen vermuten, dass Biomasse von Paulownia - mit Ausnahme des S- Gehaltes - die Grenzwerte der verbrennungsrelevanten Elementgehalte für die Mischpelletproduktion erfüllt. Analog zu dem Aschegehalt wird bei Bäumen Schwefel primär in der Rinde akkumuliert (SCHRIEVER, 1984). Somit haben ältere Bäume, die aufgrund des größeren Brusthöhendurchmessers (BHD) einen geringeren Rindenanteil aufweisen, einen geringeren Schwefelgehalt. Daraus lässt sich ableiten, dass in Bezug auf eine Reduktion des Schwefelgehaltes in der Biomasse möglichst alte Paulownia-Bestände für die Mischpelletproduktion beerntet werden sollten.

Tabelle 24: Vergleich der ermittelten N-, S- und Cl-Gehalt von Paulownia mit Literaturangaben, in Relation zu den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2(A2)

Quelle	Gehalte in M.-% bezogen auf TM		
	N	S	Cl
MEIER und VETTER (2004)	0,20	< 0,100	0,01
LOPEZ et al. (2012)	0,21	< 0,100	k. A.
KARAMPINIS et al. (2012)	0,37	0,026	0,01
VILLANUEVA et al. (2011)	0,16	0,070	k. A.
Eigene Analyse	0,50	0,037	<0,02
DIN_EN 14961-2(A2)	0,50	0,03	0,02

Die Untersuchungen des Ascheschmelzverhaltens zeigten, dass die Ascheerweichungstemperatur von Paulownia-Holz bei 1.290°C liegt (optische Methode). Die bisher einzigen Vergleichswerte liefern KARAMPINIS et al. (2012). Deren ermittelte DT (1.138°C) liegt im Vergleich zu den eigenen Analysen um 150°C niedriger. Zusätzlich zeigen diese Autoren auf, dass die von ihnen untersuchte Paulownia-Biomasse minimale Silizium- und hohe Kalium- bzw. Calciumgehalte hat. Die Untersuchungen von RÖHRIG (2012) bestätigen dies auch für die Paulownia-Biomasse, welche im Projekt „C₄-Kompakt“ verwendet wurde. Es kann festgehalten werden, dass die DT von Paulownia-Holz aufgrund sehr geringer Siliziumgehalte über 1.100 °C liegt und somit die Anforderungen von EN_{plusA2}-Pellets erfüllt. Es konnte dargestellt werden, dass die Biomasse von *Paulownia tomentosa* – mit Ausnahme des minimal zu hohen Schwefelgehaltes – alle verbrennungsrelevanten Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) und des Zertifizierungssystems EN_{plusA2} erfüllt. Somit ist Paulownia aus verbrennungstechnischer Sicht ein geeigneter Mischungspartner für die Miscanthus-Mischpelletproduktion. Des Weiteren ist festzuhalten, dass Biomasse aus älteren Paulownia-Beständen, aufgrund von geringeren Rindenanteilen, vermutlich bessere Brennstoffeigenschaften (geringerer Asche und Schwefelgehalt) aufzeigt als jüngere.

5.2.3 Pelletierungseigenschaften

Im Rahmen vorliegender Arbeit wurden zur Analyse unterschiedlichster Aspekte Pelletierungsversuche mit Paulownia durchgeführt.

Zunächst wurden unterschiedliche Biomassegemische zur Prüfung der Pelletierbarkeit von Paulownia unter einheitlichen Bedingungen pelletiert. Die Analyse der visuellen und physikalischen Pelletqualität ergab dabei, dass Paulownia in Reinform - im Gegensatz zu anderen nachwachsenden Rohstoffen - sehr gut pelletiert werden kann. Ebenso wie bei den Versuchen mit Reinstoffen zeigte sich, dass Pellets aus Paulownia und Miscanthus sehr hohe Qualitäten aufweisen (siehe Tabelle 15, Kap. 4.2.3).

Da derzeit noch keine vergleichbaren Untersuchungen mit Paulownia vorliegen, ist es nur schwer möglich, dieses Ergebnis zu bewerten. Ein Ansatz zur Erklärung dieser Ergebnisse kann womöglich in den verschiedenen mechanischen Eigenschaften der Biomassen liegen. Dabei könnte das Elastizitätsmodul des Drucks eine Schlüsselgröße sein. Nach HOLM et al. (2006) werden während des Pelletierungsvorganges Partikel verformt. STRIETZEL (2005) beschreibt zur Verformung von Partikeln, dass der Kraftaufwand für eine Deformation bei einem sinkenden Elastizitätsmodul (des Drucks) des Materials verringert wird. Da Paulownia, Pappel, Weide und Miscanthus unterschiedliche Elastizitätsmodule aufweisen (siehe Tabelle 25) ist es möglich, dass dieser Faktor den Pressvorgang markant beeinflusst.

Tabelle 25: Elastizitätsmodule verschiedener Biomassearten unterschiedlicher Literaturangaben

Biomasse	Elastizitätsmodul [N mm⁻²]	Quelle
Paulownia	4.000 – 5.000	AKYILDIZ und KOL, 2010
Pappel	8.100 – 9.600	SELL, 1987
Weide	7.200	GROSSER, 2000
Miscanthus	2.000 – 4.000	KAACK et al. 2003
Fichte	10.000 – 12.000	SELL, 1987

Nach den Angaben aus Tabelle 25 hat Paulownia ein niedrigeres Elastizitätsmodul als Pappeln und Weiden. Somit können nach den Angaben von STRIETZEL (2005) die einzelnen Paulownia-Partikel bei gleichem Kraftaufwand leichter zusammengepresst werden, sodass deren Oberfläche größer ist. Diese größere Partikeloberfläche hätte zur Folge, dass die Partikel aufgrund einer größeren Bindungsfläche besser aneinanderhaften (KALIYAN und MOREY, 2009). Diese Theorie könnte die größere Abriebfestigkeit der Paulownia-Pellets im Vergleich zu Pellets aus anderer Biomasse erklären. Dem stehen jedoch die Ergebnisse des Pelletierungs-Hauptversuches, der bei der Firma Amandus Kahl durchgeführt wurde, gegenüber (siehe Abb. 50, Kapitel 4.4.4.2). In diesem Versuch hatten die Miscanthus-Fichten-Pellets, trotz des höheren Elastizitätsmoduls von Fichte, eine größere Abriebfestigkeit als die

Miscanthus-Paulownia-Pellets. Des Weiteren steht der Theorie des Einflusses des Elastizitätsmoduls entgegen, dass die Miscanthus-Pellets trotz eines niedrigeren Elastizitätsmoduls eine schlechtere Pelletqualität als die Paulownia-Pellets haben.

Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf das Pressverhalten könnten Inhaltsstoffe sein. Da aber im Rahmen der Untersuchungen keine Möglichkeit bestand, nähergehend das Pressverhalten der unterschiedlichen Biomassen zu untersuchen, sollten Folgearbeiten dieses Themengebiet genauer analysieren

Auf Grundlage der Ergebnisse aller Pelletierungsversuche mit Paulownia kann festgehalten werden, dass *Paulownia tomentosa* - insbesondere mit Miscanthus - sehr gute Pelletierungseigenschaften aufweist und somit für die Mischpelletproduktion geeignet ist.

5.2.4 Fazit

In den vorherigen Abschnitten wurde dargestellt, dass Paulownia unter bestimmten Standortvoraussetzungen ähnlich hohe Biomasseerträge (bis zu 13 t (TM) ha⁻¹) liefern kann wie klassische Kurzumtriebsarten. Aufgrund dieses hohen Ertragspotentials könnte Paulownia als schnell nachwachsender Rohstoff für die Mischpelletproduktion bereitgestellt werden. Diese Erkenntnis kann derzeit jedoch nur als vorläufig angesehen werden, da es noch weiterer Anbauversuche bedarf, um die hohe Ertragsleistung von Paulownia unter verschiedenen Standortbedingungen zu verifizieren. Besonders auffallend ist auch der besonders niedrige Aschegehalt. Im Vergleich zu anderen KUP-Kulturen - wie z. B. Pappeln oder Weiden (ca. 2 M.-%) - ist der Aschegehalt von Paulownia (0,8 M.-%) ähnlich niedrig wie der von Fichte (0,6 M.-%). Des Weiteren konnte aufgezeigt werden, dass Paulownia-Holz mit Ausnahme eines etwas schlechteren Schwefel-Gehaltes ähnlich gute Brennstoffeigenschaften hat wie Fichten-Holz, sodass Paulownia aus brennstofftechnischer Sicht für die Mischpelletproduktion geeignet ist. Zusätzlich zu den guten Brennstoffeigenschaften besitzt Paulownia-Holz sehr gute Pelletierungseigenschaften, sodass Paulownia auch aus verfahrenstechnischer Sicht als Mischpellet-Rohstoff genutzt werden kann.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse kann in der Summe, mit der Einschränkung, dass die Wuchsleistung weiterhin untersucht werden muss, die zweite Arbeitshypothese bestätigt werden, dass das Holz von *Paulownia tomentosa* eine optimale Komponente für Qualitätsmischpellets ist.

5.3 Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens für die Mischpelletproduktion

In Kapitel 2.2.3 wurde bereits aufgezeigt, dass die Hammermühle ein energieineffizientes Verfahren zur Zerkleinerung von Biomassen ist. In diesem Kapitel soll mit Hilfe der Ergebnisse der Energiebedarfsermittlungen und der Pelletierungsversuche aus Kapitel 3.3 aufgezeigt werden, dass alternative Zerkleinerungsverfahren den Pelletierungsprozess optimieren können.

5.3.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Energiebedarfsmessungen der verschiedenen Verfahren diskutiert und Rückschlüsse für den Prozessschritt der Zerkleinerung von Miscanthus getroffen.

5.3.1.1 Hammermühle und Zerfaserung

Als allgemeine Bezugsgrundlage der Zerkleinerungsversuche für Vergleiche der Verfahren wurde in einem ersten Schritt der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle ermittelt. Darauf folgend wurde das Verfahren Zerfaserung untersucht.

In den beiden Versuchsjahren zeigt sich, dass der spezifische Energiebedarf zur Zerkleinerung der Miscanthus-Häcksel rund 40 kWh t^{-1} beträgt. Im zweiten Versuchsjahr (2012) stieg durch die Lagerung der Wassergehalt um 3 M.-% auf 12,6 M.-%. Dieser Anstieg hatte eine Verringerung von 2,5% des spez. Energiebedarfes zur Folge.

Generell liegt der ermittelte Energiebedarf im unteren Bereich der Literaturwerte, die für die Zerkleinerung von Biomasse mittels Hammermühle mit 20 bis 150 kWh t^{-1} angegeben werden (CADOCHÉ und LÓPEZ, 1989; PERRY und GREEN, 1999; SAMSON et al., 2000; MANI et al., 2004). Es ist anzunehmen, dass auf Grund der geringen durchschnittlichen geometrischen Partikellänge von 8 mm die eigenen Untersuchungsergebnisse im unteren Bereich der Literaturwerte liegen. Im Vergleich dazu erfolgten die Untersuchungen der anderen Autoren mit verschiedensten Biomassen unterschiedlichster Größe. Die besten Vergleichswerte stellen die Ergebnisse der Untersuchungen von BITRA et al. (2009) dar. In deren Untersuchungen benötigte die Zerkleinerung von Switchgrass und Stroh mittels Hammermühle 32 bzw. 35 kWh t^{-1} spezifische Energie. Der geringere Energiebedarf dieser Versuche im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen ist vermutlich primär auf die geringere durchschnittliche geometrische Kantenlänge zurückzuführen. Zusätzlich könnten bei BITRA et al., (2009) der unterschiedliche Sieblochdurchmesser (3,2 mm) und eine veränderte Drehzahl (2.000 U min^{-1}) zu der Differenz des Energiebedarfes geführt haben. Dennoch zeigen die Ergebnisse von BITRA et al. (2009), dass der eigens ermittelte spezifische

Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle als realistischer Bezugswert für die folgenden Untersuchungen angesehen werden kann.

Der erste Zerfaserungsversuch im Jahr 2011 zeigte, dass die beiden Prototypen der Zerfaserung unterschiedliche Energiemengen zur Zerkleinerung von einer t Miscanthus benötigen (siehe Kapitel 4.3.1.1). Dass die größere Zerfaserung vom Typ 45/1500 einen mehr als 60% höheren spezifischen Energiebedarf hat als die kleinere vom Typ 22/600, ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass beide Maschinen Prototypen sind. Dabei wurde die größere Zerfaserung (Typ 45/1.500) als Folgemodell nach dem Typ 22/600 entwickelt. Es ist zu vermuten, dass verschiedenste Einflüsse von „Upscaling- Effekten“ zu dieser deutlichen Erhöhung geführt haben. So beschreiben MIAO et al. (2011), dass in der Summe Leistung, Drehzahl, Durchsatz und Materialeigenschaften den Energiebedarf von Zerkleinerungsmaschinen bestimmen. Da die größere Zerfaserung bei einem doppelt so hohen Leistungsbedarf einen nur geringfügig höheren Durchsatz hat, ist davon auszugehen, dass bei der Weiterentwicklung der Zerfaserung, die von MIAO et al. (2011) beschriebenen Faktoren nicht im richtigen Verhältnis vorlagen. Nähergehende Untersuchungen zu diesen angenommenen „Upscaling-Effekten“ konnten jedoch durch vorliegende Arbeit nicht durchgeführt werden.

Die Zerfaserung des Typs 45/1.500 wurde, wegen ihres hohen Energiebedarfs aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Im Gegensatz dazu wurde der Typ 22/600 weiterhin untersucht.

Aus Abbildung 31 in Kapitel 4.3.1.1 geht hervor, dass die Zerfaserung sowohl 2011 als auch 2012 einen etwas geringeren spezifischen Energiebedarf (5%) aufwies als die Hammermühle. Laut ANONYMUS (2005) wird in der Zerfaserung die Biomasse bei Drehzahlen von 200 bis 400 U min⁻¹ zerrissen. Im Gegensatz dazu wird in der Hammermühle Biomasse bei Drehzahlen von 2.000 bis 3.500 U min⁻¹ zerschlagen (PERRY und GREEN, 1999). Somit entsteht bei der Zerfaserung im Vergleich zu der Hammermühle ein sehr geringer Luftstrom. Nach BITRA et al. (2009) führen höhere Luftströme zu einem höheren Energiebedarf. Trotz der deutlich geringeren Drehzahl der Zerfaserung und den damit verbunden geringeren Luftströmungen konnte der Energiebedarf durch den Einsatz dieses Verfahrens dennoch nicht deutlich reduziert werden.

Betrachtet man hingegen den gesamten Zerkleinerungsprozess der Biomasse, so bedarf laut GAESE (2011) die Nachzerkleinerung mittels Zerfaserung weniger Energie als die der Hammermühle. Dies resultiert daher, dass die halmgutartige Biomasse vor der Nachzerkleinerung mittels Zerfaserung weniger stark vorzerkleinert werden muss als mit der Hammermühle. Somit bedarf die Vorzerkleinerung für die Zerfaserung, die im Fall von Miscanthus in der Regel mit einem Feldhäcksler durchgeführt wird, weniger Energie als für die Zerkleinerung per Hammermühle.

5.3.1.2 Kollermühle

Da die Kollermühle eine Vielzahl an möglichen Maschineneinstellungen besitzt, wurde in einem ersten Versuch (2011) die Eignung unterschiedlicher Matrizen zur Zerkleinerung von Miscanthus untersucht. Als Eignungsparameter wurden dafür der spezifische Energiebedarf von Zerkleinerung und Pelletierung festgelegt. Weiterführend wurde die Qualität der Pellets in Abhängigkeit der gewählten Kollermühlenmatrize als Eignungsparameter gewählt.

Ein zweiter Versuch im Jahr 2012 ermittelte unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Versuch 2011, den Einfluss von Durchsatz und Wasserzugabe auf den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen.

In dem ersten Versuch (2011) bei Amandus Kahl zeigt sich, dass bei Einsatz einer Lochmatrize mit einem Lochdurchmesser von 6 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 der höchste Durchsatz und ein relativ geringer Energiebedarf ($24,5 \text{ kWh t}^{-1}$) erreicht wird. Lediglich die Variante mit einem Lochdurchmesser von 10 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 2 hat mit 13 kWh t^{-1} einen geringeren Energiebedarf. Diese Reduktion des Energiebedarfes ist auf eine verringerte Reibung zwischen Material und Koller zurückzuführen. STERNOWSKY (2007) benennt noch zwei weitere Wirkbeziehungen (siehe Kapitel 2.2.2.2), die den Reibungskoeffizienten der Kollermühle – die eine modifizierte Pelletpresse darstellt – beeinflussen. Der Einfluss dieser beiden Wirkbeziehungen kann jedoch für eine mögliche Begründung der Ergebnisse ausgeschlossen werden. Zum einen veränderte sich die Wirkbeziehung zwischen Material und Material nicht, zum anderen hatte die Variante mit einem D_{Loch} von 10 mm und einer $L_{\text{Presskanal}}$ von 20 mm eine in Relation zum Volumen größere Reibungsfläche zwischen Material und Matrize, als die Variante mit einem D_{Loch} von 6 mm. Dies müsste aufgrund des Auftretens von höheren Adhäsionskräften, zu einem Anstieg der Reibung führen. Da aber trotz dieses theoretischen Anstiegs der Reibung, was laut POPOV (2009) zu einer Erhöhung des Energiebedarfes führen müsste, sich der tatsächliche Energiebedarf verringert, kann wie schon beschrieben lediglich die Wirkbeziehung Material – Koller diesen Unterschied beeinflusst haben.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit den weiteren Ergebnissen aus Tabelle 16 (siehe Kapitel 4.3.1.2), so kann für die Matrizenwahl zur Zerkleinerung einer Biomasse folgendes postuliert werden:

Eine Verringerung des D_{Loch} , bei gleichbleibendem Presskanalverhältnis führt bei konstantem Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize zu einem Anstieg des Reibungskoeffizienten zwischen Material und Koller. Eine Erhöhung der $L_{\text{Presskanal}}$, bei gleichbleibendem D_{Loch} , führt zu einer Anhebung des Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize. Diese Steigerungen des Reibungskoeffizienten haben jeweils einen Anstieg des spezifischen Energiebedarfes zur Folge.

SITZMANN (2009) beschreibt, dass die Kollermühle zur Zerkleinerung von Holzhackschnitzeln (50 M.-% TM) $10 - 15 \text{ kWh t}^{-1}$ benötigt. BUSCHHART (2012) fügt jedoch hinzu, dass der Energiebedarf der Zerkleinerung bei steigendem TM-Gehalt zunimmt.

Da im ersten Versuch keine digitale Leistungsmessung erfolgte, konnten die Ergebnisse nicht statistisch abgesichert werden. Aus diesem Grund erfolgte im Folgejahr ein weiterer Versuch mit der Kollermühle, um die ermittelten Werte verifizieren zu können. Der in Kapitel 4.3.2.1 dargestellte Pelletierungsversuch zeigt, dass der Energiebedarf der Pelletierung nicht primär durch den D_{Loch} der Matrize in der Kollermühle beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu hat der D_{Loch} der Matrizen jedoch einen signifikanten Einfluss auf die physikalische Qualität der Mischpellets (siehe Abb. 33, Kap. 4.3.1.2). Aufgrund der unterschiedlichen Matrizenlochdurchmesser hatten die verschiedenen Varianten vor der Pelletierung unterschiedliche Korngrößenverteilungen (siehe Tabelle 18, Kap. 4.3.2.3). Dabei hatte das Material, welches mit einer Matrize mit einem D_{Loch} von 6 mm zerkleinert wurde, den höchsten Anteil an kleineren Partikeln.

Laut BHATTACHARYA et al. (1989) beeinflusst die Korngrößenverteilung neben anderen Faktoren die physikalischen Eigenschaften von Pellets. Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass sich die Abriebfestigkeit der verschiedenen Pellet-Varianten nur tendenziell voneinander unterscheiden. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen von BERGSTRÖM et al. (2008), die ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen Korngrößenverteilung und Abriebfestigkeit feststellen können.

Im Gegensatz zu der Abriebfestigkeit unterscheiden sich die Schüttdichten der verschiedenen Varianten signifikant. Dabei sinkt die Schüttdichte der Pellets mit zunehmendem Lochdurchmesser, wobei die Variante mit einem D_{Loch} von 6 mm als einzige den Grenzwert der DIN_EN-14961-2(A2) einhält.

BERGSTRÖM et al. (2008) können bei ihren Untersuchungen keinen Einfluss der Korngrößenverteilungen auf die Schüttdichte erkennen. Jedoch fassen diese zusammen, dass generell kleinere Partikel zu einer höheren Pelletdichte führen müssten. Diese Annahme bestätigt sich in den Untersuchungen von MANI et al. (2006b). Bei diesen führen analog zu den eigenen Ergebnissen, geringere Korngrößen des Ausgangsmaterials zu einer höheren Schüttdichte der Pellets.

Die Ergebnisse der beiden Versuche zeigen, dass für die Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle die Matrize mit einem D_{Loch} und $L_{\text{Presskanal}}$ von jeweils 6 mm (Presskanalverhältnis 1 : 1) am besten geeignet ist. Dies wird durch die beste Pelletqualität bei einem relativ geringen spezifischen Energiebedarf begründet. Aus diesem Grund wurde bei allen weiteren Zerkleinerungsversuchen mit der Kollermühle die gleiche Matrize eingesetzt.

Der zweite Versuch bei Amandus Kahl (2012) zeigte, dass der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung durch eine Erhöhung des Durchsatzes reduziert werden kann. Diese Reduktion des spezifischen Energiebedarfes resultierte aus einer überproportionalen Erhöhung der Durchsatzmasse bei nur leicht ansteigendem Leistungsbedarf. Diese Tendenz wird aber laut BUSCHHART (2012) durch die maximale Nennleistung der Kollermühle limitiert. Aus Abbildung 34 (siehe Kapitel 4.3.1.2) geht hervor, dass bei einer Wasserzugabemenge von 2 M.-% und ab einer Durchsatzmasse von 590 kg h^{-1} eine weitere Durchsatzerhöhung zu einem Anstieg des spezifischen Energiebedarfes führt. Dieses Minimum des spezifischen Energiebedarfes (38 kWh t^{-1}) liegt bei 70% der maximalen Nennleistung. Der starke Anstieg des spezifischen Energiebedarfes um 16% bei einer minimalen Durchsatzerhöhung von 5% ist auf den überproportionalen Leistungsanstieg (12%) zurückzuführen. Dieser überproportional starke Anstieg der Leistung wurde vermutlich dadurch hervorgerufen, dass die Erhöhung des Durchsatzes zu einem Anstieg der Temperatur des Zerkleinerungsproduktes (63°C) führte, sodass das Zerkleinerungsprodukt anpelletiert wurde (siehe Abb. A1, Anhang). Da an der Matrize kein Thermometer angebracht war, konnte lediglich die Temperatur des Zerkleinerungsproduktes gemessen werden. Laut KELLEY et al. (1987) und IRVINE (1984) beginnt Lignin, je nach Biomasse und Feuchtegehalt zwischen 50 und 100°C zu erweichen. Dabei reduzieren nach STELTE et al. (2011a) feuchte Bedingungen die Erweichungstemperatur des Lignins. Die beobachtete frühzeitige Anpelletierung hatte vermutlich zur Folge, dass der freie Materialfluss des Zerkleinerungsgutes reduziert wurde, was wiederum einen höheren Materialdruck auf die Lochwand der Matrize hervorrief. Aufgrund dieses stärkeren Materialdruckes erhöhte sich vermutlich auch der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize, sodass nach den Erkenntnissen von POPOV (2009) mehr Energie zum Durchpressen des Materials durch die Matrize benötigt wurde.

Im weiteren Versuchsverlauf wurde den zu zerkleinernden Miscanthus-Häckseln kein Wasser zugefügt. Dies hatte zur Folge, dass bei einem Durchsatz von 625 kg h^{-1} der Leistungsbedarf und der spezifische Energiebedarf, im Gegensatz zu der Variante mit Wasserzugabe um 15% reduziert wurden. Zusätzlich verringerte sich der Anteil der anpelletierten Partikel und die Temperatur des Zerkleinerungsgutes sank auf 60°C (siehe Abb. A1, Anhang).

Nach Angaben von SALMEN (1984) ist anzunehmen, dass bei dieser Versuchsvariante der reduzierte Wassergehalt zu einer Erhöhung der T_g des Lignins in dem Miscanthus geführt hatte, wodurch der Anteil anpelletierter Partikel sank. Aufgrund dieser geringeren Anpelletierung des Materials sank vermutlich auch der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize, was dann wiederum zu der Verringerung des spezifischen Energiebedarfes führte.

Der geringste spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung per Kollermühle (36 kWh t^{-1}) wurde bei einem Durchsatz von 710 kg und 0% Wasserzugabe gemessen. Dieser Wert ist im Vergleich zu dem Vorjahresversuch ($24,5 \text{ kWh t}^{-1}$) um 46% angestiegen. In beiden Versuchsjahren wurde bei diesen Varianten kein Wasser während der Zerkleinerung zugeführt. Dieser starke Anstieg des spezifischen Energiebedarfes ist vermutlich auf den unterschiedlichen Wassergehalt der Miscanthus-Häcksel zurückzuführen. Die Feuchtemessungen ergaben, dass der Wassergehalt im Jahr 2011 bei $9,6 \text{ M.}\%$ und im Folgejahr bei $12,6 \text{ M.}\%$ liegt. Aufgrund des um $3 \text{ M.}\%$ gestiegenen Wassergehaltes, führte im Jahr 2012 die bereits beschriebene Anpelletierung (siehe Abb. A2, Anhang) des Zerkleinerungsgutes zu einem höheren spezifischen Energiebedarf.

In den Zerkleinerungsversuchen mit der Kollermühle zeigte sich, dass die Zerkleinerung von Miscanthus mit der Kollermühle ($24,5$ bzw. 36 kWh t^{-1}) signifikant weniger Energie benötigt, als die Zerkleinerung per Hammermühle (40 bzw. 39 kWh t^{-1}). Im Gegensatz zu der Hammermühle konnte gezeigt werden, dass ein steigender Wassergehalt den Energiebedarf der Zerkleinerung per Kollermühle erhöht. Dies bestätigt auch SITZMANN (2009). Daraus resultiert für die Mischpelletproduktion, dass der Miscanthus möglichst trocken zerkleinert werden sollte.

Weiterhin geht aus den Ergebnissen hervor, dass die Kollermühle am energieeffizientesten bei hohen Durchsätzen und einem Leistungsbedarf von rund 80% der maximalen Nennleistung zerkleinert.

5.3.1.3 Prallreaktor

Die Versuche mit dem Prallreaktor zeigten, dass dieses Zerkleinerungsverfahren viele verschiedene Maschineneinstellungen ermöglicht, die wiederum sehr komplexe Wirkbeziehungen hervorrufen. Da lediglich ein Versuch durchgeführt werden konnte, ist der geringste ermittelte spezifische Energiebedarf von 47 kWh t^{-1} nur als vorläufiger Wert anzusehen.

KARINKA et al. (2013) beschreiben grundlegende Einflüsse von Prallzerkleinerungsverfahren. Danach bestimmen hauptsächlich die Faktoren Drehzahl, Prallfläche, Siebfläche und Zufuhrmenge die Effektivität dieses Zerkleinerungsprinzips.

Die eigenen Untersuchungen bestätigen diese Angaben (siehe Tabelle 17, Kap. 4.3.1.3). Tabelle 17 zeigt, dass insbesondere eine Erhöhung der Siebfläche zu einer deutlichen Reduktion des spezifischen Energiebedarfes führt. Dies deckt sich mit den Angaben von KARINKA et al. (2013), die ebenfalls feststellen, dass eine Erhöhung der Siebfläche bei gleichbleibender Zufuhrmenge die Effektivität von Prallzerkleinerungsverfahren verbessert. VOGEL und PEUKERT (2003) beschreiben, dass unter anderem die Einschlagshäufigkeit der Partikel mit Prallelementen die Energieintensität, die auf die Partikel wirkt, erhöht.

Aus diesen Angaben kann abgeleitet werden, dass in dem Versuch eine Erhöhung der Siebfläche einen früheren Austritt der Partikel aus dem Prallraum ermöglichte. Dies hatte zur Folge dass die Partikel weniger stark zerkleinert wurden, sodass weniger Energie verbraucht wurde. In diesem Zusammenhang führte eine Verdoppelung der Prallfläche zu einem Anstieg des spezifischen Energiebedarfes, da die Partikel stärker beschleunigt und somit häufiger zerschlagen wurden. Nach VOGEL und PEUKERT (2003) hätte eine Verringerung der Drehzahl zu einer Reduktion des spezifischen Energiebedarfes führen müssen. Allerdings war durch diese Maßnahme eine Erhöhung zu beobachten. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass die Beschleunigung der Partikel zu gering und damit die Aufprallenergie der Partikel zu niedrig war, um ein Zerplatzen hervorzurufen.

Die eigenen Erkenntnisse und Literaturangaben lassen vermuten, dass der spezifische Energiebedarf des Prallreaktors zur Zerkleinerung von Miscanthus, durch eine Vergrößerung der Siebfläche verringert werden kann. Laut SCHÄFER (2011) hatte die Versuchsmaschine lediglich 20% der praxisüblichen Siebfläche.

5.3.1.4 Zwischenfazit

In Abbildung 35 (Kapitel 4.3.1.4) wird aufgezeigt, dass die Kollermühle im Vergleich zu den anderen Verfahren in beiden Versuchsjahren den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf aufweist. Im Gegensatz dazu benötigt der Prallreaktor tendenziell am meisten Energie zur Zerkleinerung von Miscanthus. Die Zerkleinerung unterscheidet sich nicht signifikant von der Hammermühle

Wie schon in dem vorherigen Abschnitt 5.3.1.3 dargestellt wurde, kann der spezifische Energiebedarf des Prallreaktors vermutlich weiter reduziert werden. Ebenso könnte nach Aussagen von SCHOLTE-REH (2012) und GAESE (2012) der Energiebedarf der Zerkleinerung durch weitere Modifikationen, welche insbesondere die Führung des Luftstromes betreffen, reduziert werden. Somit kann in Bezug zu den Zerkleinerungsverfahren Prallreaktor und Zerkleinerung kein abschließendes Urteil zu deren Energieeffizienz getroffen werden.

Wie schon SITZMANN und BUSCHHART (2009) beschreiben, zeigen auch die eigenen Untersuchungen, dass die Kollermühle signifikant weniger Energie zur Zerkleinerung von Biomasse benötigt als die Hammermühle. Dies ist vermutlich auf zwei verschiedene Ursachen zurückzuführen. Erstens wird während der Zerkleinerung in der Kollermühle kein Luftstrom erzeugt. Nach BITRA et al. (2009) müsste dies zur Folge haben, dass dadurch weniger Energie verbraucht wird. Der zweite Grund für die effektivere Energienutzung durch die Kollermühle könnte sein, dass diese einen größeren Zwang auf die Partikel ausübt. Nach AUSTIN und SHOJI (1973) weisen Partikel während der Zerkleinerung in der Hammermühle ein unvorhersehbares Bruchverhalten auf. Die beiden Autoren zeigen auf, dass Partikel, auch wenn diese von den Hämmern getroffen werden, nicht notwendig zerplatzen müssen.

Dabei wird dennoch Energie aufgewandt, die in einer Stauchung der Partikel resultiert. Bei der Rückdehnung der Partikel wird die Energie ungenutzt abgegeben. Des Weiteren werden die Partikel nicht zwangsläufig bei jeder Umdrehung der Hämmer getroffen. So zeigen BITRA et al. (2009), dass eine Vergrößerung der Schlagfläche durch Erhöhung des Hammerwinkels zu einer Reduktion des spezifischen Energiebedarfes führte.

Im Gegensatz dazu können bei der Zerkleinerung mit der Kollermühle die Partikel nur bedingt den Kollern ausweichen. Diese Ausweichbewegungen werden durch den Spalt zwischen Koller und Matrize limitiert (HOLM et al., 2006).

Bisher ist der Einfluss von Kollerspalt und Elastizität der Biomasse auf den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Biomassen mittels Kollermühle noch nicht untersucht. Aus diesem Grund kann deren Wirkung nicht abschließend beurteilt werden.

Neben dem Energiebedarf der eigentlichen Partikelzermahlung wird bei der Zerkleinerung mittels Kollermühle elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Zerkleinerungsprodukt je nach Maschineneinstellung über 60°C erreicht. Diese Wärmeproduktion ist auf Reibungskräfte zwischen Koller und Material bzw. Matrize und Material zurückzuführen, die nach POPOV (2009) eine Erhöhung des Energiebedarfes zur Folge haben. In der Regel geht diese Wärme im weiteren Produktionsprozess der Pellets verloren, da das Zerkleinerungsprodukt in der Regel zwischengelagert wird (OBERNBERGER und THEK, 2004). Auf Grundlage des bisherigen Kenntnisstandes der Forschung kann der Anteil der Energie, die für diese Wärmeerzeugung aufgewendet wird, nicht quantifiziert werden.

Letztendlich kann festgehalten werden, dass der Energiebedarf der verschiedenen Zerkleinerungsverfahren durch unterschiedliche Wirkungsweisen (Maschineneinstellungen, H₂O-Gehalt, Materialform) beeinflusst wird. Allerdings konnte der Einfluss dieser Wirkbeziehungen auf den Energiebedarf nicht näher quantifiziert werden. Aus diesem Grund sollten zukünftige Forschungsarbeiten diese näher untersuchen, um entsprechende Optimierungsvorschläge zu liefern.

Dennoch konnte gezeigt werden, dass die Kollermühle im Vergleich zu den anderen Zerkleinerungsverfahren und insbesondere gegenüber der Hammermühle ein sehr energieeffizientes Zerkleinerungsverfahren für den Pelletierungsprozess darstellt.

Des Weiteren könnte bei Verwendung der Kollermühle eine zeitlich direkt anschließende Pelletierung an den Prozessschritt der Zerkleinerung zu einer Verringerung des Energiebedarfes der Pelletierung führen. REED et al. (1980) zeigen auf, dass eine Vorerwärmung der zu pelletierenden Biomasse den Energiebedarf der Pelletierung reduziert. Da das Zerkleinerungsprodukt der Kollermühle Temperaturen von über 60°C aufweist, könnte somit der Energiebedarf des gesamten Pelletierungsprozesses optimiert werden. Folgeprojekte sollten diese Fragestellung weitergehend untersuchen.

5.3.2 Pelletierbarkeit der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens

In dem vorherigen Abschnitt wurde dargestellt, dass die Kollermühle das energieeffizienteste Verfahren zur Zerkleinerung halmgutartige Biomasse ist. Die folgenden Abschnitte sollen klären, ob der Einsatz dieses Verfahrens - im Vergleich zu den anderen Systemen - auch aus prozesstechnologischer Sicht für die Produktion von Mischpellets geeignet ist.

Diese Fragestellung wird anhand der Ergebnisse der unterschiedlichen Pelletierungsversuche aus Kapitel 4.3.2 erörtert. Im Mittelpunkt dieser Diskussion stehen die Untersuchungsparameter spezifischer Energiebedarf und physikalische Pelletqualität.

5.3.2.1 Energiebedarf der Pelletierung

Aus Abbildung 36 (Kapitel 4.3.2.1) geht hervor, dass die Pelletierung des Miscanthus-Fichten-Gemisches, dessen Miscanthus-Anteil mit der Kollermühle zerkleinert wurde, signifikant am wenigsten Energie verbraucht (135 kWh t^{-1}). Die Varianten Hammermühle und Zerkleinerung unterscheiden sich nicht voneinander. Insgesamt liegt der spezifische Energiebedarf, der Pelletierung mit 135 bis 160 kWh t^{-1} weit über dem praxisüblichen spezifischen Energiebedarf von 40 bis 60 kWh t^{-1} (THEK und OBERNBERGER, 2001; Di GIACOMO und TAGLIERI, 2009). Auch STAHL et al. (2012) ermittelten mit einer etwas größeren Laborpresse (33 kW) für die Pelletierung von Sägespänen einen spezifischen Energiebedarf von 150 bis 170 kWh t^{-1} .

Da diese Versuche an einer $3,2 \text{ kW}$ Laborpresse durchgeführt wurden, sind die eigenen Werte nicht mit denen der Praxisproduktion zu vergleichen.

Laut SAMSON et al. (2000), HOLM et al. (2006) und MANI et al. (2006b) haben neben anderen Faktoren die Korngrößenverteilung und die Oberflächenstruktur von Partikeln einen Einfluss auf die Pelletierung von Biomassen. In Bezug auf diese Erkenntnisse sind die Ergebnisse aus Abbildung 36 nur schwer zu deuten. Im Gegensatz zu dem Zerkleinerungsprodukt der Hammermühle haben die Varianten Kollermühle und Zerkleinerung einen signifikant höheren Anteil an größeren Partikeln (siehe Tabelle 18, Kapitel 4.3.2.3). Dabei unterscheiden sich die Korngrößenverteilungen der beiden Varianten nicht signifikant. Da aber die Gemischvariante, deren Miscanthusanteil mittels Zerkleinerung zerkleinert wurde, signifikant mehr Energie benötigt als die Variante Kollermühle, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Korngrößenverteilung auf den spezifischen Energiebedarf minimal ist.

Um die Wirkung des Zerkleinerungsverfahrens auf die Oberflächenstruktur als Einflussfaktor der Pelletierfähigkeit näher erörtern zu können, wurden Partikel der verschiedenen Zerkleinerungsprodukte photographiert. Die Abbildung A3 im Anhang zeigt besonders charakteristische Miscanthus-Partikel für die zur Zerkleinerung von Miscanthus eingesetzten Verfahren.

Besonders auffällig ist, dass die Hammermühle stäbchenförmige Partikel mit geraden Bruchkanten erzeugt. Im Gegensatz dazu entstehen durch die Zerkleinerung mit der Zerkleinerung und der Kollermühle Partikel mit sehr stark aufgefaselter Oberfläche. Dabei weisen die Partikel aus der Kollermühle im Vergleich zu der Zerkleinerung eine eher kubische Geometrie auf.

Da sich bei der Pelletierung der Energiebedarf der Varianten Hammermühle und Zerkleinerung nicht signifikant unterschied, ist zu vermuten, dass die Oberflächenstruktur nur einen minimalen Einfluss auf den Energiebedarf der Pelletierung hat. Dagegen hat die Variante Kollermühle den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf. Das Hauptunterscheidungsmerkmal dieses Zerkleinerungsproduktes ist die Partikelgeometrie. Somit muss angenommen werden, dass die Partikelgeometrie im Vergleich zu Korngrößenverteilung und Partikeloberflächen den größten Einfluss auf den Energiebedarf der Pelletierung hat.

Derzeit ist keine Literatur bekannt, die den Einfluss dieser drei Faktoren auf den Energiebedarf der Pelletierung näher beschreibt. Die Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen der Partikeleigenschaften auf den Pelletierungsprozess befassen, beziehen sich meist auf die Qualität der produzierten Pellets.

HOLM et al. (2006) untersuchten das Pressverhalten von verschiedenen Hölzern und stellten fest, dass sich stäbchenförmige Partikel horizontal zu dem Presskanaldurchmesser orientieren (siehe Abb. A4, Anhang). Damit es zu dieser horizontalen Anordnung der Partikel kommt, muss eine Kraft aufgebracht werden, wobei deren Höhe unter anderem von der Wirkbeziehung Material zu Material abhängig ist. CHO et al. (2006) und MAEDA et al. (2010) beschreiben für Sandpartikel, dass ungleichmäßig geformte Partikel eine geringere Packdichte erreichen als gleichmäßig runde Partikel. Aus dieser Erkenntnis kann für die Kompaktierung von Biomassen abgeleitet werden, dass sich kubische Partikel leichter als stäbchenförmige Partikel, die sich stärker ineinander verhaken können, in die Pressrichtung orientieren. Dies hat zur Folge, dass zum Verpressen von kubischen Partikeln aus der Kollermühle weniger Energie benötigt wird als von stäbchenförmigen Partikeln. Diese Vermutung wird durch die Untersuchungen von HOLM et al. (2007) gestützt, wobei aufgezeigt wird, dass sich stäbchenförmige Partikel im Presskanal nach einer Druckentlastung (Kollerdruck) stärker zurückdehnen, sodass für das Verpressen wiederum mehr Energie benötigt wird.

Somit kann vermutet werden, dass die Partikelgeometrie den Energiebedarf der Pelletierung signifikant beeinflusst. Um dieses Phänomen näher zu beleuchten, bedarf es jedoch weiterer Forschung.

5.3.2.2 Physikalische Eigenschaften

Die Analyse der Abriebfestigkeit und der Schüttdichte ergab im Gegensatz zu der Energiebedarfsmessung ein anderes Resultat (siehe Abb. 37, Kap. 4.3.2.2). Es zeigt sich, dass die Pellet-Variante Zerfaserung als einzige beide Grenzwerte der Norm einhält. Die Abriebfestigkeit ist bei dieser Variante signifikant am höchsten. Dagegen ist die Schüttdichte der Pellets signifikant am niedrigsten. Die Pellets der Variante Hammermühle haben die signifikant höchste Schüttdichte, jedoch war die Abriebfestigkeit im Vergleich zu der Variante Kollermühle tendenziell schlechter. Somit widersprechen diese Ergebnisse den Aussagen von OBERNBERGER und THEK (2004), die eine enge positive Korrelation zwischen Abriebfestigkeit und Schüttdichte postulieren.

Entgegen der Ergebnisse der Energiebedarfsmessungen haben laut BHATTACHARYA et al. (1989), HOLM et al. (2006), MANI et al. (2006b) und BERGSTRÖM et al. (2008) die Korngrößenverteilung und die Partikeloberfläche einen deutlichen Einfluss auf die physikalische Pelletqualität. Nach deren Darstellungen hat eine geringere Korngrößenverteilung tendenziell eine höhere Schüttdichte zur Folge.

Diese schon von FRASER (1935), MIURA et al. (1998) und MAEDA et al. (2010) bestätigte Erkenntnis ist auch für die Deutung der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen heranzuziehen. Die in Tabelle 18 dargestellten Siebkennlinien zeigen, dass die Variante Hammermühle, bei der die höchste Schüttdichte gemessen wurde, auch die kleinere Korngrößenverteilung aufweist. Des Weiteren hat die Variante Kollermühle eine etwas geringere Schüttdichte und geringere Korngrößenverteilung, als die Variante Zerfaserung.

Im Gegensatz zur Schüttdichte ist die Abriebfestigkeit ein Qualitätskriterium, welches von sehr vielen Variablen abhängig ist (PAYNE, 2004). Da aber in diesem Versuch lediglich der Faktor Materialstruktur variierte, können lediglich die Korngrößenverteilung, die Materialoberfläche bzw. Partikelgeometrie die unterschiedlichen Abriebfestigkeiten hervorgerufen haben.

Die Unterschiede in der Abriebfestigkeit können laut MANI et al. (2006b) und BERGSTRÖM et al. (2008) jedoch nicht auf die Korngrößenverteilung zurückgeführt werden. Neben den Literaturangaben konnte dies auch durch einen weiteren Pelletierungsversuch erhärtet werden.

In diesem Versuch sollten, wie in Kapitel 3.3.2.1 beschrieben, die Zerkleinerungsprodukte auf eine einheitliche Größe gesiebt werden. Dabei war die Wahl der Siebgeometrie eine mögliche Fehlerquelle, die zu Fehlinterpretationen hätte führen können. Für die Siebung der Zerkleinerungsprodukte wurden Lochsiebe genutzt. Das hatte zur Folge, dass stäbchenförmige Partikel mit einer größeren maximalen Kantenlänge in zu kleine Fraktionen abgesiebt wurden. Somit ist anzunehmen, dass die tatsächlichen Korngrößenverteilungen nicht mit den ermittelten übereinstimmen. Dieses Phänomen beobachteten auch MA et al.

(2000), WOMAC et al. (2007) und STARK und CHEWNING (2012). WOMAC et al. (2007) beschreiben nähergehend, dass bildgebende Verfahren eine deutlich genauere Methode für die Erfassung der Korngrößenverteilung darstellen.

Obwohl bei der Siebung Lochsiebe eingesetzt wurden, müssten in diesem Versuch die Zerkleinerungsprodukte der Hammermühle und der Zerkleinerung eine nahezu einheitliche Korngrößenverteilung aufweisen, da die Partikel beider Varianten eine stäbchenförmige Geometrie haben. Trotz dieser vermuteten einheitlichen Korngrößenverteilungen hat die Variante Hammermühle eine signifikant geringere Abriebfestigkeit. Somit kann bestätigt werden, dass andere Faktoren als die Korngrößenverteilung diesen Unterschied hervorriefen.

Da bisher in der Literatur der Einfluss der Partikelgeometrie auf die Abriebfestigkeit nicht beschrieben wurde, kann nicht eindeutig erörtert werden, inwieweit diese für die Unterschiede der Pellet-Varianten verantwortlich war. Dennoch kann aus den Erkenntnissen von CHO et al. (2006) und MAEDA et al. (2010), die unter anderem die Packdichte von sandigen Partikeln untersuchten, der Rückschluss gezogen werden, dass die Partikelgeometrie auf die Abriebfestigkeit von Pellets wirkt. In beiden Quellen wird beschrieben, dass ungleichmäßig geformte Partikel ein größeres Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen als gleichmäßig runde Partikel und sich somit besser mit einander vernetzen können.

Verschiedene Quellen benennen ebenfalls die Partikeloberflächenstruktur als weiteren wichtigen Einflussfaktor auf die Abriebfestigkeit von Pellets (KALIYAN und MOREY, 2009 und BACK, 1987). So beschreibt BACK (1987), dass die Größe der Bindungsfläche, einen der wichtigsten Faktoren für das Verkleben von Partikeln darstellt. In Abbildung A3 (siehe Anhang) ist sehr gut zu erkennen, dass die Miscanthus-Zerkleinerungsprodukte der Zerkleinerung und der Kollermühle eine sehr viel größere Oberfläche pro Volumen bzw. Masse haben als der mittels Hammermühle zerkleinerte Miscanthus. Aufgrund dieser höheren Oberfläche ist es anzunehmen, dass zwischen den Partikeln in den einzelnen Pellets eine größere Anzahl an Bindungen zustande kommt.

Da diese beiden Varianten eine signifikant größere Abriebfestigkeit als die Variante Hammermühle haben, ist davon auszugehen, dass die Partikeloberflächenstruktur neben den Faktoren Partikelgeometrie und Korngrößenverteilung einen deutlichen Einfluss auf die Abriebfestigkeit der Mischpellets hat.

5.3.2.3 Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass die Korngrößenverteilung, die Partikelgeometrie und die Partikeloberflächenstruktur von zerkleinertem Miscanthus die Pelletierfähigkeit beeinflusst. Dabei hat eine kubische Partikelgeometrie (Variante Kollermühle) einen positiven Einfluss

auf den spezifischen Energiebedarf. Des Weiteren haben Korngrößenverteilungen mit kleineren Partikeln (Variante Hammermühle) höhere Schüttdichten zur Folge und eine größere Partikeloberfläche (Varianten Zerkleinerung und Kollermühle) erhöhte die Abriebfestigkeit.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zerkleinerung das beste Zerkleinerungsprodukt liefert, dessen Pelletierung jedoch einen ähnlich hohen Energiebedarf wie die Hammermühle benötigt.

Dagegen hat die Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf und eine ausreichende physikalische Pelletqualität. Vermutlich können die physikalischen Pelleteigenschaften dieser Variante durch Modifikation der Maschineneinstellungen während der Pelletierung verbessert werden. Somit ist die Kollermühle aus Sicht der Pelletierfähigkeit des Zerkleinerungsproduktes das effektivste Zerkleinerungsverfahren.

5.3.3 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse

Das folgende Kapitel soll aufzeigen, inwieweit die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren für Holz geeignet sind. Dies ist für die Mischpelletproduktion von besonderer Bedeutung, da auch die holzartige Biomasse von *Paulownia* zerkleinert werden soll.

5.3.3.1 Hammermühle

Die in Kapitel 4.3.3.1 dargestellten Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse decken sich größtenteils mit anderen Untersuchungen.

HOLZAPPELT et al. (1989) ermittelten für die Zerkleinerung von Pappelhackschnitzeln einen spezifischen Energiebedarf von 50 kWh t^{-1} . Das verwendete Ausgangsmaterial hatte eine L_{Kante} von 16 mm und in der Hammermühle war ein 2 mm Lochsieb eingesetzt.

Im Gegensatz dazu wurde bei den eigenen Untersuchungen unter anderem Fichten- und *Paulownia*-Holz, mit einer L_{Kante} von 14 mm mit einem 5 mm Lochsieb zerkleinert. Trotz eines höheren Sieblochdurchmessers und einer geringeren L_{Kante} liegt der gemessene Energiebedarf dieser Varianten knapp über dem von HOLZAPPELT et al. (1989).

Dieser höhere Energiebedarf ist vermutlich auf die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Hölzer zurückzuführen. Anhand der Druck- und Biegefestigkeit (siehe DIN 52185 und DIN 52186) können Aussagen über die Bruchfestigkeit der untersuchten Holzarten getroffen werden. KLAUDITZ (1951) ermittelte für zwei unterschiedliche Pappelklone eine Druckfestigkeit von 15 N mm^{-2} und eine Biegefestigkeit von 24 N mm^{-2} . Im Vergleich dazu beschreiben ZHAO-HUA (1986), AKYLIDIZ und KOL (2006) und PÜHL (2012) für *Paulownia tomentosa* eine Druckfestigkeit von 20 - 40 N mm^{-2} und eine Biegefestigkeit von

38 – 62 N mm⁻². Laut LOHMANN (1986), SELL (1987), PUSHINSKIS et al. (2002) und RANTA-MAUNUS et al. (2011) hat Fichte eine Druckfestigkeit von 40 - 56 N mm⁻² und eine Biegefestigkeit von 58 - 106 N mm⁻². Die Daten, welche in Tabelle A8 (siehe Anhang) zusammengefasst sind, zeigen, dass Paulownia und Fichte eine deutlich höherer Materialfestigkeit haben als Pappel. Dies könnte erklären, warum bei Zerkleinerung dieser Biomassen mehr Energie benötigt wird, als bei der Zerkleinerung von Pappelholz.

Die Ausgangsgröße der Biomassepartikel beeinflusst signifikant den unterschiedlichen Energiebedarf für die Zerkleinerung von Fichtenspänen, Paulownia-Hackschnitzeln mit einer L_{Kante} von 18 mm und Paulownia-Hackschnitzeln mit einer L_{Kante} von 14 mm. Nach ESTEBAN und CARRASCO (2002) erhöht sich der Energiebedarf der Zerkleinerung mit steigender Partikelgröße des Ausgangsmaterials.

Mit Ausnahme der Fichtensägespäne benötigt die Zerkleinerung des Miscanthus (42 kWh t⁻¹) signifikant weniger Energie als die der Hackschnitzel. Dieser verringerte Energiebedarf ist zum einen auf die geringere Partikelgröße und zum anderen auf die geringere Bruchfestigkeit zurückzuführen.

In der Summe zeigt sich, dass der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Biomassen mittels Hammermühle nach folgender Auflistung zunimmt:

Fichten-Späne < Miscanthus-Häcksel < Paulownia-Hackschnitzel < Fichten-Hackschnitzel.

5.3.3.2 Kollermühle

Die Zerkleinerungsversuche mit Paulownia zeigen, dass die Kollermühle, wie schon bei den Zerkleinerungsversuchen mit Miscanthus, signifikant energieeffizienter ist als die Hammermühle. Der Vergleich der beiden Verfahren verdeutlicht, dass bei der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle im Gegensatz zur Hammermühle 20% des Energiebedarfes eingespart werden kann.

Entgegen der in Kapitel 5.3.1.2 erläuterten Zerkleinerung von Miscanthus, hat die Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Bezug auf optimale Wassergehalte gegensätzliche Eigenschaften. Der Zerkleinerungsversuch mit Miscanthus zeigt, dass eine Verringerung der Wasserzugabemenge zu einer Optimierung des Zerkleinerungsvorganges führt. Dagegen konnte bei der Zerkleinerung von Paulownia durch Wasserzugabe der Zerkleinerungsprozess optimiert werden (siehe Abb. 40, Kapitel 4.3.3.2).

Dieses Zerkleinerungsverhalten ist vermutlich auf den um 3 M.-% geringeren Wassergehalt zurückzuführen. Durch den geringen Wassergehalt von 9,2 M.-% erwärmt sich die Matrice aufgrund eines höheren Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrice sehr viel schneller, was zu einer starken Anpelletierung des Zerkleinerungsproduktes führt (siehe oberes Bild, Abb. A5, Anhang). Dabei ist die höhere Reibung vermutlich auf den verringerten

Wassergehalt zurückzuführen. Nach RHEN et al. (2005) und NIELSEN et al. (2009) wirkt Wasser unter anderem als Schmiermittel in Matrizen.

Wie schon in Kapitel 5.3.1.2 gezeigt, beschreiben SALMEN et al. (1984), dass eine Erhöhung des Wassergehaltes die Ligninerweichungstemperatur absenkt. Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass dies aber nur in Bezug auf das von der Biomasse gebundene Wasser zutrifft. STELTE et al. (2011b) heben hervor, dass Wasser für eine wirksame Ligninerweichung in und zwischen den Partikeln vorhanden sein muss. Somit ist anzunehmen, dass die unmittelbar vor der Zerkleinerung erfolgte Wasserzugabe, keinen Einfluss auf die Ligninerweichung hatte, sondern lediglich als Schmiermittel zwischen Material und Matrize fungierte. Durch diese Wirkung wurde der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize verringert, sodass das Material mit einem geringeren Kraftaufwand durch die Matrize gepresst werden konnte. Zusätzlich zu dem niedrigeren Kraftaufwand wurde die Anpelletierung des Zerkleinerungsproduktes durch eine Wasserzugabe reduziert (siehe Bild unten links bzw. unten rechts Abb. A5, Anhang).

Es ist zu vermuten, dass eine frühzeitigere Konditionierung des Holzes ebenfalls zu keinem anderen Ergebnis geführt hätte, da CHRISTENSEN und KELSEY (1959) herausfanden, dass die Sorptionsmenge von Wasser in Holz nicht von der Zeit abhängt. Die Rückbefeuchtung von Holz ist ein Diffusionsvorgang, der primär von der Feuchtekonzentration der Umgebung beeinflusst wird.

Allgemein zeigt sich, dass die Zerkleinerung von Paulownia-Hackschnitzeln mittels Kollermühle energieeffizienter ist, als die Zerkleinerung mittels Hammermühle. Des Weiteren ist aus dem Vergleich der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle zu entnehmen, dass die Prozessqualität sehr stark vom Gehalt an gebundenem Wasser in der Biomasse bestimmt wird. Dabei haben definierte Gehalte an Wasser unterschiedliche Einflüsse auf die Zerkleinerung von Paulownia und Miscanthus.

Auf Grund dieser Erkenntnisse sollte der Zerkleinerungsprozess mittels Kollermühle auf jede Biomasseart und den Wassergehalt der Biomasse abgestimmt werden.

5.3.3.3 Zerfaserung

Der Versuch Fichten-Hackschnitzel mittels Zerfaserung zu zerkleinern scheiterte, da die Sägeblätter aufgrund einer zu hohen Belastung brachen. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Zerfaserung nicht für die Zerkleinerung von holzartiger Biomasse geeignet ist.

5.3.3.4 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren

Die Versuche belegen, dass die Zerfaserung nicht für die Zerkleinerung von Holz geeignet ist. Dagegen zeigt sich, dass die Kollermühle sehr gut Holzhackschnitzel zerkleinern kann und dabei energieeffizienter ist als die Hammermühle. Als Ursache für die unterschiedliche

Energieeffizienz kann auf die Erläuterungen aus Kapitel 5.3.1.4 zurückgegriffen werden, da für holzartige Biomasse die gleichen Zerkleinerungsmechanismen gelten wie für halmgutartige Biomasse.

Im Besonderen ist bei der Kollermühle zu beachten, dass das Zerkleinerungsprodukt im Vergleich zu der Hammermühle sehr gut aufgespaltet wird (siehe Abb. A. 3). BACK (1987) stellt dazu fest, dass eine größere Partikeloberfläche zu einer verbesserten Pelletqualität führt.

Resultierend aus dem geringeren spezifischen Energiebedarf und der verbesserten Zerkleinerungs-Produktqualität stellt die Kollermühle (siehe Abb. A6, Anhang) unter den untersuchten Verfahren die geeignetste Variante zur Zerkleinerung von Holz für die Mischpelletproduktion dar.

5.3.4 Fazit

Im Allgemeinen bestätigen die Versuche die Erkenntnisse von MANLU et al. (2003), MANI et al. (2004) und ESTEBAN und CARRASCO (2006), dass der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung deutlich durch die Biomasseart, die Partikelgröße und das Zerkleinerungsverfahren bestimmt wird. Zusätzlich konnte dargestellt werden, dass das Zerkleinerungsverfahren die Pelletierung des Zerkleinerungsproduktes maßgeblich beeinflusst.

Hinsichtlich des Energiebedarfes ist die Kollermühle das energieeffizienteste Verfahren sowohl in Bezug auf den Prozessschritt der Zerkleinerung als auch auf die Pelletierung. Dagegen zeigte sich, dass die Zerkleinerung aus Sicht der Pelletqualität das bessere Zerkleinerungsprodukt liefert, wobei die Kollermühle ebenfalls bessere Pelletierungseigenschaften aufweist, als das der Hammermühle. Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass die Kollermühle – im Vergleich zu den anderen Varianten - das beste Verfahren zur Zerkleinerung von Holz ist.

In der Summe betrachtet kann eine Substitution der Hammermühle durch die Kollermühle den gesamten Prozess der Mischpelletproduktion optimieren. Dieses Optimierungspotential ist zum einen auf die oben genannten Eigenschaften zurückzuführen. Zum anderen kann die Kollermühle auch als Pelletpresse eingesetzt werden, indem eine Matrize mit längeren Presskanälen verwendet wird. In einer Produktionslinie sollte jedoch eine Maschine als Kollermühle und eine Maschine als Pelletpresse eingeplant werden, um eine fortlaufende Produktion ohne Umrüstzeiten zu garantieren. Dennoch könnte in einem Störfall, bei dem eine der beiden Maschinen ausfällt die Produktion von Pellets durch ein absätziges Verfahren fortgeführt werden. Hierbei würde zuerst das Material zerkleinert und nach einem Umbau zu einer Pelletpresse weiterpelletiert werden.

Sowohl nach ökonomischen, als auch aus prozesstechnologischen Gesichtspunkten kann mittels Kollermühle die Miscanthus-Mischpelletproduktion verbessert werden.

Somit kann bestätigt werden, dass der Austausch der Hammermühle durch neuartige Zerkleinerungsverfahren die Miscanthus-Mischpelletproduktion optimieren kann.

5.4 Gesamtbeurteilung der Miscanthus-Paulownia-Mischpellets

In dem folgenden Kapitel wird anhand der Ergebnisse der Brennstoffanalysen, Pelletierungsversuchen und der Wirtschaftlichkeitsberechnung die vierte Arbeitshypothese erörtert. Des Weiteren wird diskutiert, ob die Zugabe der Additive Kaolin und anderer landwirtschaftlicher Neben- bzw. Abfallprodukte (Melasse und Traubentrester) die Qualität der Mischpellets verbessern können.

5.4.1 Brennstofftechnische Eignung für den Einsatz in KFAs

Anhand der brennstofftechnischen Eigenschaften wird in den folgenden Abschnitten überprüft, ob die Miscanthus-Paulownia-Mischpellets für die Verbrennung in KFAs geeignet sind.

5.4.1.1 Brennwert, Asche-, N-, S- und Cl- Gehalt

Die in Tabelle 19 (siehe Kapitel 4.4.1) dargestellten Brennstoffeigenschaften der Mischpellets stimmen weitestgehend mit den Ergebnissen der Brennstoffanalysen der einzelnen Biomassen überein. Dabei ähneln sich die Werte des Asche-, N-, S-, Cl- Gehaltes und des Brennwertes der Pellets mit dem arithmetischen Mittel der Werte von Paulownia und Miscanthus (34 Kenn 8. J.).

Wie schon aus den Analyseergebnissen von Miscanthus zu vermuten war, erfüllen die Mischpellets (jeweils 50 M.-% Miscanthus und Paulownia + 1 M.-% Traubentrester) die Anforderungen der Norm an Aschegehalt, Brennwert und Stickstoffgehalt. Dagegen überschreiten die Gehalte an S und Cl die Grenzwerte leicht.

Aus Kapitel 4.4.1 geht hervor, dass die S- und Cl- Gehalte von Miscanthus knapp doppelt so hoch sind, wie die Grenzwerte der Norm. Dennoch wurde in den Kapiteln 5.1.1 und 5.2.2 für Miscanthus und Paulownia beschrieben, dass diese problematischen Stoffgehalte möglicherweise durch bestimmte kulturtechnische Maßnahmen reduziert werden können.

Dennoch muss festgehalten werden, dass die untersuchten Miscanthus-Mischpellets mit einem Miscanthusanteil von mindestens 50 M.-% die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) nicht erfüllen können.

Damit Miscanthus-Mischpellets die Norm in vollem Umfang erfüllen, müsste der Miscanthus-Anteil so weit reduziert werden, dass die Grenzwerte für S- und Cl-Gehalte eingehalten werden können. In einem solchen Fall wäre der Miscanthusanteil im Vergleich zu dem Mischungspartner so gering (10 – 20 M.-%), dass die Pellets in Holzmischpellets umbenannt werden müssten. Um dennoch Miscanthus-Mischpellets in KFAs verbrennen zu dürfen, müssten Pellets nach der neuen Mischpelletnorm DIN_EN 14961-6 (siehe Tabelle A3, Anhang), in der 1. BImSchV. unter § 3 (zugelassene Brennstoffe) aufgeführt werden.

Da dies aber bisher nicht der Fall ist, dürfen derzeit aus emissionsrechtlicher Sicht keine Miscanthus-Mischpellets in KFAs verbrannt werden.

Dagegen würde aus emissionstechnischer Sicht nichts gegen den Einsatz von Miscanthus-Paulownia-Pellets sprechen, da in § 3 der 1. BImSchV. nach Absatz 8 die Verbrennung von reinem Miscanthus in KFAs zugelassen ist. Da Mischpellets, die zu 50% aus einem - im Vergleich zu Miscanthus - hochwertigeren Mischungspartner bestehen und bessere Brennstoffeigenschaften haben als reiner Miscanthus, ist davon auszugehen, dass diese Pellets bei der Verbrennung ebenfalls geringere Emissionswerte aufweisen.

Daraus ergibt sich die Empfehlung, dass Mischpellets, die in der Summe bessere brennstofftechnische Eigenschaften als Miscanthus, welcher als Regelbrennstoff für KFAs zugelassen ist, aufweisen, in § 3 der 1. BImSchV. aufgeführt werden sollten.

Zusätzlich zu den verbrennungstechnischen Problemelementen N, S und Cl, schreibt die DIN_EN 14961-2 und -6 auch bestimmte Grenzwerte für Schwermetallgehalte in den Pellets vor. Diese müssten in einem möglichen Zertifizierungsprozess ebenfalls untersucht und eingehalten werden.

5.4.1.2 Ascheschmelzverhalten

Neben den rechtlichen Hindernissen zeigt die Analyse des Ascheschmelzverhaltens, dass die Pellets mit 915°C eine zu niedrige Ascheerweichungstemperatur aufweisen. Aufgrund dieser niedrigen DT ist nach KALTSCHMITT et al. (2009), BAXTER et al. (2012) und KARAMPINIS et al. (2012) mit einer unerwünschten Verschlackung im Brennraum zu rechnen. Diese Annahme bestätigte sich in ersten Verbrennungsversuchen, die durch die FH Köln (siehe Abb. A7, Anhang) durchgeführt wurden (WENGHOEFER et al., 2012).

Obwohl Miscanthus eine DT von 1.020°C und Paulownia eine DT von 1.290 °C haben, kann die ermittelte DT der Mischpellets von 915°C durch die Erkenntnisse von MONTI et al. (2008), ÖHMANN et al. (2009) und BAXTER et al. (2012) erklärt werden, die herausfanden, dass die DT von Biomassen durch die Wechselwirkung von Si- und Alkali-Gehalt bestimmt wird.

Wie schon in Kapitel 5.1.1.2 dargestellt, verringert eine Erhöhung des Kaliumgehaltes die Ascheerweichungstemperatur von siliziumreichen Biomassen.

RÖHRIG's Analysen (2012) der Si-, K- und Ca-Gehalte von Miscanthus (Typ 34 Kenn 8. J.), Paulownia und der Mischpellets (siehe Tabelle A9, Anhang) ergaben, dass sich das Si / K Verhältnis der Mischpellets (0,84) im Vergleich zu dem reinen Miscanthus (2,55) verringert. Die Differenz der K- und Ca-Gehalte zwischen den arithmetischen Mitteln der einzelnen Biomassen und den Gehalten in den Mischpellets lassen analysebedingte Fehler vermuten. Dennoch zeigt sich eine deutliche Tendenz, dass das Si / K-Verhältnis in den Mischpellets im Vergleich zu Miscanthus geringer ist.

Wie ebenfalls schon in Kapitel 5.1.1.2 gezeigt, führt nach ÖHMANN et al. (2009) und BAXTER et al. (2012) eine Verringerung des Si / K Verhältnisses bei siliziumreichen Biomassen zu einer Absenkung der DT. Die Verringerung des Si / K Verhältnisses der Mischpellets resultierte aus der Mischung des siliziumreichen Miscanthus mit Paulownia, die bei minimalem Siliziumanteil sehr hohe Kaliumgehalte aufwies. Da sich die Calciumgehalte der Varianten nur minimal veränderten, ist davon auszugehen, dass primär die Erhöhung des Kaliumgehaltes zu der Verringerung der DT von den siliziumreichen Mischpellets führte. Auch GATTERNIG et al. (2010) und KAPPLER et al. (2013) stellen fest, dass Kalium und Silizium bei der Verbrennung von Biomassen miteinander zu $K_2Si_4O_9(s)$ reagieren können. Dieses Alkalisilikat hat eine Schmelztemperatur von 800°C . Deshalb kann es bei Brennraumtemperaturen von über 1.000°C zur Agglomeration von kalium- und siliziumreichen Aschen kommen. Als mögliche Maßnahme gegen die Schlackebildung schlagen diese den Einsatz von Kaolin vor. Dazu bestätigen FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008), BOSTRÖM et al. (2009), PETERSON et al. (2009) und KHALIL et al. (2011), dass die Zugabe von Kaolin während der Verbrennung von Biomassen die Schlackebildung minimieren kann. Weitergehend beschreiben diese Kaolin als ein deutlich effektiveres DT-erhöhendes Additiv als beispielsweise Calciumcarbonat (CaCO_3), Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) oder Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). In dem folgenden Kapitel 5.4.2 werden die Ergebnisse des Kaolinbeimischungsversuches zu den Mischpellets diskutiert und die Wirkung von Kaolin auf das Ascheschmelzverhalten erörtert.

5.4.1.3 Zwischenfazit

Die Brennstoffanalyse ergab, dass die Mischpellets in Bezug auf Brennwert, Asche- und der N-Gehalt die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) erfüllen. Dagegen liegt der S- und Cl-Gehalt minimal über den Grenzwerten dieser Norm. Daraus resultiert, dass die Pellets nicht der Norm entsprechen. Damit Miscanthus-Mischpellets in KFAs verbrannt werden dürften, müsste die Norm für Mischbrennstoffe (DIN_EN 14961-6) in der 1. BImSchV verankert werden. Da dies bisher noch nicht erfolgt ist, dürfen diese Pellets nicht in KFAs verbrannt werden.

Entgegen der Hindernisse, die sich aus der Brennstoffart ergeben, lässt ein erster Verbrennungsversuch vermuten, dass die Mischpellets die emissionsrechtlichen Anforderungen erfüllen könnten (WENGHOEFER et al., 2012). Deren erste Ergebnisse werden derzeit in weiteren Kurz- und Langzeitverbrennungsversuchen versucht zu verifizieren.

Aus anlagentechnischer Sicht würde es jedoch vermutlich bei der Verbrennung der Mischpellets, ohne Zumischung von Additiven zu einer Verschlackung im Brennraum kommen.

5.4.2 Einfluss von Kaolinzugaben auf die DT

Die Brennstoffanalysen zeigen, dass die Asche der Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia (0-Variante) vermutlich aufgrund eines Si / K- Wirkkomplexes bei 915°C zu erweichen beginnt.

Da in der Literatur berichtet wird, dass die Beimischung von Kaolin zu Biomassen eine geeignete Maßnahme zur Erhöhung der DT sein kann, wurde im Rahmen vorliegender Arbeit untersucht, wie viel Kaolin der Biomasse beigemischt werden muss, um eine DT von über 1.100°C zu erreichen.

Es zeigt sich, dass im Vergleich zu der 0-Variante bereits ein Zuschlag von 0,25 M.-% Kaolin die DT der Mischpellets signifikant auf über 1.100°C anhebt. Zur Kontrolle wurde, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, das Kaolin den verschiedenen Gemischformen zugegeben. Alle drei Varianten zeigen bei steigenden Kaolinzuschlagsmengen die gleichen Tendenzen auf. Dabei erhöhen sich die DTs bei steigender Zuschlagsmenge (siehe Abb. 45).

Dieses Ergebnis bestätigt - auch für Miscanthus-Mischpellets - die Aussagen von GATTERNIG et al. (2010), FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008), BOSTRÖM et al. (2009), PETERSON et al. (2009) und KHALIL et al. (2011), dass Kaolin die DT von Biomassen erhöht. Laut BOSTRÖM et al. (2009) und KAPPLER et al. (2013) ist diese Wirkung auf die Alkali- bzw. Erdalkalibindung durch Kaolin während der Verbrennung zurückzuführen.

Kaolin ist ein Zweischichttonmineral, welches primär aus Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) besteht (TRAN et al., 2005). Nach der Erkenntnis vorher genannter Autoren verdampft während der Erhitzung des Kaolinites auf 500 - 600°C Wasser, sodass ein meta-Kaolinit-Komplex ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) entsteht [1].



Dieser meta-Kaolinit-Komplex kann beispielsweise, bei SiO_2 Mangel mit KCl und H_2O zu Kalcilit (2KAlSiO_4), [2],



oder mit SiO_2 , KCl und H_2O zu Leucit ($2\text{KAlSi}_2\text{O}_6$) [3] reagieren.



BOWEN und ELLSTAD (1937) und KRACEK (1962) beschreiben, dass Kalcit bzw. Leucit eine Ascheerweichungstemperatur von 1.700 bzw. 1.660°C haben.

Da die Mischpellets sowohl hohe K- als auch Si- Gehalte aufweisen (siehe Tabelle A9, Anhang), kann vermutet werden, dass das Kaolin bei der Verbrennung primär zu Leucit reagiert (Gleichung 1 und 3). Da die Aschen aber nicht nähergehend untersucht wurden, konnte diese Annahme nicht verifiziert werden.

FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008) und BOSTRÖM et al. (2009) weisen darauf hin, dass die in Gleichung 2 und 3 dargestellten Reaktionen anstatt mit KCl beispielsweise ebenfalls mit K_2O oder K_2SO_4 stattfinden können. Zusätzlich könnte der meta-Kaolinit-Komplex auch mit Calcium reagieren, was ebenfalls eine Erhöhung der DT zur Folge hätte (KHALIL et al., 2011). Bei den Reaktionen nach Gleichung 2 und 3 entsteht zusätzlich zu den Kali-Aluminium-Silikaten HCl. Falls bei der Verbrennung der Biomassen mit Kaolin das Kalium in Form von K_2SO_4 vorliegt, kann auch H_2SO_4 (Schwefelsäure) gebildet werden. Daraus resultiert, dass die HCl- und SO_2 -Konzentrationen im Brennraum zunehmen. ZENG (2010) stellt bei der Verbrennung von Miscanthus fest, dass die Beimischung von 1 M.-% Kaolin die HCl- und SO_2 - Emissionen um 30 - 40% erhöht.

Da es keine rechtlichen Grenzwerte von HCl- und SO_2 -Emissionen gibt, könnte die Erhöhung dieser Konzentrationen lediglich ein anlagentechnisches Problem darstellen, da sowohl Chlorgas als auch Schwefeldioxid korrosiv wirken (LENZ, 2010). Aus dieser Problematik ergibt sich die noch weiter zu klärende Fragestellung, ob Kaolin, welches positiv auf das Ascheschmelzverhalten wirkt, trotz der möglichen negativen korrosiven Wirkung auf den Brennkessel, als Additiv in der Mischpelletproduktion eingesetzt werden sollte. Diese Frage wird derzeit ebenfalls durch die Verbrennungsversuche bei der Viessmann AG im Rahmen des Teilprojektes 2 des "C₄-Kompakt"- Projektes untersucht.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Kaolin ein geeignetes Additiv zur Erhöhung der DT von kalium- und siliziumreichen Biomassen ist. Zudem wurden alternative Reaktionen von Kaolin mit Calcium und anderen Kali-Verbindungen erörtert. Aus diesen Ausführungen geht hervor, dass Kaolin ein komplex wirkendes Additiv ist, dessen Wirkung auf die Verbrennung von Biomassen noch weiter untersucht werden sollte, da die genauen Wirkmechanismen bisher unbekannt sind.

Da ein Zuschlag von 0,25 M.-% Kaolin die DT der Mischpellets auf über 1.100°C erhöht, wurde während des in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Praxisversuches den Mischpellets 0,3 M.-% Kaolin zugegeben. Mit diesen 0,3 M.-% wurden bewusst 0,05 M.-% mehr Kaolin zugegeben, um die Kaolinwirkung zu verstärken. Von einer weiteren Erhöhung der Kaolinmenge wurde abgesehen, da bereits die 0,3 M.-%ige Kaolinbeimischung eine theoretische Aschehalterhöhung auf 1,75 M.-% zur Folge hatte.

Um die Versuchsergebnisse für die Praxis bestätigen zu können, sollten die Verbrennungsversuche des Teilprojektes 2 des "C₄-Kompakt"- Projektes bei weiteren Betrachtungen miteinbezogen werden.

5.4.3 Alternative Rohstoffe als Presshilfsstoffe

Als potentielle Additive, welche den Prozessschritt der Pelletierung optimieren sollen, wurden Melasse aus Zuckerrüben, Maisstärke und Traubentrester untersucht. Nach HASLER und NUSSBAUMER (2001) können Presshilfsstoffe, wie z.B. Stärke, die mechanische Festigkeit von Pellets erhöhen. Additive sind zudem ausdrücklich nach den bestehenden EN-Pelletnormen zugelassen (DIN_EN 14961- 2 und - 6).

Die Aschegehalts-Analyse der drei ausgewählten Additive ergab, dass Stärke mit 0,1 M.-%, bezogen auf die TM, den geringsten Aschegehalt aufweist. Traubentrester hat 5,4 M.-% und Melasse über 10 M.-% Asche. Der eigene ermittelte Aschegehalt des Traubentresters liegt im Mittel der Angaben von KRISTÖFEL und WOPIENKA (2012).

Melasse wurde aufgrund des zu hohen Aschegehaltes aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, da ein Zuschlag von 1 M.-% Melasse zu dem Biomassegemisch den Aschegehalt des Gemisches um 0,1 M.-% hätte ansteigen lassen.

Ebenso wurde in den folgenden Untersuchungen Stärke als Additiv nicht weiter mit in Betracht gezogen, da der Einfluss der Beimischung von Stärke auf den Pelletierungsprozess schon ausreichend untersucht wurde. So stellten unter anderem KALIYAN und MOREY (2009) fest, dass die Beimischung von Stärke die Abriebfestigkeit von Pellets erhöht und somit positiv auf die Pelletierung wirkt. Die Tatsache, dass Stärke ein Handelsgut ist und aktuell mit 500 € t⁻¹ gehandelt wird (ANONYMUS 7, 2012), war ein weiterer Grund, sie aus den Betrachtungen auszuschließen.

Dagegen ist Traubentrester ein Abfallstoff der Weinerzeugung, welcher in der Regel in den Weinberg zurückgebracht wird. Im weiteren Verlauf wurde der Einfluss einer Tresterzugabe auf die Pelletierungseigenschaften überprüft. Dafür wurde ein Gemisch aus *M. x g.* und Paulownia mit einem Tresterzuschlag von 0 M.-% und 1 M.-% pelletiert. Es zeigt sich, dass die Variante mit einem Tresterzuschlag für die Pelletierung einen signifikant geringeren spezifischen Energiebedarf aufweist. Diese Verringerung der $E_{spez.}$ um knapp 10% entstand durch einen geringeren Leistungsbedarf bei gleichbleibendem Durchsatz.

Der geringere Leistungsbedarf ist vermutlich auf einen geringeren Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize zurückzuführen. Der eingesetzte Traubentrester enthielt neben Traubenschalen sehr viele Traubenkerne, welche nach FRÖMBGEN (1942) und ROHNE (1984) Ölgehalte von 10 bis 18 M.-% aufweisen. Wie schon in Kapitel 2.2.2.4 gezeigt wurde, reduziert Öl die Reibung in der Matrize, sodass der Durchsatz bei gleichbleibendem Leistungsbedarf erhöht werden kann (BRIGGS et al., 1999 und KALIYAN und MOREY, 2009).

Die Ergebnisse der Analyse der Abriebfestigkeit und Schüttdichte der beiden Pelletvarianten stimmen jedoch insofern nicht mit den Aussagen von KALIYAN und MOREY (2009) überein, als die physikalische Pelletqualität der Variante mit Trester schlechter sein müsste als die der Variante ohne Trester. Die Analysewerte zeigen aber, dass keine signifikanten

Unterschiede zwischen den beiden Varianten erkennbar sind. Dass sich die physikalische Qualität durch die Tresterbeimischung nicht signifikant verringert, könnte möglicherweise dadurch erklärt werden, dass die Traubenschalen laut ELWELL und DEHN (1939) bis zu 3 M.-% (TM) Pektine enthalten. Nach ABOUSTEIT und KEMPF (1974) haben Pektine eine klebende Wirkung, sodass es sein könnte, dass diese Pektine die Festigkeit der Pellets positiv beeinflusst haben.

Somit zeigt sich, dass die Beimischung von Traubentrester die Pelletierung positiv beeinflusst, indem sie den Leistungsbedarf um 9% reduziert.

Dadurch kann im Vergleich zu der Pelletierung ohne Trester der Durchsatz bei gleichbleibender Leistung und Pelletqualität erhöht werden, sodass der spezifische Energiebedarf um ebenfalls 9% verringert werden kann.

Im Vergleich zu Stärke ist Traubentrester eine kostengünstige Alternative, da lediglich bei der Aufbereitung Kosten entstehen. Traubentrester hat laut ROHNE (1984) einen Ausgangstrockenmassegehalt von rund 40 M.-%. Dieser muss jedoch durch Pressen und Trocknung auf über 85 M.-% erhöht werden, damit man Trester als lagerfähiges Additiv einsetzen kann. Außerdem müssen Traubenschalen und Kerne mittels Siebung von dem Stielgerüst getrennt werden und in einem weiteren Prozessschritt auf kleiner 1 mm zermahlen werden. Nach eigenen Berechnungen und auf Grundlage von gesammelten Daten der KTBL (2006) kostet diese Weiterverarbeitung als Additiv 130 € t⁻¹. Somit kann durch die Substitution von Stärke, die 500 € t⁻¹ kostet, durch Traubentrester der Pelletierungsprozess ökonomisch optimiert werden.

Es kann festgehalten werden, dass Traubentrester als Presshilfsstoff den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung reduziert, die physikalische Pelletqualität erhöht und kostengünstiger als Stärke ist.

5.4.4 Pelletierungspraxisversuch

In den vorherigen Abschnitten wurde aufgezeigt, dass sich die Mischpellets aus verbrennungstechnischer Sicht für den Einsatz in KFAs eignen. Zusätzlich konnte dargestellt werden, dass zum einen das Additiv Kaolin das Ascheschmelzverhalten der Pellets optimiert und zum anderen der Presshilfsstoff Traubentrester ein geeignetes Substitut für Stärke sein kann.

Der folgende Abschnitt soll zusammenfassend darstellen, dass das Biomassegemisch aus Miscanthus-Paulownia unter Beimischung von Traubentrester und Kaolin in einem größeren Maßstab unter Berücksichtigung von prozesstechnologischen Aspekten pelletiert werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde neben dem vorher beschriebenen Gemisch ein Gemisch aus Miscanthus und Fichten-Holz pelletiert, um einen Referenzwert für weitere Diskussionen zu generieren.

Zusätzlich zu den beiden Varianten Miscanthus / Paulownia und Miscanthus / Fichte wurde in besonderem Maße der Einfluss von Kaolin auf den Pelletierungsvorgang untersucht.

Als Versuchsparameter zur Überprüfung der Pelletierbarkeit der verschiedenen Varianten wurden der spezifische Energiebedarf, die visuellen und die physikalischen Qualitätsparameter Abriebfestigkeit und Schüttdichte gewählt. Dabei war der Praxisversuch in einen Vor- und Hauptversuch unterteilt. Im Vorversuch wurde zum einen mit dem Gemisch Miscanthus / Paulownia + Kaolin der optimierte Durchsatz ermittelt und zum anderen wurden mit dem Miscanthus- / Fichten-Gemisch + Kaolin geeignete Matrizen für den Hauptversuch identifiziert. Anhand der daraus resultierenden Ergebnisse wurden für den Hauptversuch die Maschineneinstellungen vorgenommen und die entsprechenden Matrizen ausgewählt.

5.4.4.1 Tastversuch

Miscanthus x giganteus-Paulownia tomentosa-Gemisch

Die Auswahl der Matrize für diesen Versuch erfolgte aufgrund von Erfahrungswerten durch den Versuchsingenieur der Firma Amandus Kahl. Der Vorversuch zur Pelletierung mit einer 6 mm Lochmatrize und einer Presskanallänge von 42 mm ergab, dass die visuelle Pelletqualität bei steigender Durchsatzerhöhung (bis 400 kg h^{-1}) zunimmt.

Dieses Ergebnis steht zunächst einmal im Widerspruch zu den erörterten Ergebnissen aus Kapitel 5.1.2.3, in dem sich zeigte, dass eine Durchsatzerhöhung zu einer Verbesserung der Pelletqualität führt. Bei näherer Betrachtung wird jedoch ersichtlich, dass der Wassergehalt der Biomasse-Gemische, im Gegensatz zu den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Versuchen (14 M.-% H_2O), im Praxisversuch geringer war (10 – 11 M.-% H_2O). Hier hatten die Biomassegemische andere Pelletierungseigenschaften, die vermutlich auf ein verändertes Ligninerweichungsverhalten zurückzuführen sind, bedingt durch die Änderung des Wassergehaltes. Somit bestätigen sich die Erkenntnisse aus Kapitel 2.2.2.4 und 5.1.2.4, dass die Pelletqualität multifaktoriellen Einflüssen unterliegt.

Dennoch können die Ergebnisse aus Tabelle 21 vermutlich durch den Anstieg der Matrizentemperatur erklärt werden. Weiterhin ist aus dieser Tabelle zu entnehmen, dass die Temperatur der Pellets mit einer Durchsatzerhöhung ansteigt. Daraus resultierte, dass das Lignin in der Biomasse schneller erweichen konnte, was eine höhere Partikelbindung der Pellets zur Folge hatte. Diese höhere Partikelbindung ist aus einer Abnahme der visuell erkennbaren Risse in den Pellets abzuleiten (vgl. Abb. 11, Kapitel 3.1.2.2).

Parallel zur Verbesserung der visuellen Pelletqualität sinkt der spezifische Energiebedarf mit steigender Durchsatzmasse bis zu einem Leistungsbedarf, von 85 % der maximalen Antriebsleistung. Ab einem Leistungsbedarf von 90% der maximalen Antriebsleistung beginnt der spezifische Energiebedarf wieder zu steigen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1.2.3.

In der Summe bestätigt der Praxisversuch an einer größeren Pelletpresse (Typ 33/390) die Erkenntnisse aus den Laborversuchen (Typ 14-175) und die Aussagen von BUSCHHART (2012), dass die optimale Betriebsleistung von Pelletpressen bei 80 - 90% der maximalen Antriebsleistung liegen sollte. Diese Betriebsleistung wird neben der Biomasseart bzw. -beschaffenheit und Matrizenwahl von der Durchsatzmasse beeinflusst.

Miscanthus x giganteus-Fichten-Gemisch

In Tabelle 21 bestätigt sich ebenfalls die Erkenntnis aus Kapitel 5.1.2.2, dass die Matrizenwahl auf die Biomasseart abgestimmt werden muss. Die Versuchsnummern 6 und 7 beweisen, dass Matrizen mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 7 und 1 : 6 ungeeignet für die Pelletierung des Biomassegemisches aus *Miscanthus x giganteus* und Fichte sind. Bei diesen Versuchsvarianten kam es zu einem Verstopfen der Matrize. Dieses Phänomen ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Reibungswiderstand zwischen Matrize und Material größer war, als die Kraft, die durch den Koller auf das Material wirkte. Somit konnte wie auch HOLM et. al (2006) ausführen, das Material nicht durch die Löcher der Matrize gepresst werden.

Zwischenfazit

Grundsätzlich bestätigt der Vorversuch die Erkenntnisse aus dem Kapitel 5.1.2 und zeigt, dass die in den Laborversuchen identifizierten Mechanismen auch auf größere Pelletpressen übertragbar sind. Insbesondere wird durch den Praxisversuch dargestellt, dass die Betriebsleistung der Pelletpresse 80 – 90% der maximalen Antriebsleistung aufweisen sollte. Zudem ist zu entnehmen, dass die Matrizenwahl auf die chemische und physikalische Zusammensetzung des Biomassegemisches abgestimmt werden sollte. Aus diesem Grund kann die vorliegende Arbeit keine allgemeingültige Empfehlung für Maschineneinstellungen während der Miscanthus-Mischpelletproduktion geben.

5.4.4.2 Hauptversuch

In dem Hauptversuch konnte durch die in den Vorversuchen ermittelten Maschineneinstellungen (siehe Tabelle 21 Nr.4 und Nr.8) ein stabiler Pelletierungsprozess garantiert werden. Dabei zeigt sich, dass die Pelletierung der Miscanthus-Paulownia- Mischung ohne Kaolin am wenigsten Energie benötigt. Die beiden Varianten mit Kaolin haben einen mittleren spezifischen Energiebedarf und die Variante Miscanthus und Fichte ohne Kaolin hat den signifikant höchsten.

Einfluss der Biomasseart auf den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung

Das Ergebnis, dass die Pelletierung eines Gemisches mit Paulownia weniger Energie benötigt als die eines Gemisches mit Fichte, ist zum einen vermutlich auf den - im Vergleich zu Fichten-Holz - geringen Wert des Elastizitätsmoduls von Paulownia-Holz (siehe Tabelle 25) zurückzuführen. Laut STRIETZEL (2005) muss für die Verformung von Körpern bei sinkendem Elastizitätsmodul weniger Kraft aufgewandt werden. Da während der Pelletierung Partikel verformt werden (HOLM et al., 2006), beeinflusst das Elastizitätsmodul der Biomassen den Kraftaufwand des Pressvorgangs.

Zum anderen könnten Polyphenole, die in Paulownia-Holz enthalten sind (SI et al., 2011), als Schmiermittel zwischen Material und Matrice gewirkt haben, sodass der Kraftaufwand für den Pressvorgang von Paulownia im Vergleich zu Fichte reduziert wurde.

Generell bestätigt der Hauptversuch die Erkenntnisse von SALMEN (1992), KALIYAN und MOREY (2009) und STELTE et al. (2011a), dass die Biomasseart einen signifikanten Einfluss auf die Pelletierung hat.

Einfluss von Kaolin auf den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung

Neben dem unterschiedlichen Pressverhalten von Biomassen lässt der Vergleich des spezifischen Energiebedarfs der Miscanthus-Paulownia Gemische mit und ohne Kaolin vermuten, dass ein Kaolinzusatz den Energiebedarf erhöht.

Demgegenüber hat bei dem Miscanthus-Fichtengemisch die Variante ohne Kaolin den höheren spezifischen Energiebedarf, sodass auf den ersten Blick ein umgekehrt proportionales Wirkverhältnis erkennbar ist. Unter Einbeziehung der Tabelle 10 wird aber ersichtlich, dass der Wassergehalt der Miscanthus-Fichten-Mischung mit Kaolin größer ist als bei der Variante ohne Kaolin, was wohl auf die erhöhte Schmiermittelwirkung des Wassers zurückzuführen ist.

Generell ist davon auszugehen, dass eine Zugabe von Kaolin - unter Beibehaltung aller anderen Faktoren - eine Erhöhung des spezifischen Energiebedarfes der Pelletierung zur Folge hat. Dies könnte zum einen auf eine mögliche Abrasivität von Kaolin oder zum anderen auf eine Vergrößerung der Reibungsfläche zurückzuführen sein.

Da aber die Mohshärte von Kaolinit 2,5 beträgt (PATTON, 1973), was einer Vickershärte (HV) von rund 70 HV entspricht, ist Kaolin gegenüber Stahl (>100 HV) (KAMMER et al., 2012) als nicht abrasiv einzuschätzen. Daher ist anzunehmen, dass primär die Reibungsflächen-erhöhung durch die Kaolinpartikel den Energiebedarf beeinflusst.

Vermutlich haften die Kaolinpartikel an der Oberfläche der Biomassepartikel an und verändern somit die Oberflächenbeschaffenheit des Materials. Dies führt zu einer Erhöhung der Adhäsionskräfte, was wiederum den Reibungskoeffizienten anhebt, sodass der Kraftaufwand für den Pressvorgang steigt (POPOV, 2009). Ein Indiz für diese höhere Reibung

während der Pelletierung der Kaolinvariante könnte insbesondere die Temperaturerhöhung der Miscanthus-Paulownia-Pellets mit Kaolin sein.

Der Vergleich mit den Miscanthus-Fichten-Varianten (mit und ohne Kaolin) zeigt auf, dass eine Erhöhung des Wassergehaltes eine mögliche Optimierungsmaßnahme für die Pelletierung von Biomassen mit Kaolinzusatz sein könnte. Dabei wirkt die Schmiermittelwirkung des Wassers entgegen der reibungskoeffizient-erhöhende Wirkung des Kaolins.

Einfluss der Biomasseart auf die physikalische Pelletqualität

Die in Abbildung 51 (Kapitel 4.4.4.2) dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass mit Ausnahme der Abriebfestigkeit der Variante Miscanthus und Fichte mit Kaolin die Pellets der Miscanthus-Fichten-Gemische eine bessere Pelletqualität als die Miscanthus-Paulownia-Gemische aufweisen. Dies ist wahrscheinlich auf einen höheren Reibungskoeffizienten der Miscanthus-Fichten-Pellets zurückzuführen. In Kapitel 5.3.3 wurde bereits erörtert, dass Fichten-Holz ein höheres Elastizitätsmodul aufweist als Paulownia-Holz, wodurch der Reibungskoeffizient erhöht wird. Da die Kollermühle eine modifizierte Pelletpresse ist (SITZMANN, 2007), können diese Erkenntnisse ebenfalls auf die Ergebnisse dieses Pelletierungsversuches übertragen werden.

Einfluss einer Kaolinbeimischung auf die physikalische Pelletqualität

Die Analyse der Abriebfestigkeit und der Schüttdichte zeigt auf, dass die Pellets des Miscanthus-Paulownia-Gemisches ohne Kaolin, welche den signifikant geringsten Energiebedarf haben, die schlechtesten physikalischen Eigenschaften aufweisen. Die Kaolinzugabe führte zu einer besseren Pelletqualität.

Dieser Anstieg ist wahrscheinlich auf die Temperaturerhöhung während des Pressvorgangs zurückzuführen. In Kapitel 5.1.2 wurde bereits erörtert, dass während des Pressvorganges höhere Temperaturen zu einer Erhöhung der Abriebfestigkeit von Pellets führen können. Des Weiteren ist zu vermuten, dass die höhere Reibung zwischen Material und Matrize auch den Widerstand des Materials zum Koller vergrößerte. Daraus resultierte, dass das Material stärker komprimiert wurde, was eine Erhöhung der Schüttdichte zur Folge hatte.

Im Gegensatz zu den Miscanthus-Paulownia-Varianten haben die Pellets des Fichten-Miscanthus-Gemisches ohne Kaolin (höchster spezifischer Energiebedarf) die beste Qualität. Dies ist, wie schon im oberen Teil erläutert, auf die hohen Temperaturen während des Pressvorgangs zurückzuführen. Dem gegenüber verringert sich die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Variante mit Kaolin. Diese Qualitätseinbuße ist wahrscheinlich auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. Die geringere Abriebfestigkeit der Variante Miscanthus / Fichte - Kaolin kann zum einen vermutlich durch die geringere Lignin-erweichung erklärt werden. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Kaolinpartikel die

von REZNICHENKO (2003) beschriebene Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Partikeln gehemmt haben, sodass die Bindungskräfte in den Pellets geringer waren. Weiterhin ist davon auszugehen, dass der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize während der Pelletierung des Miscanthus-Fichten-Gemisches mit Kaolin aufgrund des etwas höheren Wassergehaltes geringer war, sodass das Gemisch schneller durch die Matrize gepresst werden konnte. Aufgrund dieses schnelleren Pressvorganges durch die Matrize wurde die Biomasse auch geringer verdichtet, was eine Abnahme der Schüttdichte zur Folge hatte. Diese Annahme bestätigt sich im Massendurchsatz der beiden Miscanthus-Fichten-Varianten, wobei das Gemisch mit Kaolin mit einem höheren Durchsatz (390 kg h^{-1}) pelletiert wurde als das Gemisch ohne Kaolin (363 kg h^{-1}).

Insgesamt geht aus dem Vergleich der vier Varianten hervor, dass ein Kaolinzusatz zum einen den Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize erhöht und zum zweiten die Bindung der Biomassepartikel behindern kann.

Zwischenfazit

Der Hauptversuch verdeutlicht, dass die Pelletierung bei gleichen Maschineneinstellungen und Feuchtegehalten von einem Miscanthus-Gemisch mit Paulownia weniger Energie benötigt als die Pelletierung von Miscanthus mit Fichte. Gleichzeitig weisen die Miscanthus-Fichten-Pellets aber eine bessere physikalische Qualität auf als die Miscanthus-Paulownia-Pellets. Dennoch ist aufgrund der Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.1.2 und 5.2.3 anzunehmen, dass die schlechtere Qualität der Miscanthus-Paulownia-Gemische durch Änderungen der Maschineneinstellungen und des Wassergehaltes optimiert werden können. Allerdings ist zu vermuten, dass sich dadurch der spezifische Energiebedarf verändert.

Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass Kaolin einen bedeutenden Einfluss auf die Pelletierung von Biomassen hat. Dabei wird insbesondere die physikalische Größe des Reibungskoeffizienten, welcher den spezifischen Energiebedarf und die physikalische Pelletqualität beeinflusst, durch eine Kaolinzugabe erhöht. Dies hat zur Folge, dass der spezifische Energiebedarf ansteigt. Diesem Anstieg kann jedoch durch eine Änderung des Wassergehaltes der Biomasse entgegengewirkt werden.

Im Gegensatz zu den eindeutigen Ergebnissen der Energiebedarfsermittlungen wurde aufgezeigt, dass sich eine Kaolinzugabe zum einen positiv (Miscanthus und Paulownia) und zum anderen negativ (Miscanthus und Fichte) auf die physikalische Pelletqualität auswirken kann. Da dieses Phänomen im Rahmen vorliegender Arbeit nicht näher untersucht werden konnte, sollten zukünftige Forschungsarbeiten diese Fragestellung näher untersuchen. Weitere Forschungserkenntnisse wären nicht nur für die Miscanthus-Mischpelletproduktion von Interesse, sondern könnten allgemein die Pelletproduktion von landwirtschaftlichen Produkten und Reststoffen betreffen.

Generell bestätigt der Hauptversuch die bereits in den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse, dass eine Vielzahl von Faktoren die Pelletierung von Biomassen beeinflusst. Somit lässt sich festhalten, dass jeder Pelletierungsprozess an die Biomassegemische angepasst werden muss, um eine optimale Qualität zu garantieren. Auch wenn im Hauptversuch nicht alle Varianten die Anforderungen der Pelletnorm erfüllen, so ist dennoch anzunehmen, dass es möglich ist, Miscanthus-Mischpellets mit Holzanteilen unter optimalen Maschineneinstellungen und Wassergehalten zu normkonformen Pellets (Abriebfestigkeit und Schüttdichte) zu komprimieren.

5.4.5 Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

In den vorherigen Abschnitten wurde erörtert, dass Miscanthus-Paulownia-Mischpellets aus verbrennungs- und emissionstechnischer Sicht für die Verbrennung in KFAs geeignet sind und aus produktionstechnischer Sicht problemlos hergestellt werden können.

Der letzte Abschnitt der Diskussion erörtert, ob die Produktion dieser Mischpellets auch aus ökonomischer Sicht rentabel ist. Um diese Frage zu beantworten, werden in einem ersten Schritt der Gewinn und die interne Rendite der Unternehmung diskutiert. Im zweiten Schritt wird, mit Hilfe der Ergebnisse der Sensitivanalyse der Schlüsselfaktoren aufgezeigt, unter welchen Voraussetzungen Gewinn und interne Rendite der Unternehmung maximiert werden können.

5.4.5.1 Gewinn und interne Rendite

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit der in Kapitel 3.4.5 geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion ergab, dass die Unternehmung einen jährlichen Verlust von 238.127 € erwirtschaften würde. Dabei beträgt die interne Rendite -12,9%. Es muss festgehalten werden, dass die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion unter den getroffenen Annahmen unrentabel ist.

Bisher wurden mit Ausnahme der Untersuchungen von THEK und OBERNBERGER (2004) im deutschsprachigen Raum keine systematischen Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion durchgeführt. Die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsanalysen, die außerhalb des deutschsprachigen Raumes durchgeführt wurden, wie z. B. von MANI et al. (2006a) oder PIRRAGLIA et al. (2010), können aufgrund des unterschiedlichen Preisniveaus von Kosten und Erlös nicht mit den eigenen Ergebnissen verglichen werden.

Eine relativ aktuelle Angabe zu Kosten und Erlösen einer Pelletproduktion in Deutschland liefern LENZ und ZENG (2012). Diese beschreiben, dass für die Produktion von Pellets aus Rebholz und Traubentrester Kosten von 100 bis 200 € t⁻¹ entstehen können, und dass der Verkauf der Pellets einen Erlös von 150 – 180 € t⁻¹ erbringen kann. Da diesen Werten aber

keine Berechnungsgrundlage beigefügt ist, können diese Angaben nicht überprüft und mit den eigenen Daten verglichen werden.

Wie schon angesprochen, hatten THEK und OBERNBERGER (2004) eine umfangreiche Berechnung der Produktionskosten für Holzpellets in Österreich durchgeführt. Jedoch ist diese umfangreiche Analyse für aktuelle Untersuchungen nur bedingt hilfreich, da deren Ergebnisse auf einem Preisniveau vor 2004 basieren.

Aufgrund des Defizites an Vergleichsdaten wurde im Rahmen vorliegender Arbeit durch eine Umfrage versucht, bei deutschen Pelletproduzenten grobe Kennwerte für die Produktion von Pellets zu erlangen. Allerdings musste festgestellt werden, dass alle befragten Hersteller von Pellets keinerlei Auskünfte über ökonomische Aspekte der Pelletproduktion geben.

Aus den oben genannten Gründen konnten daher in der vorliegenden Arbeit die eigenen Kennwerte nicht mit anderen Angaben verglichen werden.

5.4.5.2 Kosten als Schlüsselfaktoren

Da bereits festgestellt wurde, dass die Mischpelletproduktion des Planszenarios unrentabel ist, soll im Folgenden anhand von Schlüsselfaktoren aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen eine Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets rentabel sein könnte. Anhand der Abbildung 54 (Kapitel 4.4.5.2) lassen sich kostenseitige Schlüsselfaktoren identifizieren. Dabei ist die Rohstoffbereitstellung der bedeutendste Kostenfaktor. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006a).

Wie bereits in Kapitel 4.4.5.2 dargestellt, müssten die Rohstoffkosten um 25% von 85 (Planszenario) auf $63,5 \text{ € t}^{-1}$ sinken, damit die Gewinnschwelle erreicht würde.

Aus Tabelle 12 (Kapitel 3.4.5.2) geht hervor, dass sich die Rohstoffkosten aus den Produktions- und Transportkosten (von Landwirt zu Pelletwerk) zusammensetzen. Da die Produktionskosten nicht weiter reduziert werden können (SIEVERDINGBECK et al., 2010 und PÜHL, 2012), könnte lediglich eine Verringerung der Transportkosten diesen Kostenposten reduzieren. Auch DI GIACOMO und TAGLIERI (2009) bemessen dem Transportweg einen bedeutenden Einfluss auf den Schlüsselfaktor Rohstoffkosten bei.

In Kapitel 3.4.5.2 wurde angenommen, dass bei einem Transportweg von 30 km Transportkosten von 20 € t^{-1} entstehen. Würde sich der Transportweg auf 15 km verringern, so könnten die Transportkosten auf 10 € t^{-1} (TOEWS, 2010) reduziert werden, was zur Folge hätte, dass die Gesamtkosten der Pelletproduktion auf $174,4 \text{ € t}^{-1}$ sinken würden. Damit sowohl 5.000 t Miscanthus als auch 5.000 t Paulownia aus diesem Umkreis von 15 km bezogen werden können, müssten rund 300 ha Miscanthus (Ertrag von $15 \text{ t (TM) ha}^{-1}$) und 400 ha Paulownia (Ertrag $12 \text{ t (TM) ha}^{-1}$) in diesem Bereich angebaut werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese Verringerung der Strecke von Feld zu Pelletwerk zur Folge hat, dass es schwieriger würde, die entsprechend benötigte Anbaufläche zu erhalten.

Zusätzlich dazu könnten möglicherweise die Transportkosten durch eine Erhöhung der Schüttdichte des Miscanthus-Erntegutes gesenkt werden. Da das Miscanthus-Erntegut ohne Vorkomprimierung mit 140 kg m^{-3} eine relativ geringe Schüttdichte hat (HAYER, 2010), wird oft das maximale Ladegewicht von Transportfahrzeugen nicht ausgelastet. Eine Vorkomprimierung hätte zur Folge, dass bei gleichem Ladevolumen die Transportmasse zunähme.

Eine solche Vorkomprimierung könnte beispielsweise durch eine Erntekette nach dem „Luxemburger Modell“ erreicht werden. Bei diesem Ernteverfahren (siehe Abb. A8, Anhang) wird Miscanthus in eine Quaderballenpresse gehäckselt, welche den Miscanthus vorkomprimiert. Nach NEUBARTH und KALTSCHMITT (2000) kann dadurch die Schüttdichte von halmgutartiger Biomasse um ca. 100% erhöht werden. Somit könnten die Transportkosten um 50% durch eine Vorkomprimierung reduziert werden. Falls vorkomprimierter Miscanthus in der Mischpelletproduktion eingesetzt würde, müsste dem Produktionsprozess als ersten Prozessschritt eine Ballenauflösung hinzugefügt werden.

THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006a) benennen die Personalkosten als zweit höchste Kostenposition nach den Rohstoffkosten. In Bezug auf dieses Ergebnis stimmen die eigenen Erkenntnisse mit denen der benannten Untersuchungen überein. Da aber die Personalkosten im Fall des Planszenarios nur geringfügig reduziert werden könnten, ist in Bezug auf die Gesamtkostenberechnung keine signifikante Kostenminimierung möglich.

Als dritt größten Schlüsselfaktor beschreiben THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006a) die Energiekosten. In deren Szenarien verursacht vor allem die Trocknung (thermische Energie) hohe Energiekosten, die 30 bis 40% der Gesamtkosten verursachen. Dabei beträgt neben den Stromkosten der Anteil der Kosten für Wärme knapp 70% der Energiekosten.

Im Gegensatz zu diesen klassischen Produktionsszenarien, die primär feuchte Sägespäne (60 M.-% TM) als Rohstoff einsetzen, haben die Kosten für thermische Energie (5%) in dem eigenen Szenario eine untergeordnete Rolle, da Miscanthus mit einem Trockenmassegehalt von 85 M.-% (Erntezeitpunkt April) angeliefert wurde. Lediglich Paulownia müsste mit einem erntefrischen Trockenmassegehalt von 50 M.-% (MEIER und VETTER, 2004) auf 90 M.-% TM getrocknet werden. Diese Kosten könnten vermutlich durch eine Feldtrocknung nach der Ernte weiter verringert werden. Dies könnte z. B. kostengünstig erfolgen, wenn der Landwirt die Stämme auf dem Feld bündelte und vor dem Häckseln ein halbes Jahr trocknen ließe.

Somit bleibt festzuhalten, dass der holzartige Mischungspartner möglichst durch den Landwirt vorgetrocknet werden sollte, damit die Gesamtkosten der Pelletproduktion minimiert werden können.

Im Vergleich zu den Kosten für Wärme ist im Planszenario der Anteil für Stromkosten jedoch größer. Bezieht man die Strompreiseentwicklung der letzten 10 Jahre mit einer Steigerung um 40% (ANONYMUS 3, 2012) hinzu, so wird deutlich, dass insbesondere die Kosten für elektrische Energie ein Schlüsselfaktor der Pelletproduktion geworden sind. Sowohl mittel- als auch langfristig ist damit zu rechnen, dass die Stromkosten weiter ansteigen werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Stromverbrauch der Mischpelletproduktion zu reduzieren.

Wie bereits in Kapitel 5.3 aufgezeigt, können neuartige Zerkleinerungsverfahren den Stromverbrauch der Pelletproduktion reduzieren. Aus Kapitel 5.3 geht weiterhin hervor, dass insbesondere die Substitution der Hammermühle durch die Kollermühle, sowohl in dem Prozessschritt der Zerkleinerung als auch bei der Pelletierung, Energie einsparen kann. Allerdings konnte vorliegende Arbeit dieses Einsparungspotential nicht näher quantifizieren. Laut LEUER (2012) sind die Anschaffungskosten für eine Kollermühle nur geringfügig höher als die einer Hammermühle. Aus ökonomischen Gründen ist daher zu empfehlen, dass ein potentieller Mischpelletproduzent anstatt einer Hammermühle eine Kollermühle einsetzt.

Abbildung 54 verdeutlicht, dass neben den sonstigen Kosten (8%) und Additivkosten (1,5%) die kapitalgebundenen Kosten für Technik und Gebäude knapp 17% der Gesamtkosten verursachen. Diesen weiteren Kosten wird keine Schlüsselfunktion zugeschrieben, da diese Kosten kaum beeinflusst werden können. Insbesondere die sonstigen Kosten, die sich zu einem Großteil aus Kosten für Versicherung, Wasser, Grundsteuer und Steuerberater ergeben, sind an die Produktionskapazität des Pelletwerkes gebunden.

Die Kosten für Technik und Gebäude könnten theoretisch durch längere Abschreibungszeiträume minimiert werden. Dies wäre aber aus betriebswirtschaftlicher Sicht kritisch zu bewerten, da diese Maßnahme aufgrund eines zu hohen Verschleißes zu Produktionsstörungen führen könnte.

Eine weitere Option zur Minimierung der spezifischen Kapitalbindungskosten stellt laut MANI et al. (2006a) die Erhöhung der Produktionskapazität eines Pelletwerkes dar. So zeigen diese, dass eine Erhöhung der stündlichen Produktionskapazität von 2 auf 10 t h⁻¹ die Kapitalbindungskosten um knapp 50% reduzieren kann.

Im Fall der Miscanthus-Mischpelletproduktion ist jedoch von einer Erhöhung dieser Produktionskapazität abzuraten, da in einem solchen Fall ein höherer Rohstoffbedarf entstünde. Dieser höhere Rohstoffbedarf hätte vermutlich zur Folge, dass sich die Strecke des Rohstofftransportes von Feld zum Werk erhöht. Wie bereits zuvor beschrieben haben diese Transportkosten eine Schlüsselfunktion für die Gesamtkosten der Mischpelletproduktion. Obwohl die Erweiterung der Produktionskapazität trotz höherer Technikkosten zu sinkenden Gesamtkosten führen würde, sollte diese Option aufgrund höherer Transportkosten nicht in Betracht gezogen werden. Ebenso sollte die jährliche Produktionsmenge auch nicht niedriger als 10.000 t sein, da nach MANI et al. (2006a) ab

dieser Kapazität bei sinkenden Produktionskapazitäten die Gesamtkosten exponentiell ansteigen.

Somit zeigt sich, dass bei der Planung einer Mischpelletproduktion zwischen Produktionskapazitäten und Transportwegen abgewogen werden muss. Danach sollte in der Praxis anhand von örtlichen Gegebenheiten und Rohstoff- bzw. Flächenverfügbarkeiten eine Entscheidung getroffen werden.

Am Beispiel des Planszenarios zeigt sich, dass die Kostenposten Rohstoff und Energie als Schlüsselfaktoren den Gewinn der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion beeinflussen. Dabei wurde erörtert, dass beispielsweise die Verkürzung der Transportstrecke und eine Vorkomprimierung des Paulownia-Erntegutes die spezifischen Gesamtkosten um knapp 5% auf 174,4 € t⁻¹ reduzieren können. Dagegen konnte das tatsächliche Minimierungspotential der Energiekosten durch den Einsatz der Kollermühle und trockeneren Paulownia-Holzes nicht nähergehend quantifiziert werden.

5.4.5.3 Erlös als Schlüsselfaktor

In dem vorherigen Abschnitt wurde aufgezeigt, dass in dem Planszenario die Kosten der Mischpelletproduktion möglicherweise auf 174 € t⁻¹ minimiert werden könnten. Selbst unter diesen optimierten Voraussetzungen würde der Verlust je produzierter t Pellets noch 13 € betragen. Damit würde die Unternehmung einen jährlichen Verlust von 130.000 € erwirtschaften, was eine internen Rendite von -7% zur Folge hätte.

Neben einer Minimierung der Kosten kann der Gewinn durch eine Steigerung des Erlöses maximiert werden (ROLLWAGE, 1999). Somit müsste der Erlös um mindestens 13 € t⁻¹ erhöht werden, damit die Gewinnschwelle überschritten würde. Die Abbildungen 57 und 58 in Kapitel 4.4.5.2 zeigen, dass zum einen die Erhöhung des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets und zum anderen ein höheres Preisniveau der Mischpellets den Erlös maximieren können.

In dem Planszenario wurde ein EN_{plusA1}-Pelletpreis von 230 € t⁻¹ angenommen. ANONYMUS 12 (2013) zeigt auf, dass 2012 dieser Preis je nach Region und Abnahmemenge zwischen 220 und 260 € t⁻¹ schwankte. Insbesondere der Verkauf von kleineren Mengen bis 5 t erzielten dabei höhere Erlöse (durchschnittlich 240 € t⁻¹). Somit könnte ein möglichst großer Kundenstamm an Kleinabnehmern zu einer Erlösmaximierung führen.

Aufgrund der Produktionskapazitäten, Produktionsmengen und des Inlandsverbrauches kann für Deutschland festgestellt werden, dass derzeit ein Produktionsüberschuss an Qualitätspellets herrscht.

So stellt ANONYMUS 1 (2013) dar, dass 2012 in Deutschland 500.000 t mehr EN_{plus}-Pellets produziert als verbraucht wurden. Somit ist auf dem Inlandsmarkt das Angebot höher als die Nachfrage, was nach BECK (2008) zu einem geringeren Marktpreis führt.

Zusätzlich zu diesem Preisdruck konnten im Jahr 2012 die Pelletproduzenten nur rund 70% der tatsächlichen Produktionskapazitäten ausschöpfen (ANONYMUS 1, 2013). MANI et al. (2006a) weisen darauf hin, dass eine verringerte Ausschöpfung der Produktionskapazität zu einem sinkenden Gewinn führt, da in einem solchen Fall die kapitalgebundenen Kosten im Verhältnis zu dem Erlös höher sind. Daraus resultiert, dass die Pelletproduzenten versuchen ihre Kapazitäten voll auszuschöpfen, was wiederum in einer erhöhten Überschussmenge resultiert, sodass der Marktpreis weiter sinkt.

Diese Wechselwirkung kann letztendlich nur dann aufgelöst werden, wenn die Nachfrage nach Pellets steigt und die Produktionskapazitäten nicht weiter erhöht werden.

Da Anonymus 1 (2013) für das Jahr 2013 einen Anstieg von Pelletheizungen (+16%) prognostiziert, kann davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach Qualitätspellets zunimmt. Im Fall, dass keine weiteren Produktionskapazitäten in Deutschland geschaffen werden, ist davon auszugehen, dass auch der Marktpreis von Qualitätspellets ansteigt.

Unter diesen Gegebenheiten würde dann auch der Erlös der geplanten Miscanthus-Paulownia-Mischpellets zunehmen. Damit letztendlich die geplante Unternehmung – bei einem optimalen Kostenszenario – die Gewinnschwelle erreicht, müsste der Pelletpreis im Vergleich zum Marktpreis des Planszenarios (230 € t^{-1}) um rund 9% auf 250 € t^{-1} steigen (siehe Abb. 59).

Obwohl in diesem Szenario die Gewinnschwelle erreicht würde, wäre laut SCHNEEBERGER UND PEYERL (2011) die Unternehmung immer noch nicht zu empfehlen, da die interne Rendite zu gering wäre. Nach SCHNEEBERGER UND PEYERL (2011) und ANONYMUS 9 (2013), sollte die interne Rendite einer Unternehmung mindestens die Höhe des kalkulatorischen Zinssatzes betragen, damit diese sinnvoll ist. Daraus resultiert, dass der Marktpreis der EN_{plus} -Pellets um insgesamt 14% auf 262 € t^{-1} steigen müsste, damit die Mischpelletproduktion rentabel wird.

Dieser Ziel-Marktpreis von 262 € t^{-1} ist ein durchaus realistischer Preis für EN_{plus} -Pellets. Dies zeigt sich insbesondere in den Angaben von ANONYMUS 13 (2013), der darstellt, dass dieser Marktpreis 2012 bereits in manchen Regionen Deutschlands vorgelegen hat. Falls der in dem vorherigen Abschnitt ermittelte Ziel-Marktpreis von $\text{EN}_{\text{plusA1}}$ -Pellets nicht erreicht werden kann, könnte lediglich noch eine Erhöhung des Preisverhältnisses Mischpellets / $\text{EN}_{\text{plusA1}}$ -Pellets den Erlös und somit auch den Gewinn der Unternehmung steigern.

In Abbildung 57 (Kapitel 4.4.5.2) wird für das ursprüngliche Planszenario - mit Gesamtkosten von $184,8 \text{ € t}^{-1}$ - aufgezeigt, dass dieses Preisverhältnis auf 0,8 ansteigen müsste, damit die Gewinnschwelle erreicht wird.

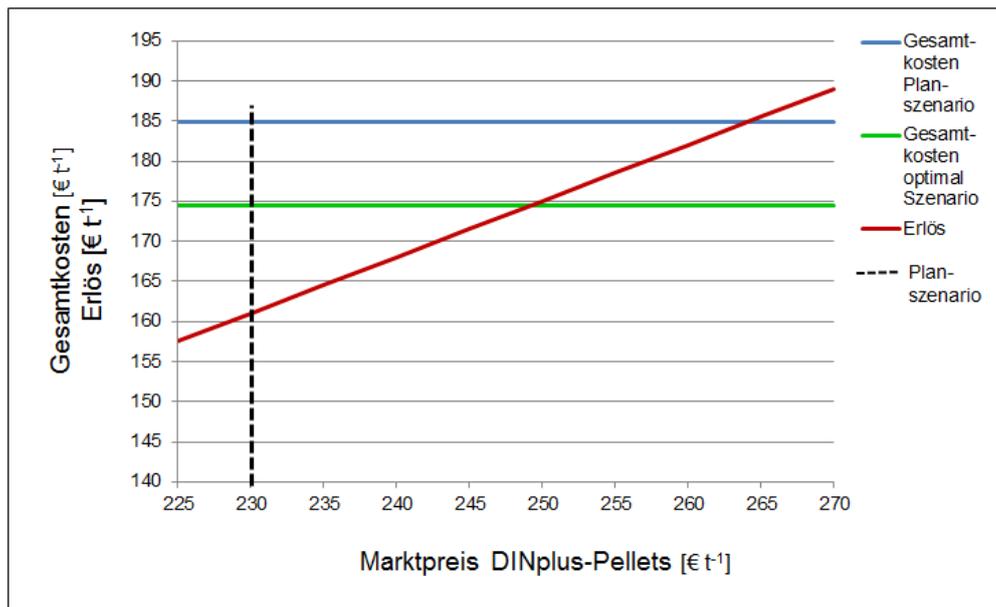


Abbildung 59: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion bei unterschiedlichen Kostenszenarien

Dagegen müsste sich das Preisverhältnis Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets in einem optimierten Kostenszenario (174,4 € t⁻¹) lediglich auf 0,76 erhöhen, damit der kritische Wert erreicht wird. Um weiterhin die Rentabilität der Unternehmung zu sichern, müsste der Verkaufspreis der Mischpellets 80% des in Kapitel 3.4.5.2 angenommenen Marktpreises, für EN_{plusA1}-Pellets von 230 € t⁻¹, betragen.

Da es aus derzeitiger Sicht überhaupt nicht abschätzbar ist, welche Preise für ein Miscanthus-Mischpellet durch die Verbraucher gezahlt würden, sollten für den Preis von Mischpellets ein moderateres Preisverhältnis Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets von 0,7 angenommen werden.

5.4.5.4 Zwischenfazit

In den vorherigen Kapiteln wurde erörtert, dass die Mischpelletproduktion unter den Annahmen des Planszenarios jährlich einen Verlust erwirtschaftet und somit unrentabel ist. Damit die Unternehmung die Gewinnschwelle erreicht, dürfte die Transportstrecke der Rohstoffe von Feld zu Pelletwerk maximal 15 km betragen. Zusätzlich müsste der Referenzwert des Marktpreises für EN_{plusA1}-Pellets, der den Verkaufspreis der Mischpellets bestimmt, 250 € t⁻¹ betragen.

Da unter diesen Bedingungen die Unternehmung noch nicht betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, müsste der Marktpreis für EN_{plusA1}-Pellets weiter auf 262 € t⁻¹ steigen, damit eine interne Rendite von 5% erreicht würde.

Generell zeigt sich, dass die Mischpelletproduktion dennoch kurzfristig rentabel werden könnte. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass nach einer genauen Prüfung aller Kosten- und Erlösfaktoren, die Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets aus ökonomischer Sicht erfolgreich sein kann.

In den Ausführungen der vorherigen Kapitel wurde allerdings außer Acht gelassen, dass der derzeitige Marktpreis von Miscanthus rund 100 € t⁻¹ beträgt (eigene Befragung). Dieser hohe Marktpreis kommt dadurch zustande, dass in den letzten Jahren über 50% der erzeugten Miscanthus Biomasse als Strohersatz für Tiereinstreu verkauft wurden.

Stellt man dem Erlös für Miscanthus-Häcksel die Produktionskosten von 65 € t⁻¹ gegenüber, so wird deutlich, dass es bei der derzeitigen Marktsituation für die Landwirte nicht sinnvoll wäre Mischpellets zu produzieren, da die Gewinne bei der direkten Vermarktung der Miscanthus-Häcksel größer sind.

Damit es für Landwirte eventuell interessant werden könnte Miscanthus-Mischpellets zu produzieren, müsste das Angebot an Miscanthus deutlich höher sein als die Nachfrage. Diese Marktsituation wäre denkbar, wenn das von der Europäischen Union beschlossene „Greening“ 2015 in Kraft treten wird. Auch wenn in den Verhandlungen zwischen der Kommission, dem Ministerrat und dem Parlament der EU (Trilog) noch keine konkreten Maßnahmen beschlossen sind, so sollen dennoch extensiv bewirtschaftete Flächen als Maßnahmen zugelassen werden (KASPERCZYK, 2012). Da wie schon in Kapitel 2.5 dargestellt Miscanthus und KUPs der Definition für extensive Anbausysteme entsprechen, könnte es möglich sein, dass deren Anbau als „Greening“-Maßnahme zugelassen wird (HORIX, 2013).

Da besonders Miscanthus eine außerordentlich umweltverträgliche Kultur ist (LIEBHARD, 2010 und STOLZENBURG, 2010), welche auch im Vergleich zu konventionellen Ackerkulturen einen sehr hohen Gewinn erbringen kann (SIEVERDINGBECK et al., 2012), wäre es ebenso aus Sicht der Landwirte denkbar, dass der Anbau von Miscanthus im Rahmen des „Greenings“ durchgeführt würde.

Falls im Rahmen des „Greening“ tatsächlich deutlich mehr Miscanthus angebaut würde, würde dessen Angebot deutlich ansteigen, was wiederum aufgrund von Marktmechanismen zur Folge hätte, dass der Preis für den Rohstoff Miscanthus sinken müsste.

In diesem Fall könnte dann aus Miscanthus-Mischpellets ein handelsfähiges und transportwürdiges Gut entstehen, sodass ein neuer Absatzmarkt für Miscanthus geschaffen wäre.

5.4.6 Perspektiven der optimierten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

Im vorangehenden Kapitel (5.4 ff.) wurde anhand der Untersuchungsergebnisse erörtert, ob Miscanthus-Paulownia-Mischpellets für die Verbrennung in KFAs geeignet sind und ob diese

konkurrenzfähig zu Holzpellets produziert werden können. Dabei wurde festgestellt, dass mit Ausnahme des zu hohen Schwefel- und Chlorgehaltes die Miscanthus-Paulownia-Mischpellets die verbrennungstechnischen und rechtlichen Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) und der 1. BImSchV einhalten können. Insbesondere in Kapitel 5.4.1.1 wurde darauf hingewiesen, dass die neue Mischbrennstoffnorm DIN_EN 14961-6 in § 3 der 1. BImSchV verankert werden sollte, damit qualitativ hochwertige Miscanthus-Mischpellets in KFAs verbrannt werden dürfen.

Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass schon eine geringe Zugabe von Kaolin (0,25 M.-%) die Ascheschmelztemperatur auf über 1.100°C anheben kann, sodass die Verbrennung der Mischpellets aus anlagentechnischer Sicht problemlos möglich wird. Neben den Untersuchungen zur Wirkung des Additivs Kaolin konnte dargestellt werden, dass das Abfallprodukt Traubentrestler den Presshilfsstoff Stärke substituieren kann, sodass die Pelletproduktion ökonomisch optimiert werden kann.

Neben den Versuchen zu den Brennstoffeigenschaften und Additivwirkungen wurde in einem Praxisversuch überprüft, ob die Mischpelletproduktion aus Sicht der Prozesstechnik möglich ist. Diese Untersuchungen ergaben, dass – insbesondere unter Verwendung der Kollermühle – die Herstellung von Miscanthus-Mischpellets mit bestehender Anlagentechnik realisierbar ist, und dass die physikalische Qualität der Pellets den Anforderungen der Normen entspricht.

Zusammenfassend wurde anhand eines Planszenarios einer Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion die Wirtschaftlichkeit der Mischpelletproduktion untersucht. Diese Analyse ergab, dass die Produktion von Miscanthus-Mischpellets unter den derzeitigen Voraussetzungen des Pelletmarktes nicht sinnvoll ist. Weiterführend wurde jedoch aufgezeigt, dass die Mischpelletproduktion kurz- bis mittelfristig (2-5 Jahre) rentabel werden kann. Damit eine solche Unternehmung ökonomisch rentabel wird, müsste der Rohstoffpreis für Miscanthus sinken und der Marktpreis für DIN_{plus}-Pellets steigen. Wie in Kapitel 5.4.5.3 aufgezeigt wurde, ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass diese beiden Szenarien eintreffen könnten.

Letztendlich kann die vierte Arbeitshypothese nicht abschließend beurteilt werden. In Bezug auf den aktuellen Stand der rechtlichen und ökonomischen Voraussetzungen muss die vierte Arbeitshypothese abgelehnt werden. Da aber derzeit die rechtlichen Bedingungen für die Verbrennung von Mischbrennstoffen in KFAs auf legislativer Ebene diskutiert werden (LENZ und ZENG, 2012) und sich die Marktsituation für Miscanthus und DIN_{plus}-Pellets mittelfristig ändern wird, kann eine Produktion von Miscanthus-Mischpellets sehr schnell rentabel werden.

Aufgrund dieser noch offenen Fragen sollte mit einer abschließenden Beurteilung der vierten Arbeitshypothese auf die noch ausstehenden rechtlichen Beratungen gewartet werden.

6 Zusammenfassung

In den letzten 20 Jahren ist in Deutschland die Anbaufläche von Miscanthus auf 3.500 ha angewachsen. Dabei stellt diese umweltverträgliche „low input“-Kultur mit 15 - 20 t (TM) ha⁻¹ eine der ertragsstärksten Biomassearten dar. In Zeiten des Klimawandels und der Energiewende könnte insbesondere Miscanthus ein „Mosaikstein“ sein, um auf landwirtschaftlichen Flächen nachhaltig Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung zu produzieren.

2013 beschloss die EU im Rahmen des „Greenings“ 5% der landwirtschaftlichen Fläche der Mitgliedsländer in ökologische Vorrangflächen umzuwandeln. Neben diversen anderen Nutzungsoptionen, wie z. B. extensives Dauergrünland oder Ackerblühstreifen könnte auch Miscanthus als Bewirtschaftungsart auf ÖVPs zugelassen werden, was zu einer Steigerung des Angebotes von Miscanthus führen würde. Da Miscanthus allerdings schlechtere Brennstoffeigenschaften als Holz hat, darf derzeit Miscanthus nicht in Reinform als Pellet in KFAs verbrannt werden. Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Szenario der Miscanthus-Mischpellets-Produktion für Kleinf Feuerungsanlagen entwickelt um neue Absatzmöglichkeiten zu schaffen.

Ziel der Arbeit war es zu prüfen, welche Faktoren die Brennstoffqualität von Miscanthus beeinflussen und ob die Baumart *Paulownia tomentosa* eine geeignete Kultur zur Rohstoffherzeugung für die Miscanthus-Mischpelletproduktion ist. Weiterhin wurde untersucht, ob der Pelletierungsprozess durch neuartige Zerkleinerungsverfahren für halm- und holzartige Biomassen optimiert werden kann. Zusammenführend wurde geprüft, ob die Mischpellets aus technischer und rechtlicher Sicht in KFAs verbrannt werden dürfen und ob diese ökonomisch rentabel produziert werden können.

Es konnte festgestellt werden, dass die Brennstoffqualität von Miscanthus durch die Faktoren Bestandsalter, Genotyp, Standort und Jahreswitterung beeinflusst wird. Der Aschegehalt der untersuchten Miscanthus-Typen, welcher als Indikator für weitere verbrennungstechnisch problematische Elemente (N, S und Cl) identifiziert wurde, beträgt 1,6 bis 3,3 M.-%. Damit liegen die eigenen ermittelten Werte tendenziell unter denen von anderen Autoren, die für Miscanthus Aschegehalte von 2 - 3,9 M.-% angeben. Es wurde dargelegt, dass im Vergleich zu den drei anderen Einflussfaktoren der Jahreswitterungsverlauf am stärksten auf die Brennstoffqualität wirkt, da diese das Blatt- / Stängelverhältnis zur Ernte maßgeblich bestimmt. Damit der Blattanteil des Erntegutes in dem hauptsächlich die verbrennungstechnisch problematischen Elemente akkumuliert werden möglichst gering ist, sollte die Miscanthus-Ernte erst ab Ende März beginnen. Für die Mischpelletproduktion muss berücksichtigt werden, dass der Miscanthusanteil entsprechend der jährlich wechselnden Brennstoffqualität des Erntegutes angepasst werden muss.

Neben der Brennstoffqualität wurde die Pelletierungseignung von Miscanthus im Gemisch mit holzartiger Biomasse untersucht. Generell zeigt der Rohstoff Miscanthus die positive

Eigenschaft, dass er nicht getrocknet werden muss, sodass der gesamte Energiebedarf des Pelletierungsprozesses reduziert werden kann. Weiterhin haben die Miscanthus-Mischpellets unter optimierten Produktionsbedingungen (Wassergehalt, Presskanallänge, Durchsatz) eine ausreichend hohe Schüttdichte von über 600 kg m^{-3} und eine Abriebfestigkeit von über 97,5 M.-% (Norm-Grenzwerte).

Als weiterer Mischungspartner für die Miscanthus-Mischpellets wurde die holzartige Biomasse von *Paulownia tomentosa* aus Kurzumtriebsplantagen identifiziert. Aufgrund des relativ hohen Ertragspotentials (bis zu $13 \text{ t (TM) ha}^{-1}$) kann diese Biomasse von landwirtschaftlichen Flächen nachhaltig als Rohstoff für die Mischpelletproduktion bereitgestellt werden. Neben dem hohen Biomassezuwachs zeichnet sich *Paulownia tomentosa* durch einen geringen Aschegehalt von unter 0,8 M.-% aus. Der Brennwert beträgt $19,4 \text{ MJ kg}^{-1}$, die Ascheerweichungstemperatur liegt bei knapp 1.300°C und die Gehalte an N, S und Cl sind unter den Grenzwerten der Pelletnorm DIN_EN 14961-2(A2). Somit hat Biomasse von Paulownia ähnlich gute Brennstoffeigenschaften wie Fichten-Holz, welches primär als Rohstoff in der Pelletproduktion eingesetzt wird. Weitergehend konnte durch Pelletierungsversuche festgestellt werden, dass Paulownia-Holz insbesondere in Gemischform mit Miscanthus sehr gute Pelletierungseigenschaften hat. Die Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Pellets liegt dabei oberhalb der von der DIN_EN 14961-2(A2) geforderten Werten. Somit ist die Biomasse der ertragsstarken Kurzumtriebskultur *Paulownia tomentosa* als Rohstoff für die Miscanthus-Mischpelletproduktion zu empfehlen.

Zusätzlich zu den Rohstoffen des Pelletierungsprozesses wurden unterschiedliche Verfahren für den Prozessschritt der Zerkleinerung analysiert und bewertet. Die Substitution der Hammermühle durch die Zerkleinerungsverfahren Zerkleinerung und Kollermühle kann den Pelletierungsprozess hinsichtlich der physikalischen Pelletqualität und des spezifischen Energiebedarfes optimieren. Dabei erzeugt das Zerkleinerungsprodukt aus der Zerkleinerung, wegen der besseren Partikeloberflächenstruktur und -geometrie die höchste physikalische Pelletqualität. Dagegen benötigt die Pelletierung des Zerkleinerungsproduktes aus der Kollermühle signifikant weniger Gesamtenergie. Da die Pellets, deren Biomasse mit der Kollermühle zerkleinert wurde, die Normwerte der physikalischen Qualität einhalten, ist für den Pelletierungsprozess das Zerkleinerungsverfahren mittels Kollermühle zu empfehlen.

Zusammenführend untersuchte vorliegende Arbeit die physikalische und chemische Qualität der Miscanthus-Paulownia-Mischpellets. Mit Ausnahme des Cl- und S-Gehaltes erfüllen die Mischpellets die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2), die der Mindeststandard für Pellets ist, welche in KFAs verbrannt werden dürfen. Die Additivzugaben von Traubentrester und Kaolin konnten dazu beitragen, dass diese hohe Pelletqualität erreicht wurde. Der Traubentrester, der als kostengünstiges Substitut zu dem Presshilfsstoff Stärke identifiziert werden konnte, verbessert schon bei einem Zuschlag von 1 M.-% zum einen die Pellet-

qualität und zum anderen senkt dieser den spezifischen Energiebedarf während des Pressvorgangs. Dagegen erhöhte das Kaolin, welches mit 0,3 M.-% der Brennstoffmischung zugegeben wurde, die Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets um 200°C auf über 1.100°C. Abschließend wurde ein Planszenario der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion erstellt und dessen Wirtschaftlichkeit geprüft. In Bezug auf die aktuellen Marktpreise für Miscanthus (100 € t⁻¹), dem noch nicht etablierten Markt für Mischpellets und dem niedrigen Marktpreis für Holzpellets (230 € t⁻¹) erscheint die Produktion als nicht rentabel. Die näher gehende Analyse ergab jedoch, dass kurz- bis mittelfristig der Marktpreis des Rohstoffes Miscanthus sinken und der von Holzpellets steigen kann. Der Rohstoffpreis für Miscanthus könnte sinken, wenn das Angebot durch einen vermehrten Anbau erhöht würde. Weiterhin ist es wahrscheinlich, dass im Zuge von allgemein steigenden Heizkosten und Holzpreisen auch der Marktpreis für Qualitätspellets steigt. Weil zurzeit Miscanthus-Mischpellets noch nicht als Brennstoff in KFAs zugelassen sind, dürfen diese noch nicht in solchen Anlagen verbrannt werden. Insofern ist es zwingend notwendig, dass Brennstoffe, wie Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die der Mischpelletnorm DIN_EN 14961-6 entsprechen, in § 3 der 1. BImSchV aufgenommen werden.

Zusammenfassend zeigt vorliegende Arbeit, dass die Produktion von Mischpellets eine Möglichkeit bietet, um die Produktpalette für den nachhaltig und umweltverträglich erzeugten Rohstoff Miscanthus zu erweitern. Insbesondere die Beimischung der ebenfalls nachhaltig erzeugten holzgutartigen Biomasse von Paulownia aus KUPs ermöglicht es Landwirten die Wertschöpfungskette weitgehend selbständig auszunutzen. Neben positiven Aspekten für die Umwelt und die Landwirtschaft bietet die Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets die Möglichkeit Haushalte dezentral mit Energie zu versorgen und somit einen Teil zur Energiewende auf regionaler Ebene beizutragen.

LITERATURVERZEICHNIS

Literatur, Veröffentlichungen und Vorträge

- ABOUSTEIT, B. und KEMPF, W. (1974): Pektingewinnung aus Kartoffelpulpe und ihre mögliche Bedeutung für die Kartoffelstärkeindustrie. *Starch – Stärke*, Volume 26. Seite 417–421.
- AECKERSBERG, R. (2011): Analyse des Ascheschmelzverhaltens von Holzpellets in Abhängigkeit ausgewählter Aschekomponenten. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, Band 41. Shaker Verlag, Aachen. ISBN 978-3-8440-0395-6.
- ALLEN, B. und HART, K. (2013): Meeting the EU's environmental challenges through the CAP – how do the reforms measure up?. *Aspects of Applied Biology*, Volume 118. Seite 9-22.
- ANGELINI, L.; CECCARINI, L.; NASSI, N.; BONARI, E. (2009): Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, Volume 33. Seite 635-643.
- ANONYMUS (2000): EP 1 057 531 A1, Vorrichtung zum Verarbeiten von Bauteilen aus Mischstoffen. *Europäisches Patentblatt* 2000/49.
- ANONYMUS (2005): EP 1 184 490 B1, Vorrichtung zur Zerkleinerung von stängel-, halm- und/oder blattartigen, nachwachsenden Rohstoffen. *Europäisches Patentblatt* 2005/44.
- AKYILDIZ, M. H.; KOL, H. S. (2010): Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology*, Volume 31. Seite 351-355.
- AMTHAUER GALLARDO, D. und RÖHLE, H. (2012): Erfassung und Modellierung der Klon-Standort-Wechselwirkungen bei Pappel und Weide auf landwirtschaftlichen Standorten in kurzen Umtriebszeiten. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Volume 24. Seite 108-109.
- ATIENZA, S.G.; SATOVIC, Z.; PETERSEN, K. K.; DOLSTRA, O.; MARTÍN, A. (2003): Identification of QTLs influencing combustion quality in *Miscanthus sinensis* Anderss. II. Chlorine and potassium content. *Theoretical and Applied Genetics*. Seite 857-863.
- AUSTIN, L.G. und SHOJI, K. (1973): An explanation of abnormal breakage of large particle sizes in laboratory mills. *Powder Technology*, Volume 7. Seite 3-7.
- BACK, E. L. und SALMEN, N. L. (1982): Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *TAPPI Journal*, Volume 65. Seite 107-110.
- BAKKEN, L.R.; BØRRESEN, T.; NJØS A. (1987): Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum*). *Journal of Soil Science*, Volume 38. Seite 541-552.
- BAKKER, R.R. und ELBERSON, H.W. (2005): Managing ash content and –quality in herbaceous bio mass: An analysis from plant to product. Institute Agrotechnology & Food Innovations- Biobased Products. Wageningen University & Research Centre (WUR). 14th European Biomass Conference and Exhibition, Paris.

- BAXTER, L.; DARVELL, I.; JONES, J. M.; BARRACLOUGH, T.; YATES, N. E.; SHIELD, I. (2012): Study of *Miscanthus x giganteus* ash composition – Variation with agronomy and assessment method, Fuel 95 (2012). Seite 50-62.
- BECK, B. (2008): Volkswirtschaft verstehen. 5. Stark überarbeitete Auflage. Hochschulverlag AG ETH Zürich. ISBN 978-3-7281-3207-9.
- BERGMANN, B. A. (2003): Five years of *Paulownia* field trials in North Carolina. New Forests, Volume 25. Seite 185-199.
- BERGSTRÖM, D.; ISRAELSSON, S.; ÖHMAN, M.; DAHLQVIST, S.-A.; GREF, R.; BOMAN, C.; WÄSTERLUND, I. (2008): Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. Fuel Processing Technology, Volume 89. Seite 1324-1329.
- BITRA, V.S.P.; WOMAC, A. R.; CHEVANAN, N.; Miu, P. I.; IGATHINATHANE, C.; SOKHANSANJ, S.; SMITH, D. R. (2009): Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. Powder Technology, Volume 193. Seite 32-45.
- BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S. C.; SHRESTHA, S. R. M. (1989): State of the art biomass Densification. Energy Sources, Volume 11. Seite 161-182.
- BIERTÜPFEL, A.; RUDEL, H.; WERNER, A.; VETTER, A.; GRAF, T. (2011): Miscanthus - 15 Jahre Thüringer Ergebnisse -, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- BLECHSCHMIDT, J.; ENGERT, P.; STEPHAN, M. (1986): The glass transition of wood from the viewpoint of mechanical pulping. Wood Science and Technology, Volume 20. Seite 263-272.
- BOSTRÖM, D.; GRIMM, A.; BOMAN, C.; BJÖRNBOM, E.; ÖHMAN, M. (2009): Influence of Kaolin and Calcite additives on ash transformations in small-scale combustion of oat. Energy Fuels, Volume 23. Seite 5184–5190.
- BOWEN, N. C. und ELLSTAD R.B. (1937): Leucite and Pseudoleucite. American Mineralogist, Volume 22. Seite 409-415.
- BRANDES, W. und ODENING, M. (1992): Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft. Eugen Ulmer Verlag. ISBN 3-8001-4083-7.
- BRIGGS, J. L.; MAIER, D.E.; WATKINS, B.A.; BEHNKE, K.C. (1999): Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. Poultry Science, Volume 78. Seite 1464–1471.
- CADOUCHE, L. und LÓPEZ, G.D. (1989): Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. Biological Wastes, Volume 30. Seite 153–157.
- CADOUX, S.; RICHE, A. B.; YATES, N. E.; MACHET, J.-M. (2012): Nutrient requirements of *Miscanthus x giganteus*: Conclusions from a review of published studies. Biomass and Bioenergy, Volume 38. Seite 14-22.
- CARROLL, J. und FINNAN, J. (2012): Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. Biosystems Engineering, Volume 112. Seite 151-159.

- CARROLL, J. und FINNAN, J. (2013): Emissions and efficiencies from the combustion of agricultural feedstock pellets using a small scale tilting grate boiler. *Biosystems Engineering*, Volume 115. Seite 50-55.
- CARVALHO, L.; LUNDGREN, J.; WOPIENKA, E.; ÖHMAN, M. (2007): Challenges in small-scale combustion of agricultural biomass fuels. 9th Conference on Energy for a Clean Environment, 2-5 July 2007.
- CHO, G.-C.; DODDS, J.; SANTAMARINA, C. (2006): Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Volume 132. Seite 591-602.
- CHRISTENSEN, G. N. und KELSEY, K. E. (1959): Die Geschwindigkeit der Wasserdampfsorption durch Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Volume 17. Seite 178-188.
- CHRISTIAN, D.G.; RICHE, A. B.; YATES, N. E. (2008): Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products*, Volume 28. Seite 320–327.
- CLIFTON-BROWN, J. C. und LEWANDOWSKI, I. (2000): Overwintering problems of newly established *Miscanthus* plantations can be overcome by identifying genotypes with improved rhizome cold tolerance. *New Phytology*, Volume 148. Seite 287-294.
- CLIFTON-BROWN, J. C. und LEWANDOWSKI, I. (2002): Screening *Miscanthus* genotypes in field trials to optimise biomass yield and quality in Southern Germany, *European Journal of Agronomy*, Volume 16. Seite 97–110.
- COLLURA, S.; AZAMBRE, B.; FINQUENEISEL, G.; ZIMNY, T.; WEBER, J. V. (2006): *Miscanthus x giganteus* straw and pellets as sustainable fuels - Combustion and emission tests -. *Environmental Chemistry Letters*, Volume 4. Seite 75-78.
- COSENTINO, S. L.; PATAN`E, C.; SANZONE, E.; COPANI, V.; FOTI, S. (2007): Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu. in a mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*. Seite 163-177.
- DAHL, J. und OBERNBERGER, I. (2004): Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum*). Tagungsband: 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy. Seite 1265-1270.
- DAVIS, S. C.; PARTON, W. J.; DOHLEMAN, F. G.; SMITH, C. M.; DEL GROSSO, S.; KENT, A. D.; DELUCIA, E. H. (2010): Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus x giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems*, Volume 13. Seite 144-156.
- DI GIACOMO, G. und TAGLIERI, L. (2009): Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets. *Energy*, Volume 34. Seite 724 – 731.
- DONALD, D. G. M. (1990): Paulownia--the tree of the future? *South African Forestry Journal*. Volume 154. Seite 94-98.
- DONNELLY, A.; STYLES, D.; FITZGERALD, J.; FINNAN, J. (2011): A proposed framework for determining the environmental impact of replacing agricultural grassland with *Miscanthus* in Ireland. *GCB Bioenergy*. Volume 3. Seite 247 - 263.

- DÖRING, S. (2011): Pellets als Energieträger. Springer Verlag. ISBN: 978-3-642-01623-3
- EL BASSAM, N. und HUISMAN, W. (2001): Harvesting and storage of Miscanthus, in JONES, M. B. und WALSH, M. Miscanthus for energy and fibre. James and James (Hrsg.). The Cromwell press. London. ISBN 1-902916-07-7. Seite 86.
- ELWELL, W. E. und DEHN, W. M. (1939): Pectic content of plant material. Plant Physiology, Volume 14. Seite 809-816.
- ESSL, F. (2007): From ornamental to detrimental? The incipient invasion of central Europe by *Paulownia tomentosa*. Preslia, Volume 79. Seite 377-389.
- ESTEBAN, L.S. und CARRASCO, J.E. (2006): Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomasses. Powder Technology, Volume 166. Seite 139 –151.
- FERNANDEZ-LLORENTE, M. J.; DIAZ-AROCAS, P.; GUTIERREZ-NEBOT, L.; CARRASCO-GARCIA, J. E. (2008): The effect of the addition of chemical materials on the sintering of biomass ash. Fuel, Volume 87. Seite 2651–2658.
- FORSTNER, B.; DEBLITZ, C.; KLEINHANß, W.; NIEBERG, H.; OFFERMANN, F.; RODER, N., SA-LAMON, P.; SANDERS, J.; WEINGARTEN, P. (2012): Analyse der Vorschläge der EU-Kommission vom 12. Oktober 2011 zur künftigen Gestaltung der Direktzahlungen im Rahmen der GAP nach 2013, Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie 2012/04, Braunschweig.
- FRASER, H. J. (1935): Experimental study of the porosity and permeability of elastic sediments. Journal of Geology, Volume 13. Seite 910-1010.
- FRITZ, M. und FORMOWITZ, B. (2009): Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayrischen Forschungsarbeiten – Technologie- und Förderzentrum Straubing.
- FRÖMBGEN, R. (1942): Über die Traubentrester-Verwertung mit besonderer Berücksichtigung der Traubenkernölgewinnung. European Journal of Lipid Science and Technology. Volume 49. Seite 278–281.
- GATTERNIG, B.; HOHENWARTER, U.; KARL, J. (2010): Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen. 11. Symposium Energieinnovation. 10.-12.2.2010, Graz, Austria.
- GARCIA, J. C.; ZAMUDIO, M.; PEREZ, A.; FERIA, M. J.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; LOPEZ, F. (2011): Soda-alk pulping of paulownia wood after hydrolysis treatment. BioResources, Volume 6. Seite 971 – 986.
- GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITHENBANK, J. (2009): Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. Fuel. Volume 88. Seite 1491-1497.
- GROSSER, D. (2000): Das Holz der Weide - seine Eigenschaften und Verwendung. Beiträge zur Silberweide - LWF-Bericht Nr. 24 - Kapitel 15. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- HALL, C.W. und DAVIS, D.C. (1979): Processing Equipment for Agricultural Products. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.

- HARTMANN, H; BÖHM, T. MAIER, L. (2000): Naturbelassenen biogene Festbrennstoffe - Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten . Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München. Reihe „Materialien“, Nr. 152.
- HASLER, P. und NUSSBAUMER, T. (2001): Herstellung von Holzpellets - Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets, ENET. Schweizerische Bundesamt für Energie und Bundesamt für, Wald und Landschaft.
- HEATON, E. A.; DOHLEMAN, F. G.; LONG, S. P. (2008): Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*. Seite 2000-2014.
- HOFMANN, M. (1998): Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen im Kurzumtrieb. Merkblatt 11. Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten Hann. Münden.
- HOFMANN, M. (2010): Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. FNR Gülzow.
- HOLM, J. K.; HENRIKSEN, U. B.; HUSTAD, J. E.; SØRENSEN, H. L. (2006): Toward an Understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy & Fuels*, Volume 20. Seite 2686 – 2694.
- HOLM, J. K.; HENRIKSEN, U. B.; WAND, K.; HUSTAD, J. E.; POSSELT, D. (2007): Experimental verification of novel pellet model using a single pelleting unit. *Energy & Fuels*, Volume 21. Seite 2446 – 2449.
- HOLM, J.K.; STELTE, W.; POSSELT, D.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U.B. (2011): Optimization of a multiparameter model for biomass pelletization to investigate temperature dependence and to facilitate fast testing of pelletization behavior. *Energy & Fuels*, Volume 25. Seite 3706-3711.
- HOLTZAPPLE, M. T. HUMPHREY, A. E.; TAYLOR, J. D. (1989): Energy requirements for the size reduction of poplar and aspen wood. *Biotechnology and Bioengineering*. Volume 33. Seite 207-210.
- HORVARTH, B.; Peralta, P.; Frazier, C.; Peszlen, I (2011): Thermal softening of transgenic aspen. *BioResources*, Volume 6. Seite 2125 - 2134.
- ISERMAYER, F. und WEINGARTEN, P. (2012): Stellungnahme im Rahmen einer öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Deutschen Bundestages am 22. Oktober 2012. Thünen Institut.
- IRVINE, G.M. (1985): The significance of the glass transition of lignin in thermomechanical pulping. *Wood Science and Technology*, Volume 19. Seite 139-149.
- JENKINS, B.M.; BAXTER, L.L.; MILES JR., T.R.; MILES SEN., T.R. (1998): Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, Volume 54. Seite 17-46.
- JEZOWSKI, S.; GLOWACKA, K. und KACZMAREK, Z. (2010): Variation on biomass yield and morphological traits of energy grasses from the genus *Miscanthus* during the first years of crop establishment. *Biomass and Energy*, Volume 35. Seite 814-821.
- JØRGENSEN, U. (1997): Genotypic variation in dry matter accumulation and content of N, K and Cl in *Miscanthus* in Denmark. *Biomass and Bioenergy*, Volume 12. Seite 155-169.

- JØRGENSEN, U. (2006): Nitrate leaching and pesticide use in energy crops. Third Danish Plant Third Production Congress, Denmark, 10-11 January, 2006. Seite 431-432.
- KAACK, K.; SCHWARZ, K.-U.; BRANDER, P. E. (2003): Variation in morphology, anatomy and chemistry of stems of *Miscanthus* genotypes differing in mechanical properties. *Industrial Crops and Products*, Volume 17. Seite 131-142.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, Berlin.
- KALIYAN, N. und MOREY, R. V. (2009): Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, Volume 33. Seite 337-359.
- KAMMER, C.; KAMMER, U.; LÄPPLE, V. (2012): *Werkstoffkunde für Praktiker. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage*. Verlag Europa-Lehrmittel. Haan-Gruiten. ISBN 978-3-8085-1327-9.
- KAPPLER, U.; WENGHOEFER, V.; PUDE, R. (2013): Veränderung des Ascheschmelzverhaltens von Biomasse-Mischpellets durch Zudosierung von Kaolin. *VGB PowerTech Volume 6*. Seite 57-61.
- KARAMPINIS, E.; VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S.; GRAMMELIS, P.; ITSKOS, G.; KAKARAS, E. (2012): Comparative study of combustion properties of five energy crops and Greek lignite. *Energy and Fuels*, Volume 26. Seite 869–878.
- KARINKANTA, P.; ILLIKAINEN, M.; NIINIMÄKI, J. (2013): Impact-based pulverisation of dried and screened Norway spruce (*Picea abies*) sawdust in an oscillatory ball mill. *Powder Technology*, Volume 233. Seite 286-294.
- KAUTER, D.; LEWANDOWSKI, I.; CLAUPEIN, W. (2001): Pappeln in Kurzumtriebswirtschaft: Eigenschaften und Qualitätsmanagement bei der Festbrennstoffbereitstellung – Ein Überblick. *Pflanzenbauwissenschaften*, Volume 5. Seite. 64-74.
- KELLEY, S.S.; RIALS, T.G.; GLASSER, W. G.: (1987): Relaxation behavior of the amorphous components of wood. *Journal of Material Science*, Volume 22. Seite 617-624.
- KHALIL, R. A.; TODOROVIC, D.; SKREIBERG, Ø.; BECIDAN, M.; BACKMAN, R.; GOILE, F. ; SKREIBERG A.; SØRUM, L. (2012): The effect of kaolin on the combustion of demolition wood under well-controlled conditions. *Waste Management and Research* , Volume 30. Seite 672-680.
- KILBANE, J. (1989): Desulfurization of coal: themicrobial solution. *Trends in Biotechnology*, Volume 7. Seite 97-101.
- KLASON, P. (1936): Über die Bildung von Lignin im Holz. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. Volume 69. Seite 676–678.
- KLAUDITZ, W. (1951): Über die mechanischen Eigenschaften und chemische Zusammensetzung des Stammholzes zweier Pappelhybriden. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Volume 9. Seite 81-83.
- KOPSIDIS, R. M. (1997): *Materialwirtschaft; Grundlagen, Methoden Techniken, Poltik. 3. überarbeitete Auflage*, Hanser Verlag. ISBN 3-446-19163-1.
- KRACEK, F.C. (1962): *Melting and transformation of mineral and allied sustances*. Geological Survey Bulletin, Volume 1144. Seite D1-D81.

- KRISTÖFEL, C. und WOPIENKA, E. (2012): Biomass report, IEE/09/758/SI2.558286 – EU- Projekt – MixBioPells.
- KTBL (2006): Energiepflanzen KTBL-Datensammlung mit Internetangebot. 2006. ISBN: 3-939371-21-1.
- LEMUS, R.; BRUMMER, E. Ch.; MOORE, K. J.; MOLSTAD, N.; BURRAS, C.L. BARKER, M. F. (2002): Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. Biomass and Bioenergy. Volume 23. Seite 433–442.
- LENZ, V. A. (2010): Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholzkaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- LEWANDOWSKI, I. ; CLIFTON-BROWN, J.C.; SCURLOCK, J. M. O.; HUISMAN; W. (2000): Miscanthus: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy, Volume 19. Seite 209-227.
- LEWANDOWSKI, I.; CLIFTON-BROWN, J. C.; ANDERSSON, B.; BASCH, G.; CHRISTIAN, D. G.; JØRGENSEN, U.; JONES, M. B.; RICHE, A. B.; SCHWARZ, K. U.; TAYEBI, K.; TEIXEIRA, F. (2003): Environment and Harvest Time Affects the Combustion Qualities of *Miscanthus* Genotypes. Agronomy Journal, Volume 95. Seite 1274-1280.
- LEWANDOWSKI, I. und KICHERER, A. (1997): Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. European Journal of Agronomy. Seite 63- 177.
- LEWANDOWSKI, I. und HEINZ, A. (2003): Delayed harvest of miscanthus—influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production. European Journal of Agronomy, Volume 19. Seite 45–63.
- LEWANDOWSKI, I. und KALININA, O. (2012): Project OPTIMISC – Optimizing Miscanthus Biomass Production. 7. Internationale Miscanthus- Tagung 2012, Campus Klein-Altendorf, Rheinbach. Universität Bonn-ILB Press. Bonn. Pude (Hrsg.). ISBN 978-3-941766-14-3. Seite 36-41.
- LEWANDOWSKI, I. und SCHMIDT, U. (2006): Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. Agriculture, Ecosystems and Environment. Volume 114. Seite 335-346.
- LIEBHARD, P. (2007): Energieholz im Kurzumtrieb. Rohstoff der Zukunft. Stocker Verlag, 1. Aufl. Graz. ISBN 978-3-7020-1150-5.
- LIEBHARD, P. (2010): „Ökologische Aspekte und Einfluß langjähriger Nutzung von *Miscanthus giganteus* auf ausgewählte chemische und physikalische Bodenkennzahlen. Pude, R. (Hrsg.), *Miscanthus* -Umwelt- und Nutzungsaspekte. Tagung vom 24.-26. November 2010 in Ardagger, Österreich. Universität Bonn ILB-Press. ISBN 978-3-941766-04-4.
- LOHMANN, U. (1986): Holzhandbuch, 3. völlig überarbeitete Auflage. Leinfeld-Echterdingen. Drw Verlag.
- Longbrake, C. (2001): Ecology and invasive Potential of *Paulownia tomentosa* (Scrophulariaceae) in Hardwood Forest Landscape. Dissertation. Faculty of the College of Arts and Sciences of Ohio University.

- LOPEZ, F.; PEREZ, A.; ZAMUDIO, M.; E. DE ALVA, H.; GARCIA, J. C. (2012): Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. *Biomass and Bioenergy*, Volume 45. Seite 77-86.
- MA, Z. H.; MERKUS, H. G.; DE SMET, J. G. A. E.; HEFFELS, C.; SCARLETT, B. (2000): New developments in particle characterization by laser diffraction: size and shape. *Powder Technology*, Volume 111. Seite 66-78.
- MAEDA, K.; SAKAI, H.; KANDO, A.; YAMAGUCHI, M.; FUKUMA, M.; NUKUDUMI, E. (2010): Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect. *Granular Matter*, Volume 12. Seite 499-505.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; S. SOKHANSANJ (2004): Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, Volume 27. Seite 339–352.
- MANI, S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; TURHOLLOW, A. (2006 a): Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Engineering in Agriculture*, Volume 22. Seite 421-426.
- MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. (2006b): Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, Volume 30. Seite 648 – 654.
- MANLU, Y.; ALVIN, R.; LESTER, O. (2003): Review of biomass size reduction technology, 2003 ASAE Annual International Meeting.
- MCKENDRY, P. (2002): Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. Volume 83. Seite 37-46.
- MEEHAN, P. G.; FINNAN, J. M.; MC DONNELL, K. (2012): The effect of harvest date and harvest method on the combustion characteristics of *Miscanthus x giganteus*. *Global Change Biology Bioenergy*, Volume 5.
- MEIER, J. und VETTER, R. (2004): Erträge und Zusammensetzung von Kurzumtriebs-Gehölzen (Weide, Pappel, Blauglockenbaum). Institut für umweltgerechte Landwirtschaft Müllheim. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 35. Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2004. ISSN 0947-7314. Seite 87-92.
- MELHUIS, J. H.; GENTRY, C. E.; BECKJORD, P. R. (1990): *Paulownia tomentosa* Seedling growth at differing levels of pH, nitrogen, and phosphorus. *Journal of Environmental Horticulture*, Volume 8. Seite 205-207.
- MIAO, Z.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C.; TING, K. C. (2011): Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Industrial Crops and Products*, Volume 33. Seite 504 – 513.
- MICHEL, R.; KAKNICS, J.; BOUCHETOU, M. L.; GRATUZE, B.; BALLAND, M.; HUBERT, J.; POIRIER, J. (2012): Physicochemical changes in *Miscanthus* ash on agglomeration with fluidized bed material. *Chemical Engineering Journal*, Volume 207. Seite 497–503.
- MIURA, K.; MAEDA, K.; FURUKAWA, M.; TOKI, S. (1998): Mechanical characteristics of sands with different primary properties. *Soils and Foundations*, Volume 38. Seite 159-172.
- MONTI, A.; DI VIRGILIO, N.; VENTURI, G. (2008): Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy*, Volume 32. Seite 216-223.

- MORTIMER, C. E. und MÜLLER, U. (2010): Chemie. Lehrbuch, 10. überarbeitete Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart.
- MÜLLER-SÄMANN, K. (2012): „OPTIMISC-platform“ für Miscanthus Akteure. 7. Internationale Miscanthus- Tagung 2012, Campus Klein-Altendorf, Rheinbach. Universität Bonn-ILB Press. Bonn. Pude (Hrsg.). ISBN 978-3-941766-14-3. Seite 42-44.
- NEUBARTH, J. und KALTSCHMITT, M. (2000): Erneuerbare Energien in Österreich. Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer Verlag, Wien. ISBN: 9783211835791.
- NIELSEN, N. P.; GARDNER, D. J.; POULSEN, T.; FELBY, C. (2009): Importance of temperature, moisture content and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. Wood and Fiber Science, Volume 41. Seite 414–425.
- OBERNBERGER, I. und THEK, G. (2004): Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. Biomass and Bioenergy, Volume 27. Seite 653 – 669.
- OBERNBERGER, I; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. (2006): Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. Biomass and Bioenergy, Volume 30. Seite 973-982.
- ÖHMAN, M.; BOMAN, C.; HEDMAN, H.; NORDIN, A.; BOSTRÖM, D. (2004): Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. Biomass and Bioenergy, Volume 27. Seite 585-596.
- ÖHMAN, M.; NYSTRÖM, I.; GILBE, C. (2009): Slag Formation during combustion of biomass fuels. International conference on solid biofuels, 12-14th August 2009, Beijing.
- OLSSON A.M. und SALMEN L. (1992): Viscoelasticity of insitu lignin as affected by structure e softwood vs hardwood. Viscoelasticity of biomaterials. ACS symposium series 489. American Chemical Society. Seite 133-143.
- PATTON, T. C. (1973): Pigment handbook. Wiley-Interscience. New York. ISBN 0-4716-7123-1.
- PAYNE, J. D. (2004): Predicting pellet quality and production efficiency. World Grain 2004, August 2004. Tagungsband. Seite 68–70.
- PERRY, R. und GREEN, D.W. (1999): Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill Verlag.
- PETTERSSON, A. (2009): Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction. Fuel Volume 88. Seite 1758-1772.
- PICCHIO, R.; SPINA, R.; SIRNA, A.; LO MONACO, A.; CIVITARESE, R.; DEL GIUDICE, A.; SUARDI, A.; PARI, L. (2012): Characterization of woodchips for energy from forestry and agroforestry production. *Energies*, Volume 5. Seite 3803-3816.
- PICKETT, S. T. A. and WHITE. P. S. (1985): The ecology of natural disturbance and patch dynamics, Academic Press, Orlando. ISBN 0125545207.
- PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D. (2010): Techno-economical analysis of wood pellet production for U.S. manufacturers. Bioresources, Volume 5. Seite 2374-2390.

- POPOV V. L. (2009): Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag, Berlin. Seite 328.
- PLACET, V.; PASSARD, J.; PERRE, P. (2008): Viscoelastic properties of wood across the grain measured underwater-saturated conditions up to 135 °C: evidence of thermal degradation. *Journal of Material Science*, Volume 4. Seite 3210–3217.
- PUDE, R. (2005): Bedeutung morphologischer, chemischer und physikalischer Parameter sowie ihre Interaktion zur Beurteilung der Baustoffeignung unterschiedlicher Miscanthus- Typen. Beiträge zu Agrarwissenschaften Band 30. Verlag Wehle, Bad Neuenahr. ISBN 3-935307-30-6.
- PUDE, R.; FRANKEN, H.; DIEPENBROCK, W.; GREEF, J. M. (1997): Ursachen der Auswinterung von einjährigen *Miscanthus*-Beständen. *Pflanzenbauwissenschaften*. Seite 171- 176.
- PUSHINSKIS, V.; PRIEDKALNS, G.; DOLACIS, J.; HROLS, J. (2002): Selected mechanical properties of Norway spruce wood in Latvia. *Wood Structure and Properties 2002*. Kudela und Kurjatko (Hrsg.). Zvolen, Slovakia. ISBN 80967088-9-9. Seite 157-159.
- RAMPEREZ-CARRASCO, M.; WENGHOEFER, V.; GAESE, D.; MÜLLER, M.; RIEKER, C.; PUDE, R. (2010): Kompaktierung von Miscanthus als Designerbrennstoff. Pude, R. (Hrsg.). *Miscanthus – Umwelt- und Nutzungsaspekte*. Tagung vom 24.-26. November 2010 in Ardagger, Österreich. Kurzfassungen der Vorträge. Universität Bonn ILB-Press. ISBN 978-3-941766-04-4. Seite 63-68.
- RAMPEREZ-CARRASCO, M.; KLEINSCHMIDT, B.; PUDE, R.; BLÄSING, M.; MÜLLER, M. (2012): Energetische Nutzung unterschiedlicher Miscanthus Herkünfte. 7. Internationale Miscanthus-Tagung 2012, Campus Klein-Altendorf, Rheinbach. Universität Bonn-ILB Press. Bonn. Pude (Hrsg.). ISBN 978-3-941766-14-3. Seite 22-28.
- RANTA-MAUNUS, A.; DENZLER, J. K.; STAPEL, P. (2011): Strength of European timber, Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project. *VTT Working Papers 179*. ISBN 978-951-38-7521-3.
- REED, T. B.; TREZEK, G., und DIAZ, L. (1980): Biomass densification Energy requirements. Thermal conversion of solid wastes and biomass. Abstract of papers of the American Chemical Society. Seite 177- 189.
- REZNICHENKO, O. (2003): Herstellung von Brennstoffagglomeraten aus Kohlen mit unterschiedlichem Inkohlungsgrad für Kleinfeuerungsanlagen. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- RHEN, C.; GREF, R.; SJÖSTRÖM, M.; WÄSTERLUND, I. (2005): Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, Volume 87. Seite 11-16.
- ROHNE, G. W. (1984): Öl aus Weintraubenkernen mit hohem Vitamin-E-Gehalt. *European Journal of Lipid Science and Technology*, Volume 86. Seite 172–173.
- RÖHLE, H.; HARTMANN, K.-U.; STEINKE, C.; WOLF, H. (2005): Wuchsleistung von Pappel und Weide im Kurzumtrieb. *AFZ/Der Wald*, Volume 60. Seite 745-747.

- RÖHLE, H. (2009): Verfahrensempfehlungen zur Methodik der Biomasseermittlung in Kurzumtriebsbeständen. Tagungsband 2009 DVFFA Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 25.- 27. Mai 2009, Ascona. ISSN 1432-2609. Seite 220-226.
- RÖHLE, H.; HARTMANN, K.-U.; STEINKE, C.; MURACH, D. (2009): Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsbeständen. In: REEG, T. et al. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. Seite 41-55.
- RÖHRICHT, C. (2002): Acker- und pflanzenbauliche Untersuchungen zum Anbau von ein- und mehrjährigen Energiepflanzen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 4-7. Jahrgang 2002.
- ROLOFF, A. und BÄRTELS, A. (1996): Gehölze. Bestimmung, Herkunft und Lebensbereiche, Eigenschaften und Verwendung. E. Ulmer Verlag, Stuttgart. ISBN 3-8001-3479-9.
- ROLLWAGE, N. (1999): Kosten- und Leistungsrechnung: mit Übungsaufgaben und Lösungen. 5. Auflage- Köln: WRW-Verlag ISBN 3-927250-24-4.
- SALMEN, L. (1984): Viscoelastic properties of insitu lignin under water-saturated conditions. Journal of Material Science, Volume 19. Seite 3090 – 3096.
- SAMSON, P.; DUXBURY, P.; DRISDELLE M.; LAPOINTE, C. (2000): Assessment of Pelletized Biofuels. PERD Program, National Resources Canada, Contract 23348-8-3145/001/SQ.
- SAMUELSON, R.; LARSSON, S. H.; THYREL, M.; LESTANDER, T. A. (2012): Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. Applied Energy, Volume 99. Seite 109–115.
- SCHNEEBERGER, W. und PEYERL, H. (2011): Betriebswirtschaftslehre für Agrarökonomen; Facultas Universitätsverlag, Wien; ISBN: 978-3-7089-0730-7.
- SCHNECKENBERGER, K. und KUZYAKOV, Y. (2007): Carbon sequestration under *Miscanthus* in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Volume 170. Seite 538-542.
- SCHOLTEN R. L. und MCELLHINEY R. R. (1985): The effects of prebreaking in hammer mill particle size reduction. ASAE Paper No. 85-3542.
- SCHOLZ, V.; BOELCKE, B.; BURGER, F.; HOFMANN, M.; VETTER, A. (2006): Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. Merkblatt, KTBL-Datensammlung Energiepflanzen.
- SCHRIEVER, E. (1984): Zur Bestimmung von Chlor und Schwefel in Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff, Volume 42. Seite 261-264.
- SCHWARZ, H.; LIEBHARD, P.; EHRENDORFER, K.; RUCKENBAUER, P. (1994): The effect of fertilization on yield and quality of *Miscanthus sinensis* 'Giganteus'. Industrial Crops and Products, Volume 2. Seite 153-159.
- SELL, J. (1987): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Baufachverlag. ISBN 3855652236.
- SEMERE, T.; SLATER, F. M. (2007): Invertebrate populations in miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. Biomass and bioenergy, Volume 31. Seite 30-39.

- SI, C.-L.; LU, Y.-Y.; QIN, P.-P.; SUN, R.-C.; NI, Y.-H. (2011): Phenolic extractives with chemotaxonomic significance from the bark of *Paulownia tomentosa*. *Bioresources*, Volume 6. Seite 5086-5098.
- SIEVERDINGBECK, A.; PUDE, R.; BERG, E.; TRENKEL, H. (2010): Ökonomische Bewertung unterschiedlicher Anbau- und Verwertungsverfahren von *Miscanthus*. Pude, R. (Hrsg.). *Miscanthus –Umwelt- und Nutzungsaspekte*. Tagung vom 24.-26. November 2010 in Ardagger, Österreich. Kurzfassungen der Vorträge. Universität Bonn ILB-Press. ISBN 978-3-941766-04-4. Seite 72-78.
- SITZMANN, W. und BUSCHHART, A. (2009): Neue Wege der Zerkleinerung zur optimierten Herstellung von Holzpellets. 9. IndustrieForum Pellets. 6.- 7. Oktober 2009, Stuttgart. Hrsg. Solar Promotion GmbH, Pforzheim. Seite 55-63.
- SMITH, R. und SLATER, F. M. (2010): The effects of organic and inorganic fertilizer applications to *Miscanthus x giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea*, when grown as energy crops in Wales, UK. *Global Change Biology Bioenergy*, Volume 2. Seite 169-179.
- STAHL, M.; BERGHEL, J.; FRODESON, S. GRANSTRÖM, K.; RENSTRÖM, R. (2012): Effects on Pellet Properties and Energy Use When Starch Is Added in the Wood-Fuel Pelletizing Process. *Energy Fuels*, Volume 26. Seite 1937-1945.
- STARK, C. R. und CHEWNING, C. G. (2012): The effect of sieve agitators and dispersing agent on the method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. *Animal Production Science*, Volume 52. Seite 69-72.
- STELTE, W. HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. (2011a): A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*, Volume 35. Seite 910 -918.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. (2011b): Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, Volume 90, Seite 3285-3290.
- STOLZENBURG, K. (2010): Anbau von *Miscanthus (Miscanthus x giganteus)* als nachwachsender Rohstoff auf Acker- und Grünlandflächen unter dem Aspekt der Nitratverlagerung. Pude, R. (Hrsg.). *Miscanthus –Umwelt- und Nutzungsaspekte*. Tagung vom 24.-26. November 2010 in Ardagger, Österreich. Kurzfassungen der Vorträge. Universität Bonn ILB-Press. ISBN 978-3-941766-04-4.
- STOLZENBURG, K. und MASTEL, K. (2010): Chinaschilf (*Miscanthus x giganteus*) -Anbau, Verwertung und rechtliche Rahmenbedingungen, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg.
- STRAŠIL, Z. und KÁRA, J. (2010): Study of knotweed (*Reynoutria*) as possible phytomass resource for energy and industrial utilization. *Res. Agr. Eng.* Volume 56, Seite 85–91.
- STRIETZEL, R. (2005): Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme. 1. Auflage. Verlag Neuer Merkur, München. ISBN 3-937346-14-7.
- TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; DAUGBJERG JENSEN, P.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2006): Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, Volume 30. Seite 964-972.

- TEMMERMAN, M.; MIGNON, C.; PIERET, N. (2011): Influence of increasing shares of Miscanthus on physical and chemical properties of pellets produced in an industrial softwood pellets plant. V International Scientific Symposium. "Farm Machinery and Process Management in Sustainable Agriculture" Lublin, Poland, 2011. ISBN 83-922409-9-5. Seite 151-158.
- TIESSEN, D. (2012): Breeding work of New Energy Farms. 7. Internationale Miscanthus-Tagung 2012, Campus Klein-Altendorf, Rheinbach. Universität Bonn-ILB Press. Bonn. Pude (Hrsg.). ISBN 978-3-941766-14-3. Seite 45-49.
- THEK, G. und OBERNBERGER, I. (2001): Produktionskosten von Holzpellets gegliedert nach Prozessschritten und unter Berücksichtigung österreichischer Randbedingungen. 2. Europäischen Experten Forum Holzpellets, November 2001, Salzburg. Umbera GmbH (Hrsg.), St. Pölten, Austria. Seite 33-40.
- THEK, G., und OBERNBERGER, I. (2004): Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish frameworkconditions. Biomass and Bioenergy, Volume 27. Seite 671-693.
- THEK, G. und Obernberger, I. (2009): Herstellung und energetische Nutzung von Pellets: Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit. Techn. Univ. Graz, Inst. für Prozesstechnik (Verlag). ISBN 3950198059.
- TONN, B.; DENGLER, V.; THUMM, U.; PIEPHO, H.-P.; CLAUPEIN, W. (2011): Influence of leaching on the chemical composition of grassland biomass for combustion. Grass and Forage Science, Volume 66. Seite 464–473.
- TRAN, K.-Q.; LISA, K.; STEENARI, B.-M.; LINDQVIST, O. (2005): A kinetic study of gaseous alkali capture by kaolin in the fixed bed reactor equipped with an alkali detector. Fuel, Volume 84. Seite 169-175.
- VAN LOO, S. und KOPPEJAN, J. (2008): Handbook of biomass combustion and co firing. FiSH Books, Enfield. ISBN 978-1-84407-249-1.
- VOGEL, L. und PEUKERT, W. (2003): Breakage behaviour of different materials—construction of a mastercurve for the breakage probability. Powder Technology, Volume 129. Seite 101 – 110.
- VILLANUEVA, M.; PROUPIN, J.; RODRIGUEZ-ANON, J. A. ; FRAGA-GRUEIRO, L. ; SALGADO, J; BARROS, N. (2011): Energetic characterization of forest biomass by calorimetry and thermal Analysis. Journal of Thermal Calorimetry, Volume 104. Seite 61–67.
- WANG, Q., and SHOGREN, J. F. (1992): Characteristics of the crop-*Paulownia* system in China. Agriculture, Ecosystems and Environment, Volume 39. Seite 145-152.
- WEI, X.; SCHNELL, U.; HEIN, K. (2005): Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilization. Fuel, Volume 84. Seite 841-848.
- WENGHOEFER, V.; PUDE, R.; GAESE, D.; RIEKER, C. (2012): Perspektiven von Mischpellets aus landwirtschaftlich erzeugten Rohstoffen für den Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen. 7. Internationale Miscanthus- Tagung 2012, Campus Klein-Altendorf, Rheinbach. Universität Bonn-ILB Press. Bonn. Pude (Hrsg.). ISBN 978-3-941766-14-3. Seite 22-28.
- WOMAC, A. R.; IGATHINATHANE, C.; BITRA, P.; MIU, P.; YANG, T. SOKHANSANJ, S. ; NARAYAN, S. (2007): Biomass pre-processing size reduction with instrumented mills. 2007 ASABE Annual International Meeting, Paper Number: 076046.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M.L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. (2011): A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. *Renewable Energy*, Volume 36. Seite 3133-3140.

ZHAO-HUA, Z.; CHING-JU, C.; XIN-YU, L.; YAO GAO, X. (1986): *Paulownia in China: Cultivation and Utilization*. Chinese academy of forestry staff. ISBN 9971-84-546-6.

sonstige Quellen

- ANONYMUS 1 (2011): www.unendlich-viel-energie.de. http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Technische_Skizze_Holzpelletierungsanlage.jpg
Zugriff 27.01.2011.
- ANONYMUS 2 (2011): Siebtechnik GmbH.
<http://www.siebtechnik-gmbh.de/fileadmin/userupload/PDF/alt/wb228d.pdf>.
Zugriff 22.01.2011.
- ANONYMUS 3 (2011): BKI Objektdaten Neubau – Band Nr. 11. Baukosten Informationszentrum.
- ANONYMUS 1 (2012): *Paulownia tomentosa* – Infoblatt SKEW - 2006 Schweizerische Kommission für die Erhaltung von Wildpflanzen.
- ANONYMUS 2 (2012): <http://german.alibaba.com/products/kaolin-clay-price.html> Zugriff 10.12.2012.
- ANONYMUS 3 (2012): EnBw (Stromversorger). www.enbw.com Zugriff 02.01.2013.
- ANONYMUS 4 (2012): Bundesverband Energie und Wasser. www.bdew.de Zugriff 19.12.2012.
- ANONYMUS 5 (2012): Personalkostenrechner Handwerk-Magazin. <http://www.handwerk-magazin.de/personalkostenrechner/150/2/32766/>. Zugriff 15.12.2012.
- ANONYMUS 6 (2012): Deutscher Wetterdienst.
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwd_www_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimadaten%2FKldaten_kostenfrei%2FKldat_D_stationen_home_node.html%3F_nnn%3Dtrue. Zugriff 04.03.2012.
- ANONYMUS 7 (2012): Daten und Fakten 2012. Jahrestagung des Bundesverbandes der Stärkeerzeuger.
- ANONYMUS 1 (2013): Webseite Deutsches Pellet Institut (DEPI). www.depi.de/grafiken
Zugriff 09.02.2013.
- ANONYMUS 2 (2013): Projekt Mixbiopells <http://www.mixbiopells.eu/de/home.html> Zugriff 22.03.2013.
- ANONYMUS 3 (2013): ATB Potsdam. <http://www.atbpotsdam.de/forschungsprogramme/stoffliche-und-energetische-nutzung-von-biomasse/bioenergieforschung/energieholz-aus-kup.html>
Zugriff 22.03.2013.
- ANONYMUS 4 (2013): Statistisches Bundesamt.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff 11.02.2013.
- ANONYMUS 5 (2013): Frankfurter Allgemeine Zeitung.
<http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/umweltauflagen-eu-staaten-einigen-sich-bei-agrarreform-12121449.html> Zugriff 22.03.2013.
- ANONYMUS 6 (2013): Agrarheute. Deutscher Landwirtschaft Verlag.
<http://www.agrarheute.com/stufenmodell-greening> Zugriff 22.03.2013.
- ANONYMUS 7 (2013): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). Agrar-Umweltmaßnahmen. http://www.bmelv.de/DE/Landwirtschaft/Foerderung-Agrarsozialpolitik/AgrarUmweltmassnahmen/agrar-umweltmassnahmen_node.html.
Zugriff 22.03.2013.

- ANONYMUS 8 (2013): www.invasiveplantatlas.org. Zugriff 05.05.13.
- ANONYMUS 9 (2013): <http://www.controllingportal.de/Fachinfo/Investitionsrechnung/Interne-Zinsfuss-Methode.html>. Zugriff 09.02.2013.
- ANONYMUS 10 (2013): Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) – „Erste Säule“. Deutscher Bauernverband. Situationsbericht 2012/2013. www.bauernverband.de/43-gemeinsame-agrarpolitik-gap-erste-saeule. Zugriff 13.05.2013.
- ANONYMUS 11 (2013): Glossar Eurostat. EU Kommission. epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Glossary:Extensive_farming/de. Zugriff 13.05.2013.
- ANONYMUS 12 (2013): C.A.R.M.E.N ev.. <http://www.carmenev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/jahresmittelwerte/121-der-pellet-preis-index-jahresmittelwerte>. Zugriff 10.01.2013.
- BEISING, R. (2002): Laboranalysen von Brennstoffen zur Emissionsbestimmung. Workshop am 17. September 2002 im Umweltbundesamt, Berlin. „Erstellung einer Datenbasis für Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Deutschland“. www.umweltbundesamt.de/emissionen/0902-1/beising.ppt . Zugriff am 26.01.2013.
- BEHNKE, A (2011): Rechtliche Rahmenbedingungen für Kleinfeuerungsanlagen-1. BImSchV. Umwelt Bundesamt. Sächsisches Miscanthus- Fachgespräch, Leipzig den, 29.09. 2011.
- BRUCKNER, F. (2010): Lagerungs- und Aufbereitungsmethoden der Substrate - Das Biomassezentrum -. Bioenergie aus der Landschaftspflege 09./10.02.2010 im Ernst-Reuter-Haus in Berlin.
- BUSCHHART, A. (2012): mündliche Auskunft. Mitarbeiter der Firma Amandus Kahl Reinbek, Forschung und Entwicklung.
- CLATTERBUCK, W. K. und HODGES, D.G. (2005): "PB1465 Tree Crops for Marginal Farmland - Paulownia," The University of Tennessee Agricultural Extension Service, 05-0012 PB1465-1M-1/05(Rev) E12-4915-00-005-05, http://trace.tennessee.edu/utk_agexfores/3. Zugriff am 07.05.2013.
- GAESE, D. (2011): mündliche Auskunft. Direktorin des Instituts für Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.
- HAYER, R. (2010): Nachwachsender Rohstoff „Miscanthus“. Vortrag im Rahmen einer BLE Veranstaltung am 02.02.2010 in Föhren.
- HIENDLMEIER, S. (2010): Der Brennstoff Strohpellets. Bericht 09/10 Carmen e.V.
- HORIX, G (2013): mündliche Auskunft. Leiterin Referat Acker- und Pflanzenbau, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Fortsen; Rheinland-Pfalz.
- KASPERCZYK, N. (2012): Greening in der 1. Säule: Welche Anforderungen sollten ökologische Vorrangflächen erfüllen? GAP ab 2014 – Mehr Biodiversität im Ackerbau?, Vilm, 02.-05. Mai 2012. www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/ina/vortraege/2012/2012-GAP-II-14_NKasperczyk_lfLS_Vilm_04Mai.pdf. Zugriff 13.05. 2013.

- LENZ, V. und ZENG, T. (2012): Best practice Beispiele „ Herstellung und Verbrennung alternativer und gemischter Biomassepellets“. Projekt mixbiopells.
http://www.mixbiopells.eu/fileadmin/user_upload/WP3/Brochure_Best_Practice_Chain/D3_4_Brochure_Best_Practice_Chains_DE.pdf. Zugriff 09.02.2013.
- LEUER, J. (2012): Beispielangebot für Pelletwerk. Mitarbeiter Vertrieb Amandus Kahl AG.
- OTTLINGER, B. (2009): Unterschiede bei der Pelletierung von Maisganzpflanzen und Gras.
Vortrag in Sursee am 20. März 2009. Mitarbeiter der Firma Amandus Kahl
http://backoffice.apswiss.ch/1100/bernd_ottlinger.pdf Zugriff 10.01.2013.
- PICHLER, W. und GOLSER, M. (2009): Neue Optimierungansätze in der Peletproduktion.
9. Industrieforum Pellets. 6.- 7. Oktober 2009, Stuttgart. Hrsg. Solar Promotion GmbH, Pforzheim. Seite 55-63.
- PILZ, B. (2008): Praxiserfahrungen bei der Kompaktierung von halmgutartiger Biomasse.
1. Internationale Fachtagung – Stohenergie 2008. Jena.
- SCHÄFER, R. (2011): mündliche Auskunft. Inhaber der Firma Schäfer.
- SCHOLTE-REH, F. (2012): mündliche Auskunft. Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.
- SCHNEIDER, A. (2011): Biobrennstoffdesign – Erweiterung der Pelletrohstoffbasis.
Tagung im Rahmen der World Sustainable Days Wels 2010.
- SCHWARZ, K.-U. und RAUTENBERG, M.: Gegenüberstellung von Holz und Miscanthus aus Kurzumtriebsolantagen, II. Sächsisches Miscanthus- Fachgespräch, Leipzig den, 29.09. 2011.
- SITZMANN, W. und Buschhart, A.(2009): Kosten-und verfahrensoptimierte Naßzerkleinerung von Holzhackschnitzeln. Agritechnica 2009 in Hannover.
<http://www.agritechnica.com/fileadmin/downloads/2009/Fachprogramm/Forum3/12.11/sitzmann.pdf> Zugriff 10.01.2013.
- STERNOWSKY, S. (2007): Erfahrungen mit Mischpellets und FuE-Bedarf aus der Sicht der (Anlagen-) Hersteller. Vortrag auf der Fachveranstaltung der FNR am 1. März 2007
<http://www.fnrserver.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Mischpellets/Kahl.pdf>
Zugriff 10.01.2013.
- TOEWS, T. (2010): Bestimmung der Erntekosten von Silomais und deren Relevanz für die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Workshop am 06.08.2010 an der FH Bingen
http://www.izes.de/cms/upload/pdf/20100609_Workshop_Thore_Toews.pdf
Zugriff 11.10.2012.
- TORNOW, N. (2013): mündliche Auskunft. Besitzer der Plantage Tornow.
- VON REICHENBACH, H. (2011): mündliche Auskunft. Vertriebsleiter der Amandus Kahl GmbH & Co. KG in Reinbeck.
- WEBER, J. (2012): Gabler Wirtschaftslexikon.
www.wirtschaftslexikon.gabler.de Zugriff 02.01.2013.

- WETTER, C. et al. (2010): „Optimierung der regionalen Bioalkoholherstellung aus biogenen Reststoffen – RE₂Alko“. Fachtagung Nachhaltige Biokraftstoffe 28.10 2010.
<http://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2012/2012-11-22-biokraftstoff-05.pdf>
Zugriff 16.03.2012.
- WITT, J. und LENZ, V. (2007): Holzmischpellets eine Chance für den Kleinverbraucher Markt.
7. Industrieforum Pellets. 9.- 10. Oktober 2007, Stuttgart. Hrsg. Solar Promotion GmbH,
Pforzheim. Seite 60-67.
- WOODS, V. B. (2008): Paulownia as a novel biomass crop for Northern Ireland? – A review of current knowledge; AFBI Report; 2008. http://www.afbini.gov.uk/afbi_paulownia.pdf.
Zugriff: 07.05.2013.
- ZENG, T. (2010): Additivierung von Miscanthuspellets zur Verbesserung des Verbrennungsverhaltens.
1. Sächsisches Miscanthus-Fachgespräch. Leipzig, 04.Oktober 2010.

unveröffentlichte Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

MARQUARDT, A.-K. (2012): Keimverhalten von *Paulownia* Arten unter Kulturbedingungen.
Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Ökologischer Botanischen Garten. Universität Bayreuth.

PÜHL, J. (2012): Perspektiven für den kommerziellen Anbau von *Paulownia tomentosa* in
Deutschland. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn.

RÖHRIG, M. (2012): Untersuchung zum Einsatz Nachwachsender Rohstoffe als Ersatz für die
Hochofeneinblaskohle in der Stahlindustrie. Unveröffentlichte Masterarbeit.
Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn.

SUSSYK, S. (2012): Einfluss der Blatt-Spross-Verhältnisse unterschiedlicher *Miscanthus*-
Herkünfte auf die energetische Nutzung. Unveröffentlichte Masterarbeit.
Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn.

Normen und Richtlinien

DIN 51719: Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes.

DIN 51724-1: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Schwefelgehaltes - Teil 1:
Gesamtschwefelgehalt.

DIN 51727: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Chlorgehaltes.

DIN 51900: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe; Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter.

DIN 52 185: Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser.

DIN 52 186: Prüfung von Holz; Bestimmung der Biegefestigkeit.

DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung.

DIN_EN 14774-1: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 1:
Gesamtgehalt an Wasser Referenzverfahren.

DIN_EN 14775: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes.

DIN_EN 14778-1: Feste Biobrennstoffe – Probenahme – Teil 1: Verfahren zur Probenahme.

DIN_EN 14961-2: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2:
Holzpellets für nichtindustrielle Verwendung.

DIN_EN 14961-6: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 6:
Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung.

DIN_CEN/TS 15104-N: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an
Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff – Instrumentelle Verfahren.

DIN_EN 15210-1: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der mechanischen Festigkeit von
Pellets und Briketts – Teil 1: Pellets.

DIN_CEN/TS 15289: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel
und Chlor.

DIN_CEN/TS 15370-1: Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der
Asche – Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen.

VDI Richtlinie 2067: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen / Betriebstechnische und
wirtschaftliche Grundlagen / Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren vom Oktober 1991.

ANHANG

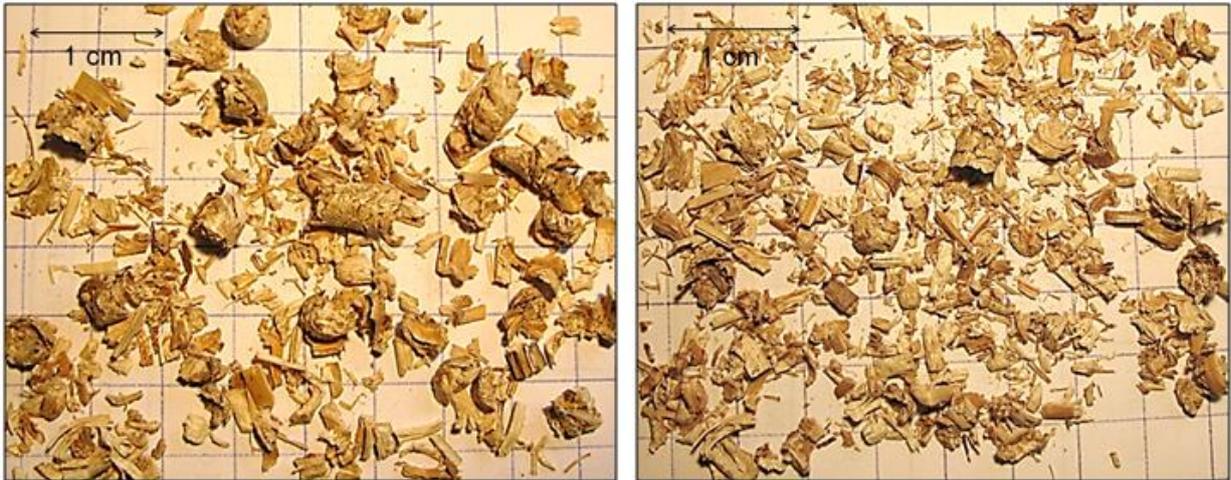


Abbildung A1: Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus. Links: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 590 kg h^{-1} , Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts: Geringfügig anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 625 kg h^{-1} , Wasserzugabe: 0 M.-%)

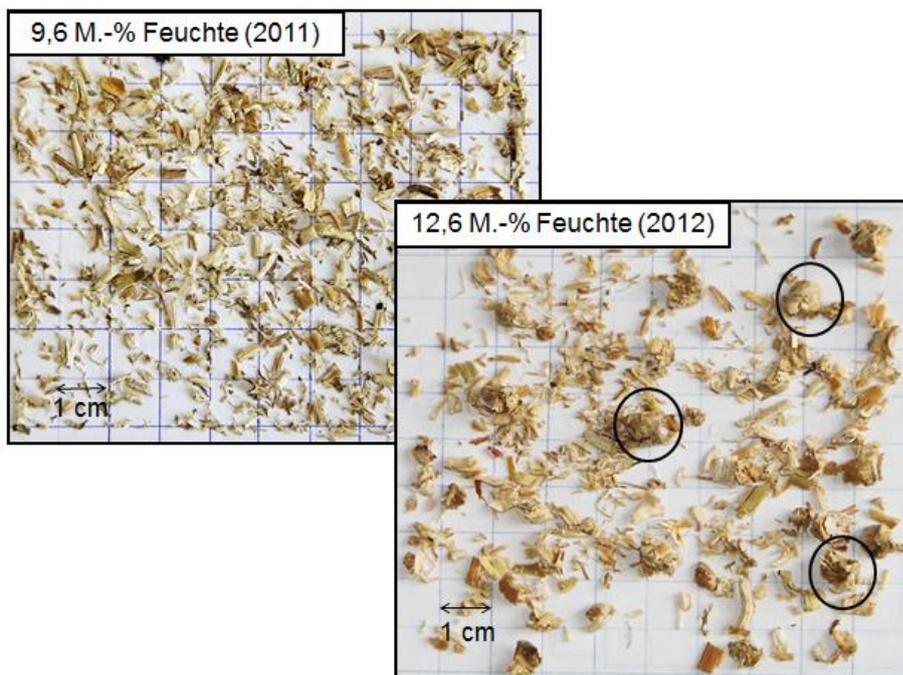


Abbildung A2: Vergleich der Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus, der Versuchsjahre 2011 und 2012. links oben: aus 2011 (Ausgangsfeuchte: 9,6 M.-%), rechts unten: aus 2012 (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%)

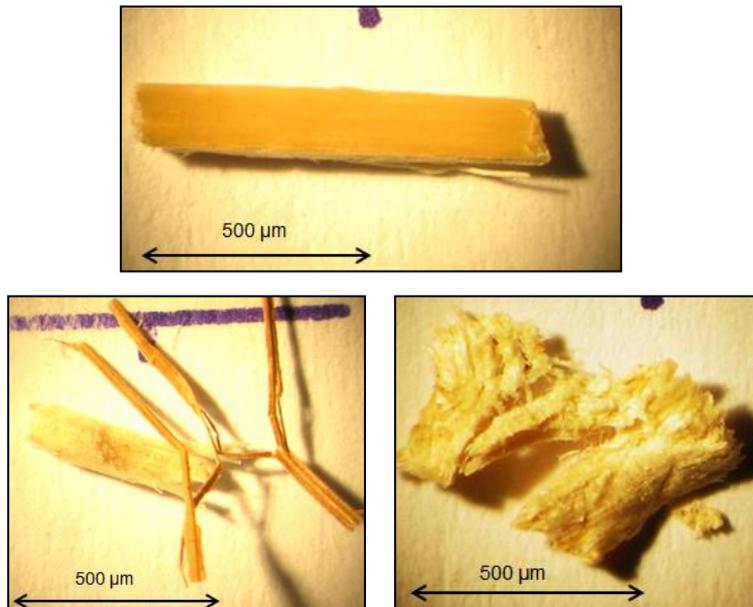


Abbildung A3: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Oben: Hammermühle, unten links: Zerkleinerung und unten rechts: Kollermühle)

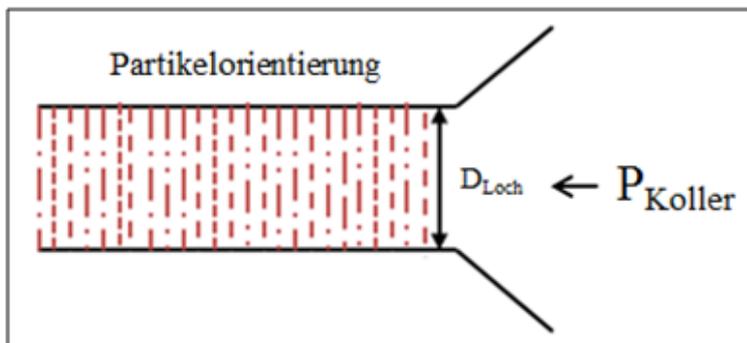


Abbildung A4: Skizze einer Matrice mit Angabe der Orientierung der Partikel (nach HOLM et al. 2006)

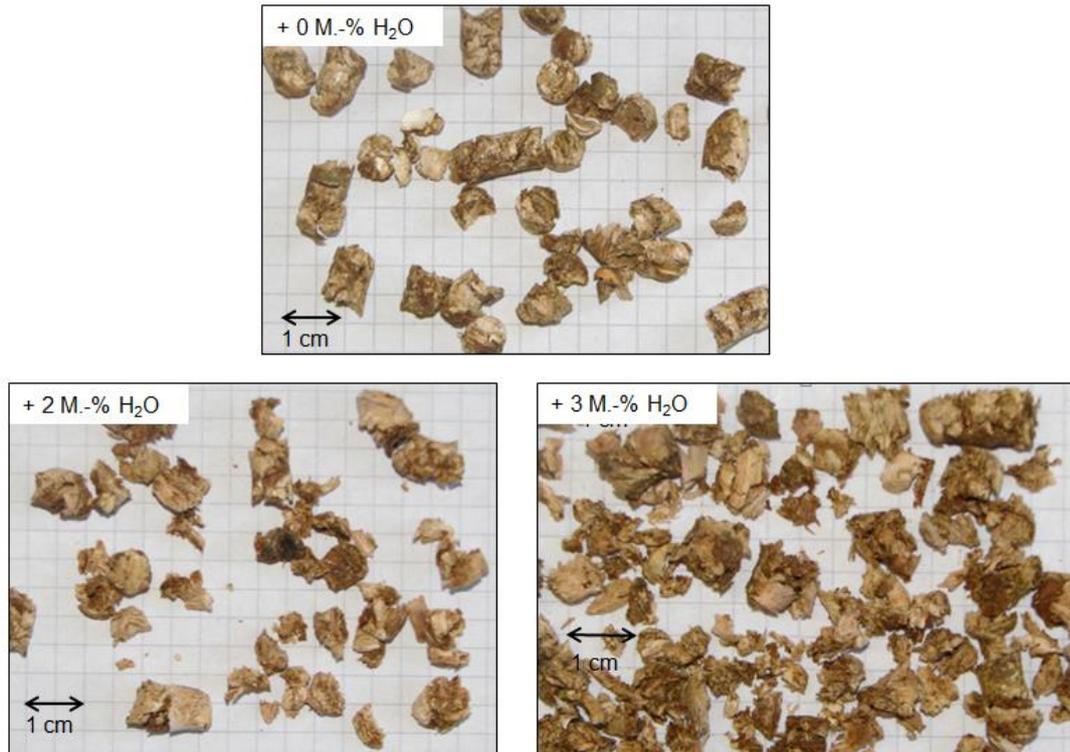


Abbildung A5: Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Paulownia. Oben: Sehr stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 510 kg h⁻¹, Wasserzugabe: 0 M.-%) Links unten: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 550 kg h⁻¹, Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts unten: Anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 600 kg h⁻¹, Wasserzugabe: 3 M.-%)

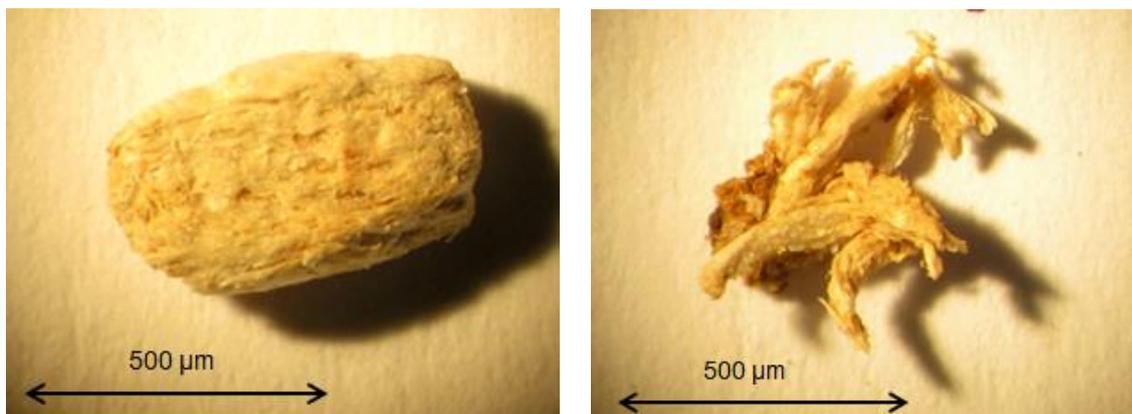


Abbildung A6: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Paulownia, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Links: Hammermühle und rechts: Kollermühle



Abbildung A7: Verschlackung der Asche während eines ersten Verbrennungsversuches von Miscanthus-Mischpellets (50 M.-% Miscanthus / 50 M.-% Paulownia) durch die FH Köln (Bild: Steinbüchel, 2011)



Abbildung A8: Miscanthus-Ernteverfahren „Luxemburger Modell“ (Quelle: ANKEN et al. 2012)

Tabellen

Tabelle A1: Ergebnis der Befragung zur Marktsituation von Miscanthus (n = 6)

Ø Anbaufläche	Ø Ertrag	Vermarktungsanteil	Produktart	Ø Marktpreis
[ha]	[t ha ⁻¹]*	[%]	[%]	[€ t ⁻¹]
55	15	85	70 Pferdeeinstreu 25 Brennstoff 5 sonstiges	110
*bezogen auf 15 M.-% Wassergehalt				

Tabelle A2: Anforderungen an EN_{plus}-Pellets nach EN_{plus}-Zertifizierung (Quelle: ANONYMUS 1, 2013)

Parameter	Einheit	EN _{plus} -A1	EN _{plus} -A2
Durchmesser	mm	6 (±1) oder 8 (±1) ¹⁾	6 (±1) oder 8 (±1) ¹⁾
Länge	mm	3,15 = L = 40 ²⁾	3,15 = L = 40 ²⁾
Schüttdichte	kg/m ³	= 600	= 600
Heizwert	MJ/kg	16,5 = Q =19	16,3 = Q =19
Wassergehalt	Ma.-%	= 10	= 10
Feinanteil	Ma.-%	= 1 ⁴⁾	= 1 ⁴⁾
Mechanische Festigkeit	Ma.-%	= 97,5 ⁵⁾	= 97,5 ⁵⁾
Aschegehalt	Ma.-% ³⁾	= 0,7	= 1,5
Ascheerweichungstemperatur	°C	= 1200	= 1100
Chlorgehalt	Ma.-% ³⁾	= 0,02	= 0,02
Schwefelgehalt	Ma.-% ³⁾	= 0,03	= 0,03
Stickstoffgehalt	Ma.-% ³⁾	= 0,3	= 0,5
Kupfergehalt	mg/kg ³⁾	= 10	= 10
Chromgehalt	mg/kg ³⁾	= 10	= 10
Arsengehalt	mg/kg ³⁾	= 1	= 1
Cadmiumgehalt	mg/kg ³⁾	= 0,5	= 0,5
Quecksilbergehalt	mg/kg ³⁾	= 0,1	= 0,1
Bleigehalt	mg/kg ³⁾	= 10	= 10
Nickelgehalt	mg/kg ³⁾	= 10	= 10
Zinkgehalt	mg/kg ³⁾	= 100	= 100

1) Durchmesser muss angegeben werden.
2) maximal 1% d. Pellets darf länger als 40 mm sein, max. Länge 45 mm
3) im wasserfreien Zustand (wf)
4) Partikel < 3,15 mm, Feinanteil an der letztmöglichen Stelle vor Übergabe der Ware bzw. beim Eintreffen von Sackware beim Endverbraucher.
5) Bei Messungen mit dem Lignotester gilt der Grenzwert = 97,7 Ma.-%

Tabelle A3: wichtigste Anforderungen an Pellets nach DIN_EN 14961-6

	Eigenschaftsklasse, Bestimmungsverfahren	Einheit	Pellets aus Getreidestroh	Pellets aus Miscanthus	Pellets aus Rohr-Glanzgras
Normativ	Herkunft und Quelle, EN 14961-1:2010, Tabelle 1		2.1.1.2 Strohanteile	2.1.2.1 Gräser, Ganzpflanze	2.1.2.1 Gräser, Ganzpflanze
	Durchmesser, D^a und Länge L^b prEN 16127 nach Bild 1	mm	D08 bis D25, $D \pm 1$; $3,15 \leq L \leq 40$ (von D08 bis D10) $3,15 \leq L \leq 50$ (von D12 bis D25)	D08 bis D25, $D \pm 1$; $3,15 \leq L \leq 40$ (von D08 bis D10) $3,15 \leq L \leq 50$ (von D12 bis D25)	D08 bis D25, $D \pm 1$; $3,15 \leq L \leq 40$ (von D08 bis D10) $3,15 \leq L \leq 50$ (von D12 bis D25)
	Wassergehalt, M , EN 14774-1, EN 14774-2	im Anlieferungszustand, m-%	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$	$M12 \leq 12$
	Aschegehalt, A^c , EN 14775	m-% wasserfrei	$A8.0 \leq 8$ $A8.0 + > 8^d$	$A4.0 \leq 4$ $A8.0 \leq 6$	$A8.0 \leq 8$ $A8.0 + > 8^d$
	Mechanische Festigkeit, DU , EN 15210-1	im Anlieferungszustand, m-%	$DU97.5 \geq 97,5$	$DU97.5 \geq 97,5$	$DU98.5 \geq 98,5$
	Feingut am Werkstor beim Transport von Schüttgut (zum Zeitpunkt der Verladung) und in kleinen Säcken, bis zu 20 kg, und großen Säcken (zum Zeitpunkt des Abpackens oder bei der Lieferung an den Endverbraucher), F , EN 15210-1	im Anlieferungszustand, m-%	$F1.0 \leq 1,0$	$F1.0 \leq 1,0$	$F1.0 \leq 1,0$
	Additive ^e	m-%, wasserfrei	Art und Menge sind anzugeben	Art und Menge sind anzugeben	Art und Menge sind anzugeben
	Heizwert im Anlieferungszustand, Q , EN 14918	MJ/kg oder kWh/kg	Kleinster Wert ist anzugeben.	Kleinster Wert ist anzugeben.	$Q14.5 \geq 14,5$ $Q4.0 \geq 4,0$
	Schüttdichte, BD , EN 15103	im Anlieferungszustand, kg/m ³	$BD600 \geq 600$	$BD580 \geq 580$	$BD550 \geq 550$
	Stickstoff, N , EN 15104	m-% wasserfrei	$N0.7 \leq 0,7$	$N0.5 \leq 0,5$	$N 2.0 \leq 2,0$
	Schwefel, S , EN 15289	m-% wasserfrei	$S0.10 \leq 0,10$	$S0.05 \leq 0,05$	$S0.20 \leq 0,20$
	Chlor, Cl , EN 15289	m-% wasserfrei	$Cl0.10 \leq 0,10$	$Cl0.08 \leq 0,08$	$Cl0.10 \leq 0,10$

Tabelle A4: Benotungsskala der visuellen Qualität von Pellets

Note	Feinanteil	Länge	Form	Oberfläche
1	sehr gering	einheitlich lang	absolut zylindrisch	sehr glasisg
2	sehr gering	lang	zylindrisch	glasisg
3	gering	mittel lang	zylindrisch mit Rissen	leicht glasisg
4	mittel	kurz	leicht aufgequollen	leicht glasisg
5	hoch	sehr kurz	aufgequollen	matt
6	sehr hoch	sehr kurz	stark aufgequollen	matt

Tabelle A5: Detaillierte Maschineneinstellungen während der ersten Zerkleinerungsversuchsreihe mit der Kollermühle, vorgenommen durch die Firma Amandus Kahl

Versuchs-Nr.	Kolleranzahl	Drehzahl [U min ⁻¹]	D_{Loch} [mm]	Presskanalverhältnis
1	2	166	10	1 : 2
2	2	166	8	1 : 2
3	2	166	8	1 : 1
4	2	166	6	1 : 1
5	2	166	4	1 : 1

Tabelle A6: Versuchsvarianten der Teilversuche des zweiten Zerkleinerungsversuches mittels Kollermühle aus dem Jahr 2012

Versuchs-Nr.	Biomasse	Feuchte [M.-%]	Zugabe H ₂ O [M.-%]	Durchsatz [kg h ⁻¹]	Versuchsmasse [kg]	Anzahl Wiederholungen
1	<i>M. x g.</i>	12,6	0	490	8,2	3
2	<i>M. x g.</i>	12,6	0	530	8,9	1
3	<i>M. x g.</i>	12,6	0	620	10,3	1
4	<i>M. x g.</i>	12,6	0	710	11,8	4
5	<i>M. x g.</i>	12,6	2	290	4,8	1
6	<i>M. x g.</i>	12,6	2	450	7,5	1
7	<i>M. x g.</i>	12,6	2	590	9,8	1
8	<i>M. x g.</i>	12,6	2	620	10,3	1
9	<i>P. t.</i>	9,2	0	420	10,6	1
10	<i>P. t.</i>	9,2	0	450	10,3	3
11	<i>P. t.</i>	9,2	2	510	12,4	1
12	<i>P. t.</i>	9,2	2	550	15,7	1
13	<i>P. t.</i>	9,2	3	550	14,1	2
14	<i>P. t.</i>	9,2	3	600	10,4	1
15	<i>P. t.</i>	9,2	3	650	33,4	1

Tabelle A 7: Einstellungen der Pelletpresse unter welchen die Pellets während des Praxisversuches bei Amandus Kahl pelletiert wurden

Variante	Kolleranzahl	Drehzahl [U min ⁻¹]	D_{Loch} [mm]	Presskanalverhältnis	Durchsatz [kg h ⁻¹]
1	2	166	6	1 : 7	385
2	2	166	6	1 : 7	385
3	2	166	6	1 : 5	363
4	2	166	6	1 : 5	390

Tabelle A8: Druck- und Biegefestigkeit von Paulownia-, Fichten- und Pappelholz nach diversen Literaturangaben

Holzart	Druckfestigkeit [N mm ⁻²]	Biegefestigkeit [N mm ⁻²]
Paulownia	20 - 40 ^{1 2 3}	38 - 62 ^{1 2 3}
Fichte	40 - 56 ^{4 5 6 7}	58 - 106 ^{4 5 6 7}
Pappel	15 ⁸	24 ⁸
Quellen: ¹ ZHAO-HUA (1986); ² AKYILDIZ und KOL (2009); ³ PÜHL (2012), ⁴ RANTA-MAUNUS et al. (2011); ⁵ PUSHINSKIS et al. (2002); ⁶ LOHMANN (1986); ⁷ Sell (1987); ⁸ KLAUDITZ (1951)		

Tabelle A9: Si-, K- und Ca- Gehalte [M.-% (TM)] von *Miscanthus x giganteus* (Typ 34 Kenn 8. J.) (1), *Paulownia tomentosa* (2) und Mischpellets aus (1) und (2) (nach RÖHRIG, 2012)

	Biomasseart		
	<i>M. x g.</i> 34 Kenn 8. J.	<i>P. t.</i>	Mischpellets
Si-Gehalt [mg kg ⁻¹]*	5.100	200	2.600
K-Gehalt [mg kg ⁻¹]*	2.000	2.700	3.100
Ca-Gehalt [mg kg ⁻¹]*	1.100	1.300	1.400
Si / K	2,55	0,07	0,84
*bezogen auf Trockenmasse			