universitätbonn
Campus Klein-Altendorf

Nachwachsende Rohstoffe

ABSCHLUSSBERICHT

zum Projekt

Verbundprojekt: C4-Kompakt "Entwicklung einer optimierten Produktionskette für die Bereitstellung von Miscanthus-Mischpellets zur Nutzung in Biomassefeuerungsanlagen" Teilprojekt 1

gefördert durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR e.V.)

Projektleitung: **Universität Bonn,**
Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe
Prof. Dr. Ralf Pude

Kooperationspartner **Fachhochschule Köln,**
Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien
Prof. Dr. Dagmar Gaese, Prof. Dr. Christiane Rieker

Laufzeit des Projektes: **01.08.2010 – 31.01.2013**

erarbeitet von
Dipl.-Ing. agr. Volker Wenghoefer

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS VII

ABBILDUNGSVERZEICHNIS IX

TABELLENVERZEICHNIS XV

FORMELVERZEICHNIS XVII

1. Einleitung und Problemstellung 1

2. Zielsetzung 4

2.1 Gesamtziele des Vorhabens 4

2.2. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele 4

3. Stand der Wissenschaft und Technik 5

3.1 Grundlagen des Pelletproduktion 5

3.2 Grundlagen der Pelletierung 6

3.2.1 Aufbau und maschinenbautechnische Unterschiede von Pelletpressen 7

3.2.2 Wirkungsweise und physikalische Grundprinzipien des Pelletierungsvorgangs 8

3.2.2.1 Einfluss der Matrizengeometrie auf den Pelletierungsvorgang 10

3.2.2.2 Einfluss des Materials auf den Pelletierungsvorgangs 12

3.3 Grundlagen der Zerkleinerungstechnik 14

3.3.1 Die Hammermühle 15

3.3.2 Die Trockenzerfaserung 16

3.3.3 Die Kollermühle 17

3.3.4 Der Prallreaktor 18

3.3.5 Stand der Technik (Zusammenfassung) des Prozessschrittes der Zerkleinerung für den Pelletierungsprozess 19

3.4 Grundlagen der Rohstoffwahl für den Pelletierungsprozess 19

3.4.1 Klassische Rohstoffe der Produktion von Qualitätspellets 20

3.4.2 Alternative Rohstoffquellen für die Pelletproduktion 21

3.5 Grundlagen der ökonomischen Bewertung des Pelletierungsprozesses 21

4. Material und Methoden 23

4.1 Vorversuche 24

4.1.1. Selektion der Biomassen als Mischkomponenten 24

4.1.1.1 Auswahl von geeignetem Miscanthus-Typen 24

4.1.1.2 Vorauswahl geeigneter Mischungspartner 25

4.1.2 Überprüfung der Pelletierbarkeit der Brennstoffe 26

4.1.3 Bestimmung geeigneter Additive als Presshilfsstoffe 29

4.2 Zerkleinerungsversuche 30

4.2.1 Energiebedarfsermittlung der verschiedenen Zerkleinerungssystemen für die Bewertung der Energiebetriebskosten 31

4.2.1.1 Energiebedarfsermittlung Hammermühle 32

4.2.1.2 Energiebedarfsermittlung Zerfaserung 32

4.2.1.3 Energiebedarfsermittlung Kollermühle 33

4.2.1.4 Energiebedarfsermittlung Prallreaktor 35

4.2.2 Analyse der Pelletierungseigenschaften des, durch verschiedene Verfahren, zerkleinerten Miscanthus-Erntegutes 36

4.2.2.1 Analyse der Korngrößenverteilung des, auf unterschiedliche Art zerkleinerten Miscanthus-Erntegutes 36

4.2.2.2 Energiebedarfsermittlung der Pelletierung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahren für Miscanthus 36

4.2.2.3 Pelletierungsversuche zum Einfluss der Korngrößenverteilung, des Verfahrens für die Zerkleinerung von Miscanthus auf die Pelletqualität 37

4.3 Versuche zur Wirkung von Wassergehalt, Matrizenpresskanallängen und Anteil von Presshilfsstoffen auf den Pelletierungsvorgang 37

4.3.1 Pelletierungsversuch zur Identifikation des optimalen Wassergehaltes der Pelletierung 38

4.3.2 Versuch zum Einfluss der Matrizenpresskanallänge auf den Prozessschritt der Pelletierung 38

4.3.3 Versuch zum Einfluss der Durchsatzmasse auf den Prozessschritt der Pelletierung 39

4.4 Untersuchung der Brennstoffeigenschaften der ausgewählten Biomassen 39

4.5 Versuch zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets durch Beimischung von Kaolin 40

4.6 Pelletierungs- Praxisversuch 40

4.7 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Miscanthus-Mischpellet-Produktionsmodelles 42

4.7.1 Ermittlung des Gewinnes einer Miscanthus-Mischpelletproduktion 43

4.7.2 Sensitivitäts-Analyse der Miscanthus-Mischpelletproduktion 48

4.8 Statistische Auswertung 48

5. Ergebnisse 49

5.1 Ergebnisse aus Vorversuchen 49

5.1.1 Aschegehaltanalyse verschiedener Biomassen 49

5.1.1.1 Aschegehalte von Miscanthus 49

5.1.1.2 Aschegehalte potentieller Mischungspartner 53

5.1.2 Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassearten 54

5.1.3 Eignung der verschiedenen Additive als Presshilfsstoffe 55

5.2 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren 56

5.2.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle und Zerfaserung 57

5.2.2 Zerkleinerungsversuche von Miscanthus mittels Kollermühle 59

5.2.2.1 Versuchsreihe zur Identifikation geeigneter Matrizen (Versuch 2011) 59

5.2.2.2 Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus und Paulownia mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuch 2012) 61

5.2.2.3 Zusammenfassung der Versuche zur Qualitätsbestimmung des Zerkleinerungsprozesses mittels Kollermühle 64

5.2.3 Zerkleinerungsversuche mit dem Prallreaktor 65

5.2.4 Vergleich des Energiebedarfes zur Zerkleinerung von Miscanthus, der verschiedenen Verfahren 65

5.2.5 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Pelletierungsprozess 66

5.2.5.1 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung 67

5.2.5.2 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf die physikalischen Pelleteigenschaften von Mischpellets 67

5.2.5.3 Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte 68

5.2.5.4 Einfluss der Korngrößenverteilung, des durch unterschiedliche Verfahren zerkleinerten Miscanthus auf die physikalische Pelletqualität 70

5.2.6 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse 71

5.3 Wirkungsweise von Wassergehalt, Anteil von Presshilfsstoffen u. Matrizenpresskanallängen auf den Pelletierungsvorgangs 71

5.3.1 Versuch zur Identifikation des optimalen Wassergehaltes für den Prozessschritt der Pelletierung 71

5.3.2 Einfluss der Presskanallänge der Matrize auf die Pelletierung 74

5.3.3 Einfluss der Durchsatzes auf den Prozessschritt der Pelletierung 76

5.4 Brennstoffeigenschaften ausgewählter Biomassen 77

5.4.1 Brennstoffeigenschaften von *Miscanthus x giganteus* 77

5.4.2 Brennstoffeigenschaften von *Paulownia tomentosa* 79

5.4.3 Brennstoffeigenschaften von Mischpellets aus *Miscanthus x giganteus* und *Paulownia tomentosa* 79

5.5 Versuch zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperaturen der Pellets durch Beimischung von Kaolin 81

5.6 Pelletierungspraxisversuch bei Amandus Kahl 82

5.6.1 Vorversuch - Pelletierung - bei Amandus Kahl 82

5.6.2 Hauptversuch - Pelletierung – bei Amandus Kahl 85

5.7 Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion 86

5.7.1 Gewinn und interne Rendite 86

5.7.2 Sensitivitätsanalyse 88

6. Diskussion der Ergebnisse und deren Bedeutung für den Projekterfolg 92

6.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen 92

6.1.1 Aschegehalte der Mischungspartner für die Pelletproduktion 92

6.1.1.1 Aschegehalte von *Miscanthus x giganteus* 92

6.1.1.2 Aschegehalte potentieller Mischungspartner 98

6.1.2 Additive als Presshilfsstoffe 99

6.1.3 Herleitung des Mischungsverhältnisses der Mischpellets 101

6.2 Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens für die Mischpelletproduktion 102

6.2.1 Vergleich des Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle und Zerfaserung 102

6.2.2 Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle 103

6.2.2.1 Identifikation geeigneter Matrizen 104

6.2.2.2 Zerkleinerung unter optimierten Maschineneinstellungen 106

6.2.3 Zerkleinerung von Miscanthus mittels Prallreaktor 108

6.2.4 Zerkleinerung holzartiger Biomasse 109

6.2.4.1 Zerkleinerung von Holz mittels Hammermühle 109

6.2.4.2 Zerkleinerung von Holz mittels Kollermühle 110

6.2.4.3 Zerkleinerung von Holz mittels Zerfaserung und Prallreaktor 112

6.2.4.4 Zusammenfassung der Zerkleinerungsversuche von Holz 113

6.2.5 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren 114

6.2.5.1 Energiebedarf der Zerkleinerungsverfahren 114

6.2.5.2 Pelletierbarkeit der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens 116

6.2.5.3 Gesamtbeurteilung der Zerkleinerungsverfahren 120

6.3 Einfluss des Wassergehaltes, der Matritzengeometrie und des Durchsatzes auf den Pelletierungsvorgang 121

6.3.1 Wirkung des Wassergehaltes auf den Pressvorgang 121

6.3.2 Wirkung der Presskanallänge auf den Pressvorgang 123

6.3.3 Wirkung der Durchsatzmenge auf den Pressvorgang 124

6.3.4 Zusammenfassung der Pelletierungsversuche 125

6.4 Beurteilung der verbrennungstechnischen Qualität der Mischrezeptur 125

6.4.1 Brennstoffeigenschaften *Miscanthus x giganteus* 125

6.4.2 Brennstoffeigenschaften *Paulownia tomentosa* 129

6.4.3 Beurteilung der Brennstoffeigenschaften der Mischpellets 131

6.5 Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets durch eine Beimischung von Kaolin 134

6.6 Praxisversuch der Pelletierung bei Amandus Kahl 137

6.6.1 Vorversuch zur Identifikation geeigneter Maschineneinstellungen 137

6.6.2 Hauptversuch 138

6.7 Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion 142

6.7.1 Kosten als Schlüsselfaktoren der Pelletproduktion 143

6.7.2 Erlös als Schlüsselfaktor der Pelletproduktion 147

6.7.3 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit 149

7 Zusammenfassung 151

7.1 Entwicklung einer standardisierten Mischrezeptur für Miscanthus-Mischpellets 151

7.2 Optimierung der Prozesskette der Pelletherstellung 155

7.3 Fazit 156

8 Veröffentlichungen und Vorträge 157

LITERATURVERZEICHNIS XII

ANHANG XXVI

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
AfA	Absetzung für Abnutzung
BDI	Bundesverband Deutscher Industrie
BImschV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
CH_3-Gruppe	Methoxyl- Gruppe
CKA	Campus Klein-Altendorf
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	Gewinn
GAP	Gemeinsame Agrarpoltik
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Ho	Brennwert
H_2O	Wasser
Hu	Heizwert
HV	Viekers Härte
i	Zinssatz
i*	interne Rendite
K	Gesamtkosten

K_{Bau}	Kosten für Gebäudebau
$K_{Betrieb}$	betriebsgebundene Kosten
$K_{Kap.}$	kapitalgebundene Kosten
$K_{sonst.}$	sonstige Kosten
$K_{Tech.}$	Kosten für gesamte Anlagentechnik
K_{Vorrat}	Kosten für Pelletsvorratshaltung
Ka	Kaolin
KFA	Kleinfeuerungsanlage
KUP	Kurzumtriebsplantage
LEM	Lichterhitzungsmikroskop
$L_{Presskanal}$	Presskanallänge
L_{Kante}	durchschnittliche geometrische Kantenlänge
M	Masse
m	Versuchsmasse
m:	Massedurchsatz
M. x *g.*	*Miscanthus x giganteus*
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
OH-Gruppe	Hydoxl- Gruppe
ÖNORM	Österreichische Norm
P_{Koller}	Kollerdruck
P. t.	*Paulownia tomentosa*
t	Zeit
T_g	Ligninerweichungstemperatur
T_p	Pellettemperatur
TM	Trockenmasse
U	Umdrehungen
VDI	Verband der Deutschen Industrie

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Seite

Abbildung 1: Schaubild des Pelletierungsprozesses von Holz nach ANONYMUS 1, (2011) 5

Abbildung 2: Anteile der verschiedenen Kostenarten der Pelletsproduktion in industriellen Pelletwerken (in %) und Energiebedarf pro produzierter Tonne Pellets nach Angaben von PIRRAGLIA, (2009); DI GIACOMO und TAGLIERI (2009) und THEK und OBERNBERGER (2001). 6

Abbildung 3: Schematische Zeichnungen von Matrizenpressen, links: Ringmatrize und rechts: Flachmatrize (THEK und OBERNBERGER, 2009) 7

Abbildung 4: Aufbau und Wirkungsweise einer Pelletpresse mit Flachmatrize (STERNOWSKY, 2007) 8

Abbildung 5: Schematische Darstellung des Presskanals einer Lochmatrize und deren geometrischer Größe (WENGHOEFER, 2013) 11

Abbildung 6: Skizze von Presskanälen mit unterschiedlichen Presskanallängen, Lochdurchmesser, Schluck und Teilung (WENGHOEFER, 2013) 11

Abbildung 7: Schematischer Aufbau einer Hammermühle (ANONYMUS 2, 2011) 15

Abbildung 8: Trockenzerfaserung 22/600 der FH Köln, links: Aussenansicht rechts: Innenansicht (WENGHOEFER, 2010) 16

Abbildung 9: Skizze der Geometrie von einem Presskanal einer Matrize für die Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts) (WENGHOEFER, 2012) 17

Abbildung 10: Prototyp eines Prallreaktors im Technikum der Firma Schäfer (SCHÄFER, 2011) 18

Abbildung 11: Beispielpellets für die unterschiedlichen Noten der visuelle Pelletqualität (WENGHOEFER, 2012) 28

Abbildung 12: Prüfgerät für Pelletabrieb (nach DIN_EN_ 15210-1) 28

Abbildung 13: Prozessschritte der geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion (WENGHOEFER, 2013) 43

Abbildung 14: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen aus Beständen des gleichen Alters (3, 4 und 5 jährig) und Standortes (CKA), in Abhängigkeit von Erntejahr und Genotyp in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2, Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a - c, A – C und *a - c* ($p \leq 0{,}05$) 50

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 EN 14961-2 A2. Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a – c ($p \leq 0{,}05$) 51

Abbildung 16: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen des gleichen Genotyps in Abhängigkeit von Bestandesalter, Erntejahr und Standort (CKA, Kenn und DKH) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2, Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a – e ($p \leq 0,05$) 52

Abbildung 17: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen in Abhängigkeit von Standort, Bestandesalter, Genotyp und Erntejahr in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2 52

Abbildung 18: Aschegehalte (bezogen auf TM) ausgewählter Biomassearten in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2. Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Biomassearten geprüft mit Tukey Test a – d ($p \leq 0,05$) 53

Abbildung 19: Miscanthus-Paulownia-Mischpellets -Versuchsnummer 9 aus Tab. 7 (WENGHOEFER, 2012) 55

Abbildung 20: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* und Paulownia mit einem Wassergehalten von 14 M.-% bei Zugabe von 0 M.-% und 1 M.-% Traubentrester. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A - B und a - b ($p \leq 0,05$), n=4 56

Abbildung 21: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Miscanthus- Paulownia- Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Normgrenzwert.Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test;($p \leq 0,05$), * = nicht signifikant, n=4 56

Abbildung 22: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung von Miscanthus mit einem Wassergehalt von 9,6 M.-% in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Versuchsjahr 2011) 57

Abbildung 23 : Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens und des Wassergehaltes (Versuchsjahr). Signifikanz des E_{spez} der Varianten 2012 geprüft mit T-Test; * ($p \leq 0,05$), * = nicht signifikant, n=4 58

Abbildung 24: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Hammermühle in Abhängigkeit der Biomasseart und L_{Kante}. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung geprüft mit Tukey Test a - d ($p \leq 0,05$) (Versuchsjahr 2012) 59

Abbildung 25: Abriebfestigkeit und Schüttdichte von Miscanthus- Fichten- Mischpellets, deren Miscanthusanteil mit verschiedenen Lochmatrizendurchmessern in der Kollermühle zerkleinert wurde, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm EN 14961-2 A2. Signifikanz der Abriebfestigkeit und Schüttdichte geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - B ($p \leq 0,05$), n=4 (Versuchsjahr 2011) 61

Abbildung 26: Spezifischer Energiebedarf und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (Versuchsjahr 2012) 62

Abbildung 27: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle 63

Abbildung 28: Spezifischer Energie- bzw. Leistungsbedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes der Zerkleinerung von Paulownia und Miscanthus mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuchsjahr 2012). Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A-B bzw. a-b ($p \leq 0,05$), n=4 64

Abb. 29: Vergleich des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Versuchsjahre 2011 und 2012). Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung und Kollermühle aus dem Versuchsjahr 2012 geprüft mit Tukey-Test; a - b ($p \leq 0,05$), n=4 66

Abbildung 30: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung von Miscanthus- Fichten- Pellets in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren, Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes der Pelletierung in Abhängigkeit des gewählten Zerkleinerungsverfahrens, geprüft mit Tukey Test a – b ($p \leq 0,05$) 67

Abbildung 31: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Fichten-Pellets in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren. Signifikanz Abriebfestigkeitund Schüttdichte geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - B ($p \leq 0,05$), n=4 68

Abbildung 32: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Fichten-Pellets, deren Miscanthus- Partikelgröße einheitlich eingestellt wurde, in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - b und A - C ($p \leq 0,05$), n=4 70

Abbildung 33: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrize und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges eines Biomassegemisches aus *M. x g.* (Kenn) und Paulownia mit Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester in Abhängigkeit des Wassergehaltes.Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und des Leistungsbedarfes,geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - C ($p \leq 0,05$), n=4 72

Abbildung 34: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Paulownia-Pellets, deren Ausgangsgemisch auf einen Wassergehalt von 12, 13, 14, 15% und 16 M.-% eingestellt wurde, in Relation zu dem Normgrenzwert.Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; A - D und a - b ($p \leq 0,05$), n=4 73

Abbildung 35: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrize und Leistungsbedarf, während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* (Kenn) und Paulownia bzw. *M. x g.* und Fichte, mit Wassergehalten von 14 und 15 M.-%. Signifikanz des spezifischen Energie- und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A-B bzw. a-b ($p \leq 0,05$), n=4 74

Abbildung 36: Einfluss der Presskanallänge mit 6 mm Lochmatritzen auf die Durchsatzmenge und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Gemisches aus *M. x g.* (Kenn) und Fichte mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei gleichbleibendem Leistungsbedarf 74

Abbildung 37: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung eines Miscanthus-Fichten-Gemisches mit zwei 6 mm Lochmatrizen, deren Presskanallängen unterschiedlich waren. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes, geprüft mit T-Test; a-b ($p \leq 0{,}05$), * = nicht signifikant, n=4 75

Abbildung 38: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Miscanthus-Fichten-Pellets, die mit zwei 6 mm Lochmatrizen pelletiert wurden, deren Presskanallängen unterschiedlich waren,in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit T-Test; A - B und a - b ($p \leq 0{,}05$), n=4 75

Abbildung 39: 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 des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit Tukey-Test; A - B und a - c ($p \leq 0{,}05$), n=4 76

Abbildung 40: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Paulownia-Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - b und A - C ($p \leq 0{,}05$), n=4 77

Abbildung 41: Vergleich der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Standort, Genotyp und Erntejahr in Relation zu der Pelletnorm EN 14961-2 (A2) 78

Abbildung 42: Ascheerweichungstemperaturen von *Paulownia tomentosa* und *Miscanthus x giganteus* (34 Kenn 8. J.) von Mischpellets aus den beiden Biomassen 80

Abbildung 43: Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia-Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN_{plusA2} Pellets 81

Abbildung 44: Mittelwerte der Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN_{plusA2} Pellets. Signifikanz der Ascheerweichungstemperaturen geprüft mit Tukey-Test; a - c ($p \leq 0{,}05$), n=3 82

Abbildung 45: Spezifischer Energiebedarf und Leistungsbedarf der Pelletierung des Gemisches *M. x g.* (Kenn) und *P. tomentosa* mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin bei verschiedenen Durchsätzen 83

Abbildung 46: Optimierte Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die unter den in Tabelle 12 (Versuchsnummer 4) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden (WENGHOEFER, 2012) 84

Abbildung 47: Miscanthus-Fichten-Mischpellets, die unter den in Tabelle 12 (Versuchsnummer 9) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden (WENGHOEFER, 2012) 84

Abbildung 48: Spezifischer Energiebedarf der Pelletierung und Pellettemperatur der in Tabelle 12 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl 85

Abbildung 49: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der der in Tabelle 12 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - D ($p \leq 0{,}05$), n=4 86

Abbildung 50: Gewinn der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von konstanten Gesamtkosten und variierendem Erlös in Relation zu dem Planszenario 87

Abbildung 51: Interne Rendite der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit des jährlichen Gewinnes 87

Abbildung 52: Anteil der verschiedenen Kostenpositionen an den Gesamtkosten der geplanten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion 88

Abbildung 53: Ermittlung des kritischen Wertes (Gewinnschwelle) des Planszenarios der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von variierenden Rohstoffkosten und einem konstanten Erlös 89

Abbildung 54: Gesamtkosten der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit der elektrischen Energiekosten bei konstantem Erlös 89

Abbildung 55: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion 90

Abbildung 56: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion 91

Abbildung 57: Zerkleineringsprodukte (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.-%)
(WENGHOEFER, 2013) 107

Abbildung 58: 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.-%)
(WENGHOEFER, 2013) 108

Abbildung 59: Zerkleineringsprodukte (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.-%)
(WENGHOEFER, 2013) 111

Abbildung 60: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Paulownia, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Links: Hammermühle und rechts: Kollermühle (WENGHOEFER, 2013) 113

Abbildung 61: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Oben: Hammermühle, unten links: Zerfaserung und unten rechts: Kollermühle (WENGHOEFER, 2013) 117

Abbildung 62: Skizze einer Matrize mit Angabe der Orientierung der Partikel (nach HOLM et al. 2006) 118

Abbildung 63: Korrelation zwischen Aschegehalt und Summe der Gehalte von Schwefel, Stickstoff und Chlor von verschiedenen *Miscanthus x giganteus* Typen 127

Abbildung 64: Verschlackung der Asche während eines ersten Verbrennungsversuches von Miscanthus-Mischpellets (50 M.-% Miscanthus / 50 M.-% Paulownia) durch die FH Köln (Bild: Steinbüchel 2011) 132

Abbildung 65: Miscanthus-Ernteverfahren „Luxemburger Modell“ (Quelle: ANKEN et al. 2012) 144

Abbildung 66: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion bei unterschiedlichen Kostenszenarien 148

Anhang:

Abbildung A 1: Während der Verbrennung von Miscanthus-Mischpellets gemessenen CO-, NOx-, und Staubemmissionen in Relation zu den Grenwerten der 1.BImschV (2. Stufe) (Abschnitt 2 §5) und der Typenprüfung von Feuerungsanlagen für halmgutartige Brennstoffe XXX

TABELLENVERZEICHNIS

Seite

Tabelle 1: Spezifikationen von Holzpellets für nicht industrielle Anwendungen nach DIN_EN 14961-2 3

Tabelle 2: Schüttdichten verschiedener Holzhackschnitzel, Miscanthushäcksel und Norm-Pellets 7

Tabelle 3: Physikalische Größen und deren Einflussfaktoren, welche die Qualität der Pelletierung bestimmen (abgeändert nach STERNOWSKY, 2007) 10

Tabelle 4: Stickstoff-, Schwefel-, Chlor- und Aschegehalt von Sägespäne ohne Rinde, Fichten- und Buchenholz und Rinde von Nadelhölzern verglichen mit den Grenzwerten der EN 14961-2 A1 und A2 20

Tabelle 5: Versuchsabfolge des Teilprojektes 1 des Verbundprojektes "C4 Kompakt" und Zuordnung der Untersuchungsparameter zu den einzelnen Versuchen 23

Tabelle 6: Herkunft, Standort, Pflanzjahr und Erntejahre der untersuchten *Miscanthus x giganteus*- Typen 25

Tabelle 7: Versuchsparameter der ersten Pelletierungsversuche zur Überprüfung der Pelletierfähigkeit der verschiedenen Biomassearten 26

Tabelle 8: Auswahl der Rohstoffe und Zerkleinerungsverfahren für die Erfassung des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung 31

Tabelle 9: Auswahl der Lochmatrizen, die während der ersten Versuchsreihe mit der Kollermühle (Typ 33/390) genutzt wurden 33

Tabelle 10: Versuchsparameter und Maschineneinstellungen des Versuchs zur Energiebedarfsermittlung des Prallreaktors 35

Tabelle 11: Zusammensetzung und Feuchtegehalt der Biomassegemische (Varianten), die im Praxisversuch pelletiert wurden 41

Tabelle 12: Darstellung der Varianten des Vorversuches der im Rahmen des Pelletierungs-Praxisversuches bei der Firma Amandus Kahl durchgeführt wurden 42

Tabelle 13: 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) 45

Tabelle 14: Ergebnisse der Prüfung zur Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassen in Rein- und Mischform 54

Tabelle 15: Aschegehalte der Additive Melasse, Traubentrester und Stärke 55

Tabelle 16: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Kollermühle in Abhängigkeit des Lochdurchmessers und des Presskanalverhältnisses der eingesetzten Matrize (Versuchsjahr 2011) 60

Tabelle 17: Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Prallreaktor in Abhängigkeit der Maschineneinstellungen 65

Tabelle 18: Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus (Kenn) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahren. Signifikanz Partikelgrößenverteilung der jeweiligen Variante geprüft mit Tukey-Test; a - d ($p \leq 0{,}05$), n=4 69

Tabelle 19: Aschegehalt und Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Typ, Erntejahr und Standort 78

Tabelle 20: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT von *Paulownia tomentosa* in Abhängigkeit des Untersuchungslabors im Vergleich zu *Miscanthus x giganteus* (Kenn) 79

Tabelle 21: 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.-% im Vergleich zu der Pelletnorm EN 14961-2 A2 80

Tabelle 22: Visuellen Qualität und Temperatur der Pellets (T_P) aus den beiden Gemischen von *M. x g.* und Paulownia bzw. *M. x g.* (Kenn) und Fichte mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin die während des Vorversuches produziert wurden, in Abhängigkeit von Durchsatz bzw. Presskanalverhältnis 83

Tabelle 23: Vergleich von Schwankungsbreiten der Einflussfaktoren, des Aschegehaltes von *Miscanthus x giganteus* der eigenen Untersuchungen mit Literaturwerten 97

Tabelle 24: Vergleich der Literaturwerte für den Aschegehalt von *Paulownia tomentosa mit* den eigenen Analysewerten 98

Tabelle 25: Vergleich der ermittelten N-, S- und Cl-Gehalt von Paulownia mit Literaturangaben, in Relation zu den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2(A2) 130

Tabelle 26: 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) 133

Anhang:

Tabelle A 1: DIN 14961-6: Spezifikation von Pellets aus halmgutartiger Biomasse, Biomasse von Früchten sowie definierten und undefinierten Mischungen XXVI

Tabelle A 2: Detailierte Maschineneinstellungen währen der ersten Zerkleinerungs-versuchsreihe mit der Kollermühle, vorgenommen durch die Firma Amandus Kahl XXVII

Tabelle A 3: Versuchsvarianten der Teilversuche des zweiten Zerkleinerungsversuches mittels Kollermühle aus dem Jahr 2012 XXVII

Tabelle A 4: Maschineneinstellungen des Prallreaktors währende der 1. Versuchsreihe XXVIII

Tabelle A 5: Einstellungen der Pelletpresse unter welchen die Pellets während des Praxisversuches bei Amandus Kahl pelletiert wurden XXVIII

Tabelle A 6: Anforderungen an EN_{plus}-Pellets nach EN_{plus}-Zertifizierung (Quelle: ANONYMUS 1, 2011) XXIX

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Berechnung der Durchsatzmasse 29

Formel 2: Berechnung des spezifischen Energiebedarfes 30

Formel 3: Berechnung der Kapitalbindungskosten, die durch die Vorratshaltung der Pellets entstehen (abgeändert nach MUMM, 2008) 47

Formel 4: Berechnung der internen Rendite (nach SCHNEEBERGER und PEYERL, 2011) 48

1. Einleitung und Problemstellung

Mitte der 1990er Jahre wurde begonnen in größerem Maß Abfälle der Sägeindustrie zu Holzpellets zu veredeln. Seit dem Jahr 2000 ist der Bestand an Pelletheizungen in Deutschland von 3.000 auf 280.000 (2012) gestiegen (ANONYMUS 1, 2013). Somit gelang es innerhalb von 20 Jahren aus einem Abfallprodukt einen hochwertigen handelsfähigen Brennstoff zu erzeugen, der auf dem Brennstoffmarkt fest etabliert werden konnte.

65% dieser Pelletheizungen haben eine Nennwärmeleistung von unter 50 kWh und sind somit als Kleinfeuerungsanlagen (KFA) einzustufen.

Zwischen den Jahren 2007 bis 2012 stieg die Nachfrage nach Qualitäts-Holzpellets (EN_{plus}-Pellets) von 0,6 Mio. Tonnen um mehr als 300% auf 1,7 Mio. Tonnen pro Jahr (ANONYMUS 1, 2013). Aufgrund dieser wachsenden Nachfrage nach Holzpellets und der gleichzeitig wachsenden Nachfrage von Holz ist es von besonderem Interesse, für die Zukunft potentielle Substitute für Holz in der Pelletproduktion zu finden.

In Deutschland konnte in den letzten 10 Jahren der Anbau von Miscanthus als schnell nachwachsender Rohstoff (NawaRo) fest etabliert werden. Derzeit werden in Deutschland ca. 3.500 ha Miscanthus angebaut (PUDE, 2012), wobei der größte Teil dieses Rohstoffes thermoenergetisch verwertet wird. Aufgrund der hohen Ertragsleistung von Miscanthus, bei gleichzeitig minimalem Einsatz von Produktionsmitteln wie z. B. Düngung und Pflanzenschutz, bietet es sich an, Miscanthus als Substitut für Holz in der Pelletherstellung zu untersuchen.

Wegen der Brennstoffeigenschaften von Miscanthus, wie z.B. dem relativ hohen Aschegehalt oder der niedrigen Ascheerweichungstemperatur (KALTSCHMITT et al. 2009), kann bei der Produktion von Qualitätspellets Miscanthus Holz nicht zu 100% substituieren. Sofern Qualitätspellets für den Markt von Kleinfeuerungsanlagen produziert werden sollen, kann Miscanthus nur in Form von Mischpellets kompaktiert werden. Diese neuen Pellets könnten eine Möglichkeit darstellen, um die Produktpalette an Qualitätspellets zu erweitern.

Im Jahr 2011 wurde die neue Pelletnorm **EN 14961-2** für den europäischen Pelletmarkt eingeführt. Diese Norm ist im Raum der Europäischen Union eine unverbindliche Vorgabe, die Qualitätsanforderungen an Pellets für verschiedene Feuerungsanlagen festlegt. Zuvor hatten nur wenige EU Länder eigene nationale Normen, wie z.B. der **DIN 51 731** oder der **ÖNORM M 7135**. Desweiteren wurde 2012 die **EN 14961-6** eingeführt, welche die Anforderungen für Mischbrennstoffe regelt. Allerdings kann noch nicht bestimmt werden, welche Produkte aus dieser Norm hervorgehen und in welchem Umfang diese Norm in nationalen Verordnungen integriert wird.

Das Problematische an den Europäischen Brennstoffnormen und im speziellen an der EN 14961-2 ist, dass diese Normen keinen rechtlich bindenden Charakter haben. Auch wenn diese Norm nur eine Vorgabe ist, so richten sich dennoch die Produzenten von

Qualitätspellets (EN_{plus}) für KFA`s nach dieser Norm. Dies spiegelt sich besonders in dem Zertifizierungssystem En_{plus} für Holpellets wieder. Im Jahr 2012 wurden in der EU bereits 2,2 Mio. Tonnen nach Maßgaben der dieser neuen EN-Norm produziert wurden (ANONYMUS 1, 2013).

Rechtlich bindend ist in Deutschland hingegen nur die DIN Norm 51 731, da die 1. Bundesimissionsschutzverordnung (1. BImSchV.) vorschreibt, dass nur Holzpelletts - konform zu der DIN 51 731 - in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden dürfen. Im Gegensatz zu den bisher geltenden nationalen Normen sieht die neue Europäische Pelletnorm drei verschiedene Qualitätsstufen vor (siehe Tab. 1).

Neben der B Norm für Großfeuerungsanlagen wurden zwei Qualitätsstufen für Kleinfeuerungsanlagen impliziert. Darunter ist die EN A2 Norm, die es ermöglicht „qualitativ schlechtere“ Rohstoffe, wie Rindenholz mit höheren Aschegehalten der Pelletproduktion zu zuführen. Diese Norm sieht jedoch neben Additiven aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten, die nur zu maximal 2 M.-% der gesamten Pelletmasse zugefügt werden dürfen, lediglich chemisch unbehandeltes Holz als Rohstoff vor.

Daraus ergibt sich, dass Miscanthus, der bisher nicht in Form von Mischpellets in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden darf, nicht als Normbrennstoff zugelassen ist. Wenn es aber gelingen würde Miscanthus-Mischpellets zu entwickeln, die den chemischen und physikalischen Anforderungen der Pelletnorm EN 14961-2 entsprechen, müsste der Rohstoff Miscanthus in dieser Norm aufgenommen werden.

Tabelle 1: Spezifikationen von Holzpellets für nicht industrielle Anwendungen nach DIN_EN 14961-2

	Eigenschaftsklasse/ Bestimmungsverfahren	Einheit	A1	A2	B
Normativ	Herkunft und Quelle		1.1.3 Stammholz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.1.6 Rinde 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzrückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz 1.2 Industrie-Restholz 1.3 Gebrauchtholz
	Durchmesser D[a] und Länge L[b], EN XXX Siehe Bild 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
	Wassergehalt, M, EN 14774-1, EN 14774 2	im Anlieferungs-zustand, m-% Bezugsbasis Feuchtmasse	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Aschegehalt, A, EN 14775	m-% wasserfrei	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mechanische Festigkeit, DU, EN 15210-1	im Anlieferungs-zustand, m-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Feingut am Werkstor beim Transport von Schüttgut (zum Zeitpunkt der Verladung) und in kleinen (bis zu 20 kg) und großen Säcken (zum Zeitpunkt des Abpackens oder bei der Lieferung an den Endverbraucher), F, FprEN 15149-1	m-% im Anlieferungs-zustand	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Additive[c]	m-% wasserfrei	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben	≤ 2 m-% Art und Menge sind anzugeben
	Heizwert, Q, EN 14918	im Anlieferungs-zustand, MJ/kg oder kWh/kg	Q16.5, 16,5 ≤ Q ≤ 19 oder Q4.6, 4,6 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.3, 16,3 ≤ Q ≤ 19 oder Q4.5, 4,5 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.0, 16,0 ≤ Q ≤ 19 oder Q4.4, 4,4 ≤ Q ≤ 5,3
	Schüttdichte, BD, EN 15103	kg/m^3	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Stickstoff, N, FprEN 15104	m-% wasserfrei	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Schwefel , S, FprEN 15289	m-% wasserfrei	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
	Chlor, Cl, FprEN 15289	m-% wasserfrei	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsen, As, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chrom, Cr, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Kupfer, Cu, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Blei, Pb, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Quecksilber, Hg, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, Ni, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zink, Zn, FprEN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 100	≤ 100	≤ 100
	Informativ: Asche-Schmelzverhalten[d], prEN 15370	°C	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden

a Anzugebende ausgewählte Größe der Pellets.

b Die Menge von Pellets, die länger als 40 mm sind, kann 1 % (Massenanteil) betragen. Die maximale Länge muss < 45 mm sein.

c Art (z. B. Stärke, Maismehl, Kartoffelmehl, pflanzliches Öl).

d Sämtliche charakteristischen Temperaturen (Temperatur am Beginn der Schrumpfung (SST), Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT)) in oxidierten Zuständen sollten angegeben werden.

2. Zielsetzung

2.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Gesamtziel des Vorhabens “C4-Kompakt“ war es ein Qualitätspellet zu entwickeln, welches einen Miscanthusanteil von mindestens 50 M.-% aufweist und dessen physikalische und chemische Eigenschaften der Norm EN 14961-2(A2) entspricht. Zudem sollte die Zerkleinerungstechnik als ein Prozessschritt der Produktion der Miscanthus-Mischpellets optimiert werden, damit die Mischpellets ökonomisch konkurrenzfähig zu den handelsüblichen Holzpellets werden können.

2.2. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Entwicklung einer optimalen Mischrezeptur

- Selektion optimaler Mischungspartner für die Pelletproduktion (*Miscanthus x giganteus*- Typen und Gehölzarten- Auswahl)
- Identifikation geeigneter Additive als Presshilfsstoffe (z.B. Melasse, Stärke, Traubentrester)
- Entwicklung standardisierter Mischungsrezepturen die der EN 14961-2 A2 entsprechen

Optimierung der Prozesskette der Pelletherstellung

- Auswahl eines optimierten Zerkleinerungsverfahrens:
    - mit geringstem Leistungsbedarf
    - mit optimalen Pelletierungsergebnissen
- Wirtschaftlichkeitsanalyse der gesamten Prozesskette der Miscanthus-Mischpelletproduktion

3. Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Grundlagen des Pelletproduktion

Wie schon in Kapitel 1 aufgezeigt wurde, ist seit dem Jahr 2000 die Nachfrage nach Pellets angestiegen. Dementsprechend wurde parallel zu dieser Entwicklung die Produktion von Holzpellets deutlich erhöht. So wurden im Jahr 2012 2,2 Mio. Tonnen Holzpellets produziert (ANONYMUS 1 2013). Entgegen dieser kontinuierlichen voranschreitenden Entwicklung des Pelletheizungs- und des Holzpelletmarktes fand aus produktionstechnischer Sicht kaum eine Weiterentwicklung statt.

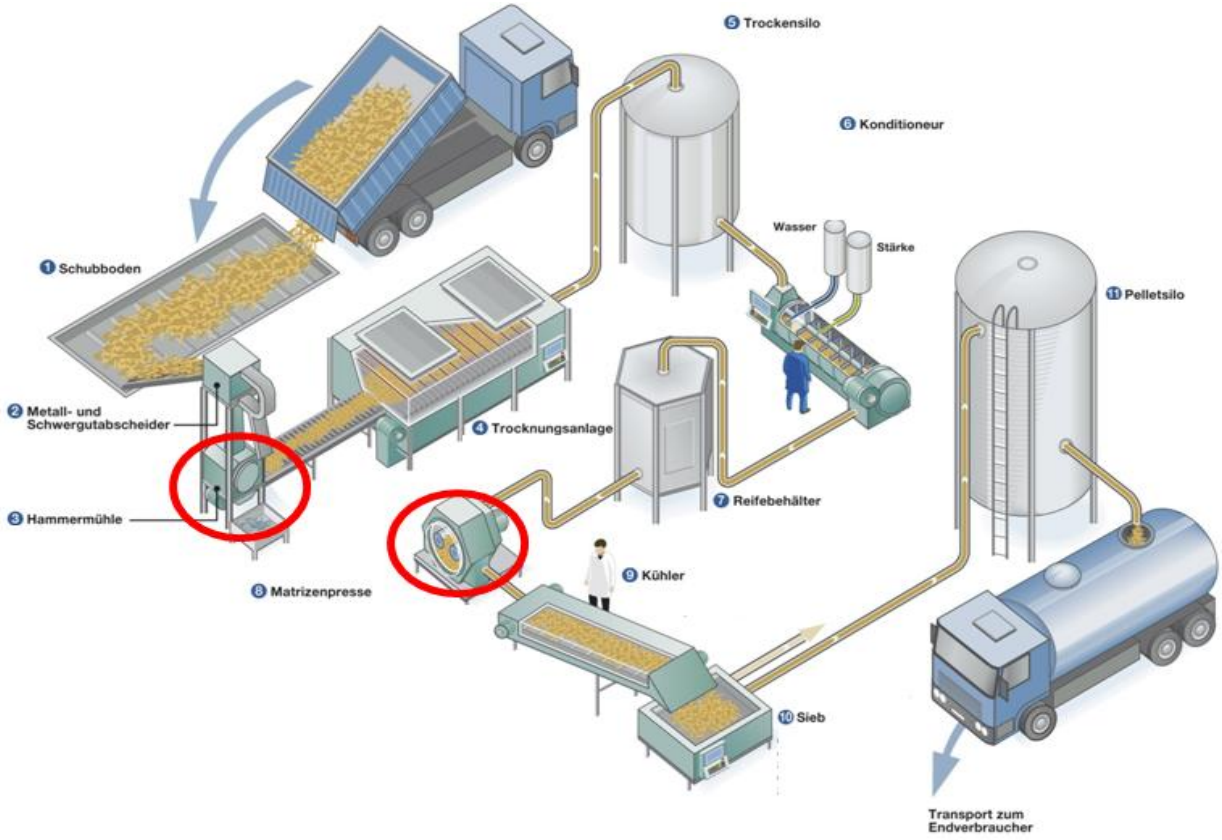

Abbildung 1: Schaubild des Pelletierungsprozesses von Holz nach ANONYMUS 1, (2011)

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. Im Rahmen des C4- Kompakt Projektes soll daher die Optimierung der Zerkleinerungstechnik näher untersucht werden.

Folgend 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 (s. Abb. 2), reduzieren.

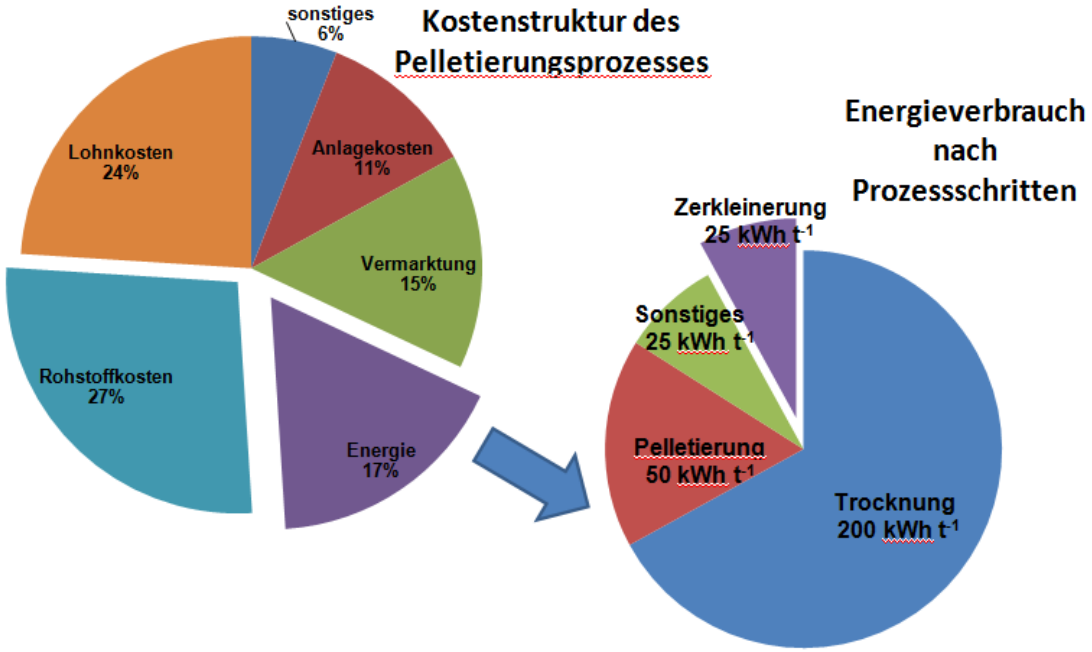

Abbildung 2: Anteile der verschiedenen Kostenarten der Pelletsproduktion in industriellen Pelletwerken (in %) und Energiebedarf pro produzierter Tonne Pellets nach Angaben von PIRRAGLIA, (2009); DI GIACOMO und TAGLIERI (2009) und THEK und OBERNBERGER (2001).

Aus Abbildung 2 wird zudem ersichtlich, dass der Hauptteil des Energiebedarfes in der Trocknung liegt. Verwendet man Miscanthus entfällt dieser Teil, da Miscanthus schon feldtrocken geerntet wird.

Gelingt es nun noch 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.

3.2 Grundlagen der Pelletierung

Der zentrale Prozessschritt, des in Abb. 1 skizzierten Pelletierungsprozesses, ist die Pelletierung, bei dem 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 Holzhackschnitzel, Miscanthushäcksel und Norm-Pellets

Biomasse	**Schüttdichte [t m^{-3}]**	**Quelle**
Fichtenhackschnitzel	0,2	HOFMANN 2010
Buchenhackschnitzel	0,3	HOFMANN 2010
Pappelhackschnitzel	0,2	HOFMANN 2010
Miscanthushäcksel	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 aber ein breites Wissen von der Prozesstechnik und den biotechnologischen Eigenschaften des Rohmaterials notwendig. In dem folgenden Kapitel werden die dazu notwendigen Grundlagen der Pelletierung näher erläutert.

3.2.1 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 Kollergangpelletpressen, in welche Ringmatrizen oder Flachmatrizen (s. Abb. 3) eingesetzt sind (HOLM et al., 2011).

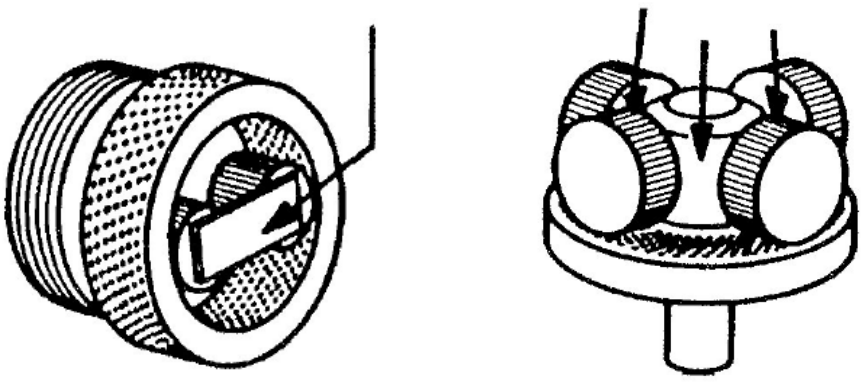

Abbildung 3: Schematische Zeichnungen von Matrizenpressen, links: Ringmatrize und rechts: Flachmatrize (THEK und OBERNBERGER, 2009)

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 bei der Flachmatrizenpresse die Matrize 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.

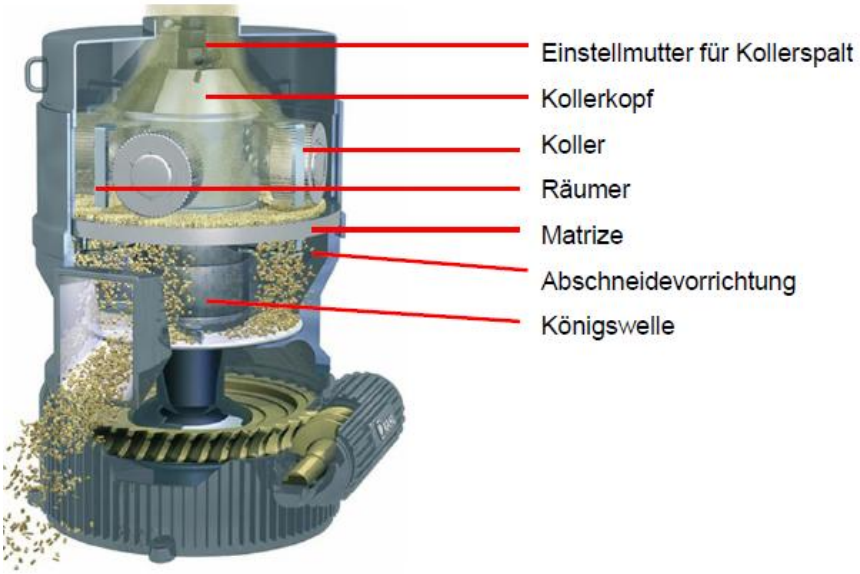

Abbildung 4: Aufbau und Wirkungsweise einer Pelletpresse mit Flachmatrize (STERNOWSKY, 2007)

3.2.2 Wirkungsweise und physikalische Grundprinzipien des Pelletierungsvorgangs

Alle Arten der Pelletierung weisen eine einheitliche Wirkungsweise auf. Bei der Pelletierung werden Partikel mittels Koller durch eine Zwangsöffnung (Matrizenloch) durchgedrückt. 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 Durchsatzleistung, 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 Hydraulikpressdruck des Kollers, 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 der gewünschten Durchsatzleistung 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 und 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 Faktoren sind die Materialstruktur, Materialzusammensetzung bzw. -feuchte, Partikelgröße,- oberflächenstruktur und Partikelform. Die dritte Wirkbeziehung zwischen Material und Presskanal wird neben dem Material durch die Matrizengeometrie beeinflusst.

Die Matrizengeometrie kann hinsichtlich Durchmesser, Presskanallänge, Schluck und Teilung differenziert werden (siehe Abb. 5). Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Qualitätskriterien des Pelletierungsvorganges und den physikalischen Größen sowie den Faktoren, die diese Größen beeinflussen, sind in folgender Tabelle zusammen gefasst.

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

Qualitätskriterien der Pelletierung			
Durchsatzleistung	**spezifischer Energiebedarf**		**physikalische Pelletqualität**
physik. Größen	Axialdruck	Antriebsleistung	Reibungskoeffizient	Matrizenrestfläche
Einfluss-faktoren	**Maschinenbauliche Parameter**	**Matrizengeometrie**	**Material**
	- Hydraulikpressdruck - Elektromotor - Kollerspalt - Kolleranzahl - Kolleroberfläche - Kollergeschwindigkeit	- Lochdurchmesser - Presskanallänge - Lochfläche - Schluck - Teilung	- Materialzusammensetzung - Materialfeuchte - Materialstruktur - Partikelgröße - Partikelform - Partikeloberflächenstruktur

3.2.2.1 Einfluss der Matrizengeometrie auf den Pelletierungsvorgang

Bei der Pelletierung wird die Art der Matrize (Matrizengeometrie) auf die Biomasse abgestimmt. Generell müssen Pellets die in KFA`s verbrannt werden sollen einen Lochdurchmesser von 6 mm 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 6 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).

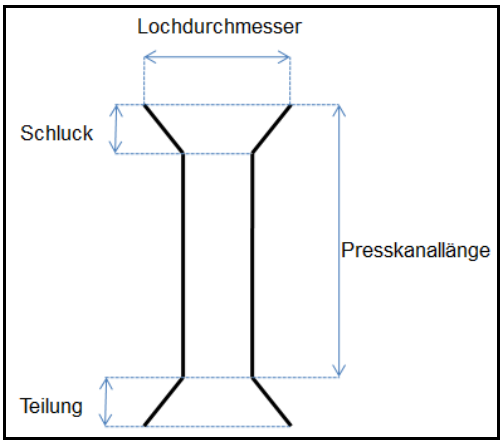

Abbildung 5: Schematische Darstellung des Presskanals einer Lochmatrize und deren geometrischer Größe (WENGHOEFER, 2013)

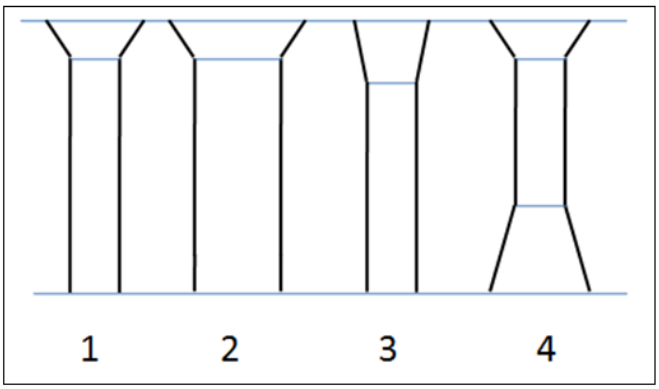

Abbildung 6: Skizze von Presskanälen mit unterschiedlichen Presskanallängen, Lochdurchmesser, Schluck und Teilung (WENGHOEFER, 2013)

Aus dem Vergleich der Varianten 1 und 4 in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass eine mittels einer verlängerten Teilung (Variante 4) die Presskanallänge reduziert werden kann. Desweiteren 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 der Durchsatzleistung.

In Bezug auf die Teilung stellte 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).

3.2.2.2 Einfluss des Materials auf den Pelletierungsvorgangs

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; STELTE et al., 2011a; STERNOWSKY, 2007). 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 Hydoxyl-Gruppen (OH-Gruppen) zu Methoxl- Gruppen (CH_3- Gruppen) des Lignins und des Gehaltes von freien Polyphenolen abhängig. Nach dieser Theorie führt ein höherer Anteil bzw. Gehalt dieser OH- Gruppen bzw. Polyphenole zu einer Erhöhung der T_g in der Biomasse. Ein höherer Anteil von CH_3-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 NIELSEN et al. (2009) und PLACET et al. (2008). Dagegen stehen die Untersuchungen von HORVARTH et al. (2011) im Wiederspruch zu dieser Theorie, da diese feststellten, dass erhöhte Anteile an CH_3-Gruppen zu keiner Verringerung der T_g führten. Weiterhin stellen diese fest, dass der Einfluss der Ligninstruktur auf das Ligninerweichungsverhalten ungeklärt ist. Sie fassten 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 die Durchsatzleistung 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. (2006a); 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 H_20- Moleküle führen dazu, dass Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Ligninmolekülen aufgebrochen werden können, sodass der obige beschriebene Verklebungsprozess ablaufen kann.

Neben dem nominalen Wassergehalt der Biomasse, der nach DIN_EN 14774 bestimmt wird ist die Art der Wasserbindung mit entscheidend. So differenzieren KALIYAN und MOREY, 2009 beispielsweise in inner- und außerpartikuläres Wasser.

Materialstruktur, 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 deren Zellstruktur. In Bezug auf diese Unterschiede, die unterschiedliche Materialelastizitäten hervorrufen, ist die interzelluläre Porosität und die Zellform, -anordung und -größe von besonderem Interesse. Allerdings erfolgten bisher noch keine nähergehenden Untersuchungen zu den Auswirkungen dieser Eigenschaften auf den Pelletierungsprozess.

Ebenso wie die bisher beschriebenen Einflussfaktoren bestimmt die Partikelgröße, -oberflächenstruktur und -form die Qualität des Pelletierungsprozesses. Diese drei Faktoren bestimmen zum einen die Packdichte während des Pressvorgangs und zum anderen beeinflusst vor allem die Größe und Oberflächenstruktur die Größe der Bindungsfläche pro Volumen (KALIYAN und MOREY, 2009). Je höher 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).

3.3 Grundlagen 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 ESTEBAN und CARRASCO (2006) und HOLTZAPPLE et al. (1988) als energetisch intensiv einzustufen.

HOLZAPPLE et al. (1988) wiesen 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 zeigten, 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 bestätigten ESTEBAN und CARRASCO (2006) indirekt, indem sie schrieben, dass in Bezug auf die Feinzerkleinerung von Lignocellulose ein Forschungsdefizit besteht. Aus diesem Grund sollten im Projekt “C4-Kompakt“ neue Alternativen zur Zerkleinerung von Biomassen für den Pelletierungsprozess untersucht werden.

Nach damaligem Projektstand sind nachfolgende Maschinen besonders interessante Zerkleinerungsalternativen zu der üblichen Hammermühlentechnik:

- Trockenzerfaserung (FH Köln)
- Kollermühle (Firma Amandus Kahl, Reinbek)
- Prallreaktor (Firma Schäfer, Rüssingen)

Da diese Zerkleinerungsverfahren Neuentwicklungen sind gab es bis auf die Herstellerangaben, die bei allen Verfahren deutlich minimierte Energie-aufwandmengen versprachen, noch keine wissenschaftlichen Daten. Diese erlaubten es nicht Rückschlüsse auf deren tatsächlichen Energiebedarf zu ziehen.

Zudem bezogen sich die Herstellerangaben auf holzartige Biomassen und waren somit nicht analog auf andere Biomassen übertragbar. Diese Zerkleinerungsverfahren wiesen unterschiedliche Wirkprinzipien auf, welche nicht einheitlich auf andere unterschiedliche Biomassearten wirken. ESTEBAN UND CARASSCO, (2006) zeigten eingehend, wie unterschiedliche Biomassen auf ein Zerkleinerungsverfahren wirken können.

Daraus resultierte, dass es notwendig war, diese neuen Zerkleinerungsverfahren auf deren Leistungsbedarf zu untersuchen, wobei darauf zu achten war, dass eine gute Pelletierfähigkeit (z.B. Materialdurchsatz, Leistungsbedarf oder Einhaltung geforderter physikalischer Eigenschaften der Pellets) der zerkleinerten Biomasse (Zerkleinerungsprodukt) erreicht wurde.

3.3.1 Die Hammermühle

Die Hammermühle ist ein Verfahren welches, mit einer schlagenden Wirkung Partikel zerkleinert und im Vergleich zu anderen Verfahren universell für viele Arten von Biomassen einsetzbar ist (SCHOLTEN und MCELLHINEY, 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 Tonne Biomasse aus Lignocellulose variiert nach Literaturangaben zwischen 20 und 150 kWh t^{-1} (PERRY und GREEN, 1999; CADOCHE und LÓPEZ (1989); 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 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.

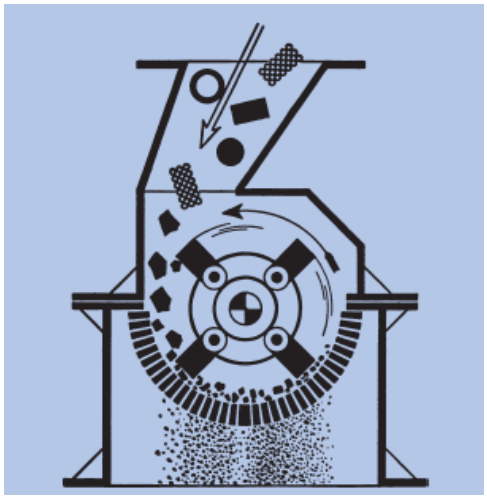

Abbildung 7: Schematischer Aufbau einer Hammermühle (ANONYMUS 2, 2011)

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.

3.3.2 Die Trockenzerfaserung

Die Trockenzerfaserung ist eine Vorrichtung zur Zerfaserung von stängel-, halm-, oder blattartigen nachwachsenden Rohstoffen, wobei nur zwei Prototypen dieser Maschine existieren (GAESE, 2010). Diese Maschine welche sowohl durch einen Elektromotor, als auch 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 entlang geführt werden (siehe Abb. 7 und 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 (WENGHOEFER, 2010)

Nachdem das Material zwischen den Sägeblättern zerrissen wurde, wird das Zerkleinerungsprodukt durch die Siebe, die eine quadratische Flächen von 25 mm^2 aufweisen, bewegt. 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 zu 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.

3.3.3 Die 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 Abb. 5 (siehe Kapitel 3.2) dargestellte Flachmatrizenpresse. Die Matrize der Kollermühle unterscheidet sich zu den Matrizen von Pelletpressen durch die Länge der Presskanäle. Abb. 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.

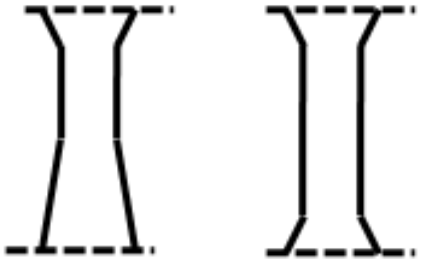

Abbildung 9: Skizze der Geometrie von einem Presskanal einer Matrize für die Kollermühle (links) und der Pelletpresse (rechts) (WENGHOEFER, 2012)

Die Kollermühle zerkleinert mit einem reibenden, scherenden und zugleich schneidenden Mechanismus die Biomasse. Ein bzw. – je nach Maschinentyp - 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 der Art, Struktur und Wassergehalt der Biomasse, der Zufuhrmenge, der Kollerdrehzahl und dem Kollerdruck (P_{Koller}) (VON REICHENBACH, 2011).

3.3.4 Der Prallreaktor

Im Jahr 2000 meldete die Firma Schäfer Elektrotechnik- Sondermaschinenbau eine Vorrichtung zur Verarbeitung von Bauteilen aus Mischstoffen an (ANONYMUS, 2000).
Ursprünglich wurde diese Vorrichtung, die auch Prallreaktor (siehe Abb. 10) genannt wird, zur Separierung verschiedenster Wertstoffe aus Mischstoffen, wie z.B. Elektroschrott oder Spanplatten entwickelt. In den letzen Jahren kamen laut SCHÄFER (2011) aus dem Bereich der biomasseverarbeitenden Industrie diverse Produktanfragen. 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 mit am Umfang angebrachten Prallelementen und einem, in der Höhe stufenlos verstellbaren, Rotor ausgestattet ist. Der Mantel, auf dem innenseitig die Prallelemente angebracht sind, ist zwischen den Prallelementen 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 Prallelemente geschleudert. Bei dem Aufprall gegen die Elemente 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.
Neben dem Prallreaktor existieren viele weitere Zerkleinerungsmaschinen die mit einer prallzerkleinernden Wirkung Material zerkleinern (KARINKANTA et al. 2013).

3.3.5 Stand der Technik (Zusammenfassung) des Prozessschrittes der Zerkleinerung für den Pelletierungsprozess

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.

3.4 Grundlagen der Rohstoffwahl für den Pelletierungsprozess

Ebenso wie in dem 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 aus 100% Sägerestholz hergestellt. 2009 wurden dagegen neben 70% Sägerestholz bereits 30% Industrieholz als Pelletrohstoff eingesetzt (ANONYMUS 1, 2013). Die Tatsache, dass trotz stark ansteigender Rohstoffpreise für Holz (ANONYMUS 4, 2013) die neue EN Norm für Holzpellets in Kleinfeuerungsanlagen nur chemisch unbehandeltes Holz vorsieht zeigt, dass es der Forschung bisher noch nicht gelungen ist geeignete Holzsubstitute für die Pelletproduktion zu identifizieren. Diese Tendenz bestätigt auch HASLINGER et al. (2009), indem er beschreibt, dass vermehrt Holzhackgut als Rohstoff eingesetzt wird.

Derzeit forschen verschiedene Institutionen, wie beispielsweise das Deutsche Biomasse Forschungszentrum (WIRKNER, 2010) in Leipzig oder die Universität Siegen daran Mischpellets zu produzieren, die das Pelletsortiment erweitern könnten und ebenfalls Miscanthus als wichtige Rohstoffkomponente enthalten. Ein weiteres Projekt, welches die Produktion von Mischpellets – unter anderem mit Miscanthus - untersucht heißt „mixBioPells". Im Rahmen dieses Verbundprojektes wird unter anderem versucht ein marktfähiges Pellet aus Traubentrester zu produzieren, welchem z. B. Rebschnitt oder auch Miscanthus beigemischt werden kann (LANG, 2012). Diese Forschungsprojekte orientieren sich an den Qualitätsanforderungen der geplanten Mischbrennstoffnorm EN-14961-6. Bisher ist es diesen Projekten nicht gelungen holzartige Biomassepflanzen zu identifizieren, die aus verbrennungs-technischer Sicht den Anforderungen der Quallitätspelletnormen (14961-2 A1 und A2) entsprechen und gleichzeitig höchste Biomasseleistungen erzielen.

3.4.1 Klassische Rohstoffe der Produktion von Qualitätspellets

In fast allen mitteleuropäischen Pelletwerken, die Qallitätspellets nach der EN 14961-2 A1 produzieren, wird als primärer Rohstoff Sägerestholz eingesetzt (LENZ, 2012). Diese Biomasse stammt meist aus Sägewerken oder der Holzwerkstoffindustrie (KALTSCHMITT ET AL, 2009). Das Sägerestholz hat meist einen Wassergehalt von 35 bis 45 M.-% und zeichnet sich besonders durch geringe Asche-, Schwefel-, Chlor- und Stickstoffgehalte aus (siehe Tabelle 4). Zudem besitzt die Biomasse aus diesen Hölzern einen Ascheschmelzpunkt von über 1.300°C bis 1.400°C (FNR, 2000). Neben diesem Hauptrohstoff wird aufgrund von Angebotsdefiziten mehr und mehr Industrieholz, sprich Stammholz minderer Qualität, durch die Pelletindustrie verarbeitet (FNR, 2000). Dieses Stammholz ist nach EN 14961-2 A1 der einzig weitere Hauptbestandteil, der in der Pelletproduktion eingesetzt werden darf.

Tabelle 4: Stickstoff-, Schwefel-, Chlor- und Aschegehalt von Sägespäne ohne Rinde, Fichten- und Buchenholz und Rinde von Nadelhölzern verglichen mit den Grenzwerten der EN 14961-2 A1 und A2

	N- Gehalt	**S- Gehalt**	**Cl-Gehalt**	**Aschegehalt**
Rohstoff	[M.-% der TM]			
Sägespäne ohne Rinde [1]	0,1	0,004	0,002	0,3
Fichtenholz mit Rinde [2]	0,13	0,015	0,005	0,6
Buchenholz mit Rinde [2]	0,22	0,015	0,006	0,5
Rinde von Nadelhölzern [2]	0,48	0,085	0,019	3,8
Pellets (EN 14961-2 A1)	0,3	0,03	0,02	0,7
Pellets (EN 14961-2 A2)	0,5	0,03	0,02	1,5
Quellen: [1] HASLINGER et al. (2009); [2] FNR (2000)				

3.4.2 Alternative Rohstoffquellen für die Pelletproduktion

Neben den klassischen Rohstoffen bieten alternative Biomassen neue Bezugsquellen für die Pelletindustrie. Durch die neue Europäische Pelletnorm wurde es möglich, dass z.B. auch Waldrestholz und Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) zu Qualitätspellets weiter verarbeitet werden darf. Diese holzartige Biomasse zeichnet sich in besonderem Maße durch erhöhte Gehalte von Stickstoff, Schwefel, Chlor und Asche aus (HOFMANN, 2010). Aus Tabelle 1 geht hervor, dass die Pellets der Qualitätsstufe A2 deutlich höhere Schwefel- und Aschegehalte aufweisen dürfen als die der A1.

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

Neben den Quallitätspelletnormen A1 und A2 gibt es die Industriepelletnorm EN 14961-2 B und die Norm für Mischpellets (EN 14961-6). Die Brennstoffe sind jedoch nach dieser Normen nicht für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen (KFA), sprich in Anlagen unter 100 kW, vorgesehen. Nach der Industriepelletnorm B darf für die Pelletproduktion holzartige Biomasse mit einem Aschegehalt von bis zu 3 M.-% TM eingesetzt werden (EN 14961-2 B). Dagegen darf für die Produktion von Mischpellets fast jedes landwirtschaftliche Produkt eingesetzt werden, wobei diese Norm diverse Grenzwertklassen vorsieht (EN 14961-6). Einige dieser landwirtschaftlichen Produkte sind Stroh, Heu aus der Landschaftspflege, Traubentrester, Rapspresskuchen und Miscanthus (HIENDLMEIER, 2010; LANG, 2012).

3.5 Grundlagen der ökonomischen Bewertung des Pelletierungsprozesses

Um eine Unternehmung ökonomisch bewerten zu können ist eine Kosten-Leistungsrechnung notwendig. Diese ist eine betriebsbezogene Rechnung, die durch Abzug der Kosten von den Leistungen den Erfolg (Gewinn) der Unternehmung beschreibt (ROLLWAGE, 1999). Nach SCHMOLKE und DEITERMAN (2004) und 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 Verbandes der Deutschen Industrie (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 um eine Vollkostenberechnung. Dabei analysierten diese, auf Grundlage von Istkosten der österreichischen Pelletproduktion, die Gesamtkosten. Allerdings stellt diese Analyse keine vollständige Vollkostenberechnung dar, da die Autoren nicht alle Kosten der Pelletproduktion erfasst haben. Unter anderem wurden die Kosten der Kapitalbindung, welche durch die Einlagerung der Pellets für mehrere Monate entstehen, nicht berücksichtigt. Dennoch kann diese Berechnungsmethode als eine Richtschnur für weitere Untersuchungen genutzt werden.

Neben der Kosten-Leistungsrechnung stellt die interne Zinsfusmethode eine weitere Möglichkeit dar, um ein Investitionsvorhaben zu bewerten (BRANDES und ODENING,1992). Durch diese Methode, die laut ANONYMUS 3 (2013) von 68% (in deren Befragung) 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 in wie fern Änderungen von Schlüsselfaktoren (Kosten und Erlöse) den Gewinn beeinflussen können.

Bei der Methode des kritischen Wertes werden für die Schlüsselfaktoren einer Investition sogenannte kritische Werte Für bestimmte 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).

4. Material und Methoden

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen umfassten ein umfangreiches Themengebiet. Um den Ablauf der verschiedenen Versuche für die Entwicklung einer Mischpelletproduktion zu veranschaulichen, fasst die folgende Tabelle die Vorgehensweise vorliegender Arbeit zusammen.

Tabelle 5: Versuchsabfolge des Teilprojektes 1 des Verbundprojektes "C4 Kompakt" und Zuordnung der Untersuchungsparameter zu den einzelnen Versuchen

Versuche	**Untersuchungs-parameter**
1. Vorversuche zur Mischrezeptur	- Aschegehalt
- Selektion geeigneter *Miscanthus x giganteus*- Typen und Mischungspartner	- physik. Pelletqualität
	- Aschegehalt
- Bestimmung geeigneter Additive als Presshilfsstoffe	- spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität
2. Zerkleinerungsversuche	
- Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor	- spez. Energiebedarf
- Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von Paulownia mittels Hammermühle und Kollermühle	- spez. Energiebedarf
- Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens Kollermühle	- spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität - Durchsatzleistung
- Pelletierungseigenschaften von M. x g. in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens	- spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität
- Pelletierungsversuche zum Einfluss der Korngrößenverteilung	- physik. Pelletqualität
3. Versuche zum Einfluss von Wassergehalt, Matrizenkanallänge und Presshilfsstoffe auf die Pelletierung	- spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität
4. Analyse der Brennstoffeigenschaften der Mischungspartner	
- *Miscanthus x giganteus* - *Paulownia tomentosa* - Mischpellets	- N-, S- u. Cl-Gehalt - Brennwert - DT
5. Analyse der Wirkung von Kaolin auf die DT der Mischpellets	- DT
6. Praxisversuch Pelletierung bei Amandus Kahl	
- Vorversuch zur Ermittlung optimierter Maschineneinstellungen	- spez. Energiebedarf - Durchsatzleistung - physik. Pelletqualität
- Hauptversuch (Produktion von Mischpellets)	- spez. Energiebedarf - physik. Pelletqualität
7. Wirtschaftlichkeitsanalyse der Miscanthus-Mischpelletproduktion	- Gewinn - interner Zinsfuß

4.1 Vorversuche zur Mischrezeptur

Im Rahmen der Vorversuche sollte evaluiert werden welche Biomassearten neben *Miscanthus x giganteus* als Mischkomponenten für die Produktion von Qualitäts-pellets geeignet sind. Diese Evaluation erfolgte anhand von chemischen Analysewerten und der Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassen.

Des Weiteren wurde untersucht, welche Stoffe (z. B. Stärke, Traubentrester oder Brandkalk) als Additive die chemische und physikalische Qualität der Mischpellets verbessern. Vorab ist jedoch zu bemerken, dass bisher aus wissenschaftlicher Sicht keinerlei einheitliche Vorgehensweise für die Entwicklung von Mischpellets existierte, die als Richtlinie für ein solches Vorgehen angesehen werden konnte. Es lagen lediglich europäische Normen (EN) vor, die genau beschreiben, wie bestimmte Parameter (wie beispielsweise Aschegehalt, Ascheschmelzpunkt oder Abrieb), die es einzuhalten gilt, zu untersuchen sind.

4.1.1. Selektion der Biomassen als Mischkomponenten

Die Selektion der Mischkomponenten erfolgte primär anhand des Aschegehaltes. In einem zweiten Schritt wurden desweiteren die verschiedenen Biomassen auf deren Pelletierbarkeit hin überprüft. Die nächsten beiden Kapitel beschreiben wie und von welchen Biomassen der Aschegehalt untersucht wurde.

4.1.1.1 Auswahl von geeigneten Miscanthus- Typen

In einem ersten Schritt wurden verschiedene *Miscanthus x giganteus*- Typen auf deren Eignung für die Versuchsproduktion von Mischpellets überprüft.

Als Eignungsparameter wurden dafür der Aschegehalt, die Materialform und die Verfügbarkeit festgelegt. Die Aschegehaltsbestimmung erfolgte in mindestens vierfacher Wiederholung nach der DIN_EN 14775 in einem Muffelofen der Firma Nabertherm.

Neben verschiedenen Biomassearten, die Miscanthus beigemischt werden sollen, verfügt der Campus Klein-Altendorf über zwei Versuchsfelder, auf welchen 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 Bestandes betrug ca. 0,3 ha.

In einem ersten Schritt wurden von diesen verschiedenen Typen die Biomassen der Ernten 2010, 2011 und 2012 auf deren Aschegehalt hin untersucht.

Zusätzlich wurde Miscanthus des Typs 34 von zwei weiteren Feldern, die bei Trier gelegen waren, 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 Bestandesalter. Die Bestände waren drei und acht Jahre alt. Desweiteren wurden im April 2012 von einem Bestand, der auf dem Dikopshof (DKH) nahe Wesseling lag, der Aschegehalt analysiert. Diese Parzelle war 19 Jahre (34 DKH 19 J.) alt. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Unterschiede der untersuchten *M. x g.*- Typen zusammen.

Tabelle 6: 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				

4.1.1.2 Vorauswahl geeigneter Mischungspartner

Die Auswahl der Brennstoffe, die *Miscanthus x giganteus* beigemischt wurden, erfolgte in zwei Stufen.

In der ersten Stufe wurden nach Literaturangaben und eigenen Untersuchungen verschiedene „low input"-Energiepflanzenarten ausgewählt, welche möglichst hohe Biomasseproduktionspotentiale aufweisen und auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden können. „Low input" Energiepflanzen sind Pflanzen, die ein deutlich geringeres Input-Outputverhältnis als die herkömmlichen Energiepflanzen Mais und Raps (1 : 2) aufweisen. So haben z. B. Hackschnitzel von Kurzumtriebsplantagen ein Input- Outputverhältnis von 1 : 11 (PUDE, 2007).

In dem zweiten Auswahlschritt wurden von diesen vorausgewählten Biomassen die Aschegehalte bestimmt. Diese Auswahl erfolgte nach der Höhe der Aschegehalte der unterschiedlichen Energiepflanzenarten. Dabei wurden lediglich die Arten berücksichtigt, die Aschegehalte von unter 1,5 M.-% (bezogen auf TM) aufwiesen. Zusätzlich zu der Biomasse von „low input"-Energiepflanzen wurde als alternativer Mischungspartner für die Miscanthusmischpellets Fichtenholz (Fi) untersucht. Dieses Fichtenholz stammten aus der Eifel und wurde in Form von Hackschnitzel mit Rinde angeliefert.

Die ausgewählten Biomassearten, wurden im Weiteren zusammen mit Miscanthus als Gemisch auf deren Pelletierfähigkeit hin untersucht werden.

4.1.2 Überprüfung der Pelletierbarkeit der Brennstoffe

Die in Kapitel 4.1.1 vorausgewählten Biomassearten, wurden an der FH Köln auf deren Pelletierbarkeit überprüft.

Um die verschiedenen Stoffe pelletieren zu können, wurden diese mittels einer Hammermühle (12 kW) der Firma Buschhoff auf eine Partikelgröße von 5 mm zerkleinert. Anschließend erfolgte die Pelletierung an der Pelletpresse der FH Köln vom Typ 14-175 der Firma Kahl (3,3 kW). Die Matrize die in diesen Pelletierungsversuchen verwendet wurde, hatte einen Lochdurchmesser von 6 mm und eine Presskanallänge von 27 mm. Die Biomassearten wurden sowohl teilweise als Reinstoffe, als auch in Mischungen pelletiert. Folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Varianten der ersten Pelletierungsversuchsreihe auf.

Tabelle 7: Versuchsparameter der ersten Pelletierungsversuche zur Überprüfung der Pelletierfähigkeit der verschiedenen Biomassearten

Versuchs-nr.	**Mischkomponente**		**Zugabe H_2O**	**Matrizen-temperatur**	**Drehzahl Koller**
	Anteil [M.-%]	**Biomasse**	**[g min^{-1}]**	**[°C]**	**[U min^{-1}]**
1	100	Miscanthus	45	50	85-90
2	50 50	Miscanthus Paulownia	45	80 – 90	90
3	100	Paulownia	45	95 – 100	90
4	100	Pappel	45	70	90
5	100	Weide	45	70	90
6	100	Paulownia	45	85	90
7	50 50	Pappel Miscanthus	45	85	110
8	50 50	Miscanthus Paulownia	45	90	110
9	50 50	Miscanthus Paulownia	35	100	110
10	25 25 25 25	Pappel Weide Paulownia Miscanthus	45	70	110
11	25 25 25 25	Pappel Weide Paulownia Miscanthus	35	85	110
12	50 50	Miscanthus Reynoutria	45	85	110

Die Evaluierung der Pelletierfähigkeit der unterschiedlichen Biomassearten erfolgte nach folgenden Kriterien:

- direkte Ansprache der visuellen Qualität der frisch erzeugten Pellets [Note 1 – 6]
- Schüttdichte [kg m^{-3}]
- Abrieb [M.-%]

Die direkte Ansprache der visuellen 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 optimale Wasserzugabemenge zu ermitteln.
Diese visuelle Ansprache 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). Desweiteren 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.
Die Zielgröße der Pelletierungsversuche war es, dass während des Pelletierungs-prozessschrittes möglichst wenig Feinanteil anfallen sollte und dass die Pellets einheitlich lang in zylindrischer Form aus der Anlage kommen sollten. Die Bewertung der Pelletierfähigkeit nach diesen Kriterien wurde in Noten von 1 - 6 dokumentiert, wobei 1 die beste Note darstellt. Die folgende Abbildung zeigt Beispielpellets für alle sechs verschiedenen Qualitätsnoten. Die Pellets der Note 6 wiesen lediglich anpelletierte und noch aufgequollene Partikel auf. Pellets mit der Note 5 waren ebenfalls noch leicht aufgequollen und besaßen noch sehr große Risse zwischen den einzelnen Partikeln. Bei den Pellets der Note 4 und 3 war noch eine Krümmung erkennbar. Zudem besaßen diese ebenfalls noch Risse in den Pellets. Wobei diese Merkmale bei Pellets der Note 3 geringer wurden. Bei beiden Pellets war bereits ein leichter Oberflächenglanz zu erkennen, der bei Qualitätssteigerung zunahm. Zuletzt waren Pellets der Note 2 und 1 durch mangelnde Risse und Krümmungen gekennzeichnet, wobei die Note 1 dann vergeben wurde, wenn ein sehr starker durchgängiger Oberflächenglanz erkennbar war und die Pellets in einheitlichen Längen aus der Presse austraten.

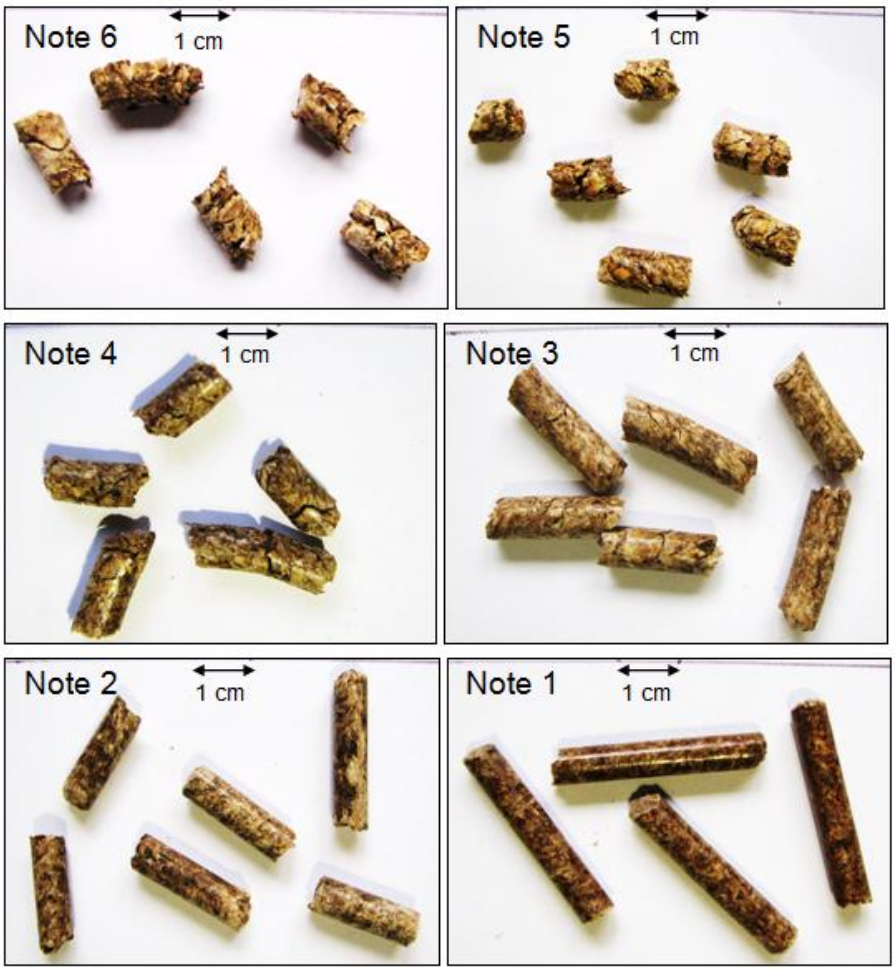

Abbildung 11: Beispielpellets für die unterschiedlichen Noten der visuelle Pelletqualität (WENGHOEFER, 2012)

Nach dem Abkühlen der Pellets wurde im dem Labor der FH Köln die physikalische Qualität untersucht. Die Bestimmung der Schüttdichte der Pellets, deren Einheit kg m^{-3} ist, erfolgte in mehrfacher Wiederholung nach der DIN_EN_15103. Der Abrieb wurde ebenfalls in mehrfacher Wiederholung nach der DIN_EN 15210-1 mit dem in Abb. 12 dargestellten Prüfgerät untersucht und in M.-% angegeben.

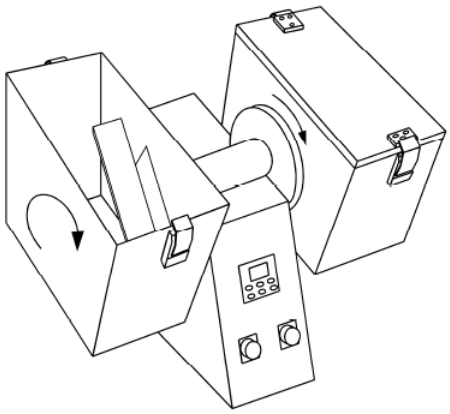

Abbildung 12: Prüfgerät für Pelletabrieb (nach DIN_EN_ 15210-1)

4.1.3 Bestimmung geeigneter Additive als Presshilfsstoffe

Die Wahl geeigneter Additive erfolgte analog der Methode zur Selektion geeigneter Biomassearten.

Zu Anfangs wurden aufgrund von Literaturrecherchen verschiedene Stoffe ausgewählt. Ein wichtiges Kriterium für die Identifikation von geeigneten Additiven war die Herkunft dieser Stoffe. Schwerpunktmäßig sollten primär Stoffe eingesetzt werden, die in der Landwirtschaft als Nebenprodukte anfallen und möglichst kostengünstig zu beziehen sind.

Des Weiteren wurden die Aschegehalte der potentiellen Additive untersucht. Dieser Untersuchung folgte ein Pelletierungsversuch mit unterschiedlichen Traubentresterstufen, um dessen Wirkung auf den Prozessschritt der Pelletierung zu überprüfen.

Der Traubentrester, welcher aus der Riesling- Ernte (2010) des Staatsweingutes Bad Kreuznach stammte, bestand aus getrockneten Traubenschalen und Traubenkernen, die mittels Retsch-Mühle auf kleiner als ein Millimeter zerkleinert wurden. Für diesen Versuch wurde einem Gemisch aus Miscanthus und Paulownia (50 M.-% / 50 M.-%) mit einem Wassergehalt von 14 M.-% Feuchte, 0 M.-% und 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. Die Durchsatzmasse wurden durch Abdrehen bestimmt. Dabei wurde bei der jeweiligen Einstellungen der Förderschneckendrehzahl der Matrialdurchsatz pro Zeit gewogen. Die Berechnung erfolgte nach Formel 1.

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

Dabei gilt:

m: =Durchsatzmasse [kg h^{-1}]
m = Versuchsmasse[kg]
t = Zeit [h]

Formel 1: Berechnung der Durchsatzmasse

Die Analyseparameter während des Versuches waren der Leistungsbedarf und der spezifische Energiebedarf.

Um diese beiden Größen zu messen, wurde ein Fluke Datenlogger an den Stromkreis der Pelletpresse angeschlossen mit einem Notebook verbunden, sodass der Leistungs- und Energiebedarf direkt in digitaler Form abgelesen werden konnte.

Die beiden verschiedenen Varianten wurden in vierfacher Wiederholung pelletiert. Abschließend nach jeder Wiederholung wurde der Leistungs- und Energiebedarf pro Versuchsmenge in kWh von dem Notebook aus den Messschrieben ermittelt und übertragen. Aus den Ergebnissen der vier Wiederholungen wurde anschließend der Mittelwert gebildet, welcher wiederum nach Formel 2 auf den spezifischen Energiebedarf (E_{spez}) für die Pelletierung von 1 Tonne Rohmaterial in kWh t^{-1} umgerechnet wurde.

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

Dabei gilt:

E_{spez} =spezifischer Energiebedarf [kWh t^{-1}]
E_m = Energiebedarf pro Versuchsmasse[kWh]
m = Versuchsmasse [kg]

Formel 2: Berechnung des spezifischen Energiebedarfes

Im Anschluss an den Versuch wurden die Abriebfestigkeit und die Schüttdichte der Pelletvarianten untersucht.

4.2 Zerkleinerungsversuche

Anhand von ausgesuchten produktionstechnischen und ökonomischen Merkmalen wurden die Zerkleinerungssysteme Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor auf deren Eignung überprüft.

Als wichtigstes ökonomisches Merkmal wurden der verbrauchsgebundene Energiebedarf der verschiedenen Verfahren festgelegt, welcher in kWh t^{-1} angegeben wurde und durch eigene Energiebedarfsmessungen ermittelt werden konnte.

Für die Messungen wurde einheitliches Erntegut verwendet. Dieses Erntegut war *Miscanthus x giganteus* (*M. x g.* Kenn 8 j.) aus einem achtjährigem Bestand, der sich bei Kenn (Moseltal) befindet und 2011 geerntet wurde. Das Erntegut war vergleichsweise homogen gehäckselter Miscanthus, welcher nach der Beerntung mittels Feldhäcksler nicht weiter bearbeitet 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.

Zusätzlich zu Miscanthus wurde mittels Hammer- und Kollermühle der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Fichten- und Paulowniaholz ermittelt. Diese Untersuchungen erfolgten, um den Einfluss der Rohstoffwahl auf die Energiekosten der Pelletproduktion zu ermitteln.

Die Fichtenhackschnitzel stammten von einem Forstunternehmen aus der Eifel, deren durchschnittliche Partikelgröße war G50 bis G100 und der Feuchtegehalt betrug 11,4 M.-%. Die Sägespäne stammten aus einem Sägewerk aus der Voreifel und der Feuchtegehalt wurde im Trockenschrank auf 11,6 M.-% eingestellt. Die Paulowniahackschnitzel, die eine L_{Kante} von 18 mm hatten, wurden aus der Kurzumtriebsplantage in Klein-Altendorf geerntet und auf 9,2 M.-% Feuchte getrocknet. Für die weiteren Versuche wurden die Fichtenhackschnitzel und ein Teil der Paulowniahackschnitzel mit einem Gartenhäcksler auf eine L_{Kante} von 14 mm weiter zerkleinert.
Tabelle 8 zeigt von welchem Rohstoff und mit welchen Verfahren der spezifische Energiebedarf des Prozessschrittes Zerkleinerung ermittelt wurde.

Tabelle 8: Auswahl der Rohstoffe und Zerkleinerungsverfahren für die Erfassung des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung

Zerkleinerungs-verfahren	**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
Prallreaktor	Miscanthus	Häcksel	8	12,6

Neben dem ökonomischen Vergleich wurden die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren auf deren weiterführende produktionstechnische Eignung hin untersucht. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stand die physikalische Pelletqualität, der mittels unterschiedlicher Verfahren zerkleinerten pelletierten Biomasse. Für die dafür notwendigen Pelletierungsversuche wurde das aus den Zerkleinerungsversuchen stammende Miscanthus-Material genutzt.

4.2.1 Energiebedarfsermittlung der verschiedenen Zerkleinerungssystemen für die Bewertung der Energiebetriebskosten

Aufgrund unterschiedlicher Maschinengrößen und finanzieller 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 Datenloggers, der an einem Notebook angeschlossen war.

4.2.1.1 Energiebedarfsermittlung Hammermühle

Die Energiebedarfsermittlung des Zerkleinerungsverfahrens per Hammermühle wurde an einer - oft in der Tierfutterherstellung genutzten - 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 4.1.3 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 8 ersichtlich der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Paulownia und Fichte untersucht. Die Versuche wurden mit Ausnahme der Fichtenspäne mit mindestens vier Wiederholungen durchgeführt, wobei die Versuchsmassen je nach Biomasseart und -größe variierten.

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

Beide Maschinen sind Prototypen, welche von der Fachhochschule Köln entwickelt wurden. 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 22 kW Nennleistung und der Trommelraum besaß einen Innendurchmesser 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 4.2.1.1. Die Ergebnisse der Energiebedarfsmengen wurden ebenfalls in den spezifischen Energiebedarf umgerechnet, sodass diese mit den anderen Zerkleinerungsverfahren vergleichbar wurden. Zur weiteren Kontrolle wurde der Versuch 2012 an der Zerfaserung vom Typ 22/600 in vierfacher Wiederholung erneut durchgeführt.

4.2.1.3 Energiebedarfsermittlung Kollermühle

Energiebedarfsermittlung des Prozessschrittes der Zerkleinerung

Um das Verfahren zur Biomassezerkleinerung der Kollermühle, welches von der Firma Amandus Kahl entwickelt wurde, zu untersuchen wurden in dem Technikum von Amandus Kahl 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 Pelletpresse, die für die Zerkleinerungsversuche modifiziert wurde, keine digitale Messtechnik angeschlossen werden konnte, sollte durch diese Versuche die optimale Maschineneinstellung identifiziert werden. Im Gegensatz zu den vorherig dargestellten Systemen besitzt die Kollermühle weitreichende Veränderungsmöglichkeiten, die durch verschiedenste Maschineneinstellungen beeinflusst werden können.

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

Tabelle 9: Auswahl der Lochmatrizen, die während der ersten Versuchsreihe mit der Kollermühle (Typ 33/390) genutzt wurden

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

Im Verlauf der Versuchsreihe wurden, wie in Tabelle 9 dargestellt, Lochmaritzen unterschiedlicher Lochdurchmesser (D_{Loch}) und Presskanalverhältnisse verwendet, um zu überprüfen welche dieser Matrizen das beste Zerkleinerungsverhalten auf weißt. Die eingesetzten Lochmaritzen 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 bereits angesprochen 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 der Massendurchsatzleistung pro Zeit konnte nach Formel 2 der Energiebedarf für die verschiedenen Versuchsvarianten ermittelt werden.

Pelletierungseigenschaften der Miscanthus- Fichten Gemische in Abhängigkeit des gewählten Lochdurchmessers der Matrize

Um nach der Energiebedarfsmessung des Zerkleinerungsprozesses mittels Kollermühle nähere Aussagen zu der 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 mm, 8 mm und 10 mm Lochdurchmesser. Mit Ausnahme der zerkleinerten Miscanthus-Biomasse der Variante 10 mm (1:2) wurden die Zerkleinerungsprodukte aus den Versuchen mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 gewählt.
Der Pelletierungsversuch erfolgte wie alle in dem Kapitel 4.2 folgenden Pelletierungsversuche 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 gewonnen 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 konnte der Fluke Datenlogger an die Pelletpresse angeschlossen werden, sodass der spezifische Energiebedarf digital erfasst werden konnte (siehe Kap. 4.1.3). Bei allen Teilversuchen wurden die in Tabelle A 2 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 A3 im Anhang zeigt die verschiedenen Versuchsvarianten der Teilversuche.

4.2.1.4 Energiebedarfsermittlung Prallreaktor

Die Energiebedarfsermittlung an dem 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 immer wieder Veränderungen an der Maschine durchgeführt. Detailierte Versuchsparameter und Maschineneinstellungen sind der Tabelle 10 zu entnehmen. Die einzelnen Versuche wurden ohne Wiederholungen durchgeführt. Lediglich die Versuchsvariante Nr. 2 erfolgte, mit jeweils 50 kg, in vierfacher Wiederholung.

Tabelle 10: Versuchsparameter und Maschineneinstellungen des Versuchs zur Energiebedarfsermittlung des Prallreaktors

Versuchs-nummer	**Versuchs-masse** [kg]	**Sieb**		**Prallfläche**	**Drehzahl**
		D_{Loch} [mm]	Fläche [cm²]	[cm²]	[U min^{-1}]
1	87	5	400	192	3000
2	200	5 und 6	800	192	3000
3	12	5 und 6	800	384	3000
4	90	5 und 6	800	384	1800

Um den spezifischen Energiebedarf zu ermitteln wurde, wie schon in Kapitel 4.1.3 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.

4.2.2 Analyse der Pelletierungseigenschaften des durch verschiedene Verfahren zerkleinerten Miscanthus-Erntegutes

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.

4.2.2.1 Analyse der Korngrößenverteilung des auf unterschiedliche Art zerkleinerten Miscanthus-Erntegutes

Vorab der Pelletierungsversuche, die Aufschluss über die produktionstechnische Eignung der verschiedenen Zerkleinerungsverfahren geben sollten, wurde nach den Zerkleinerungsversuchen für jedes Verfahren getrennt, eine Siebkennlinie von dem pelletierfähigen Miscanthus-Material erstellt. Diese Siebkennlinien, welche die Korngrößenverteilung der zerkleinerten Biomasse beschreiben, wurden für eine spätere Ergebnisdiskussion bereitgestellt.
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 zerkleinerten Materials eingefügt. Die maximale Amplitude des Rüttelsiebes war auf einen Millimeter eingestellt. Als Siebdurchmesser wurden 8, 5, 2 und 1 mm gewählt.

4.2.2.2 Energiebedarfsermittlung der Pelletierung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahren für Miscanthus

Um den Energiebedarf, in Abhängigkeit des gewählten Zerkleinerungsverfahrens, für den Pelletierungsvorgang zu messen, wurden definierte Massen von Miscanthus mit Fichte gemischt.
Das Fichtenholz, welches einen Wassergehalt von 12 M.-% aufwies, wurden bei allen Varianten die Miscanthushäcksel mittels der Hammermühle zerkleinert.

Zusätzlich zu den Hauptkomponenten wurde 1% Traubentrester beigemischt und das Gemisch auf 15 M.-% Feuchte eingestellt.
Danach wurden jeweils vier kg bei einer Matrizentemperatur von 110°C und einer Kollerdrehzahl von 110 U min^{-1} pelletiert. Die Presskanallänge der Matrize betrug 27 mm.
Im Anschluss an die Versuche zur Energiebedarfsermittlung wurden die Pelletvarianten, auf deren Abriebfestigkeit und Schüttdichte hin untersucht.

4.2.2.3 Pelletierungsversuche zum Einfluss der aus dem Zerkleinerungsverfahren resultierenden Korngrößenverteilung von Miscanthus auf die Pelletqualität

Um zu untersuchen, welchen Einfluss die Korngrößenfraktion des Zerkleinerungsproduktes auf die Qualität der Mischpellets hat, wurden in einer Versuchsreihe analog zu Kapitel 4.2.2.2 Miscanthus- und Fichtengemische 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 obligatorisch auf deren physikalischen Eigenschaften hin analysiert.

4.3 Versuche zur Wirkung von Wassergehalt, Matrizenpresskanallängen und Anteil von Presshilfsstoffen auf den Pelletierungsvorgang

Eines der Gesamtziele des Vorhabens war es die Prozesskette der Pelletierung zu optimieren. In diesem Zusammenhang erfolgten - neben der Optimierung des Prozessschrittes der Zerkleinerung - Untersuchungen zur Optimierung des Prozessschrittes des Pelletierens. Schwerpunkte dieser Untersuchungen waren die Wirkung der Konditionierung (Feuchtegehalt und Presshilfsstoffe) und der Pelletpresseneinstellungen auf die Pelletierungseigenschaften von den Biomassegemischen.
Als Untersuchungsparameter dieser Pelletierungsversuche wurden, wie schon in den vorherigen Versuchen, der spezifische Energiebedarf und die physikalische
Pelletqualität festgelegt. Die folgenden Versuche wurden mit der Pelletpresse der FH Köln, die eine maximale Nennantriebsleistung von 3,3 kW hat, durchgeführt.

4.3.1 Pelletierungsversuch zur Identifikation des optimalen Wassergehaltes

Für die Identifikation des optimalen Wassergehaltes eines Biomassegemisches für die Pelletierung wurde das zerkleinerte Biomassegemisch auf fünf verschiedene Feuchtegehalte eingestellt. Die verschiedenen Varianten, die einheitlich aus 50 M.-% Miscanthus „Kenn“ 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. Die Pelletierung aller Varianten erfolgte unter gleichen Bedingungen mit einer 6 mm Lochmatrize mit einem Presskanal von 32 mm. Dabei wurde die Kollerdrehzahl auf 110 U min^{-1} und der Durchsatz auf 26,7 kg h^{-1} eingestellt. Während des Pelletierens der fünf Varianten, das in vierfacher Wiederholung erfolgte, wurde mittels Fluke Datenlogger die Leistung und der Energiebedarf erfasst. Aus dem Energiebedarf konnte nach Formel 2 der spezifische Energiebedarf ermittelt werden. Desweiteren wurde die Matrizentemperatur von der digitalen Anzeige abgelesen. Ebenso wurde die Schüttdichte und die Abriebfestigkeit der Pellets bestimmt.

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 kg h^{-1} und bei der Variante mit 15 M.-% H_2O 30,2 kg h^{-1}. Die Untersuchungsparameter waren die gleichen wie bei dem Gemisch aus *M. x g*. und *P. tomentosa*.

4.3.2 Versuch zum Einfluss der Matrizenpresskanallänge auf den Prozessschritt der Pelletierung

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. Wie in allen Pelletierungsversuchen wurden zwei verschiedene Matrizen mit einem Lochdurchmesser von 6 mm eingesetzt und die Kollerdrehzahl auf 110 U min^{-1} eingestellt. Dabei unterschieden sich die beiden Matrizen lediglich in der Presskanallänge. Die eine Matrize hatte eine Presskanallänge von 27 mm und die andere 32 mm. Somit war betrug das Presskanalverhältnis 1 : 4,5 bzw. 1: 5,3.

Während der Versuche war der Fluke Datenlogger an den Stromkreis der Pelletpresse angeschlossen, um den Leistungsbedarf und Energiebedarf der Pelletproduktion zu erfassen. Mit Hilfe dieser Messungen konnte nach Formel 2 der spezifische Energiebedarf jeder Variante erfasst werden. Die Messungen jeder Variante, welche in vierfacher Wiederholung durchgeführt wurden, erfolgten über einen Zeitraum von mindestens fünf Minuten.

Im Anschluss an die Pelletierungsversuche wurden die Schüttdichte und die Abriebfestigkeit der beiden Varianten analysiert.

4.3.3 Versuch zum Einfluss der Durchsatzmasse auf den Prozessschritt der Pelletierung

Der folgende Versuch sollte den Einfluss der Durchsatzmasse, die durch den Antriebsmotor der Pelletpresse limitiert wird, auf die Pelletierung untersuchen. Für diesen Versuch wurde das gleiche Biomassegemisch wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben verwendet. Desweiteren wurden 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 kg h^{-1} erhöht. Die Analyseparameter entsprachen dem vorherigen Versuch.

4.4 Untersuchung der Brennstoffeigenschaften der ausgewählten Biomassen

Zur weiteren Eignungsprüfung als Mischungspartner für die Miscanthus-Mischpelletproduktion wurden sechs verschiedene Biomassen ausgewählt.

Neben *Paulownia tomentosa* wurden die *Miscanthus x giganteus*- Typen 17 aus dem Erntejahr 2010 und 2011, die Typ 34 (CKA) und die Typ 34 von dem 8 Jährigen Bestand aus Kenn untersucht. Zusätzlich wurden Mischpellets aus 50 M.-% Paulownia tomentosa, 50 M.-% Miscanthus (Kenn 8 J.) und 1 M.-% Zuschlag Traubentrester analysiert. Die Miscanthus-Typ 17 und 34 (CKA) und *Paulownia tomentosa* stammten aus Beständen, die auf dem gleichen Standort angebaut wurden. Darüber hinaus wurden mit Ausnahme von Misc. 17 (2010) alle anderen Biomassen im Frühjahr 2011 geerntet.

Von allen Biomassen wurden die Aschegehalte (nach DIN EN 14775) in sechsfacher und die Brennwertewerte (nach DIN EN 14918) in vierfacher Wiederholung in dem Labor des Campus Klein-Altendorf bestimmt.

Zusätzlich zu diesen beiden Brennstoffqualitätsparametern erfolgten in zwei weiteren Laboren Biomasseanalysen. In Labor I (Thyssen Krupp AG) wurde von allen fünf Biomassen der Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt und Brennwert in zweifacher Wiederholung bestimmt.

Die Analysen erfolgten nach den DIN Normen DIN 51719 (Asche), DIN 51724 (Stickstoff und Schwefel), DIN 51727 (Chlor) und DIN 51900 (Brennwert).
In Labor II (RWE Power AG) wurde von Paulownia der Asche-, Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt untersucht. Die Untersuchungen erfolgten nach der DIN EN 14775 (Aschegehalt), der DIN CEN/TS 15104-N (Stickstoffgehalt) und der DIN EN/TS 15289 (Chlor- und Schwefelgehalt).
Zusätzlich wurden mittels Lichterhitzungsmikroskop (LEM) die Ascheerweichungs-temperaturen (DT), von *Paulownia tomentosa* dem Miscanthus aus Kenn und den Mischpellets aus diesen beiden Biomassen (s.o.) nach DIN EN 15370-1 in Labor II bestimmt. Dabei erfolgte die Bestimmung der Ascheerweichungstemperatur nach den beiden in der DIN-Norm beschriebenen Methoden (Formfaktor und optische Bestimmung) in jeweils zweifacher Wiederholung.

4.5 Versuch zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets durch Beimischung von 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 LEM, das Kaolin in 4 verschiedenen Gehalten (0,25, 0,5, 0,75 und 1 M.- %) dem Gemisch aus 50 M.-% Miscanthus aus Kenn, 50 M.-% Paulownia aus Klein-Altendorf und einem Zusatz von 1 M.-% Traubentrester zugefügt. Die Beimischung des Kaolins erfolgte auf drei verschiedene Arten. Als erste Variante wurde Kaolin dem Biomassegemisch mittels wässriger Suspension zugegeben und im Anschluss wurde dieses pelletiert. Zur weiteren Untersuchung wurden die Pellets wieder auf < 1 mm zerkleinert und bei 550°C verascht (Pelletsgemisch). 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 4.5 die Ascheerweichungstemperatur der Gemische bestimmt.

4.6 Pelletierungs- Praxisversuch

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 11). 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 eine hohe Durchsatzleistung bei möglichst geringem spezifischen Energiebedarf festgelegt. Desweiteren sollte durch diesen Versuch von diesen vier Biomassegemischen ausreichende Mengen an Pellets für weitere Verbrennungsversuche produziert werden.

Tabelle 11: Zusammensetzung und Feuchtegehalt der Biomassegemische (Varianten), die im Praxisversuch pelletiert wurden

	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 3**	**Variante 4**
Mischrezeptur	50 M.- % *M. x g.*	50 M.- % *M. x g.*	50 M.- % *M. x g.*	50 M.- % *M. x g.*
	50 M.- % ***P. t.***	50 M.- % ***P. t.***	50 M.- % **Fichte**	50 M.- % **Fichte**
	+ 1 M.-% Trester	+ 1 M.- % Trester	+ 1 M.- % Trester	+ 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 vorab per Hammermühle. Am Vorabend vor dem Pelletierungsversuch wurden ca. 500 kg der in Tabelle 11 dargestellten Varianten per Hand gemischt. Der Traubentrester wurde in Pulverform und das Kaolin als Wassersuspension beigemischt. Bevor die in Tabelle 11 aufgelisteten Varianten unter optimierten Bedingungen pelletiert werden konnten, wurden die Einstellungen anhand von einem Vorversuch ermittelt.

<u>Vorversuch zur Identifikation optimaler Bedingungen der Pelletierung</u>

Für den Vorversuch wurden die Variante 4 mit unterschiedlichen Matrizen (verschiedene D_{Loch} : $L_{Presskanal}$ –Verhältnisse) und die Variante 2 mit verschieden 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 12 zeigt welche d_{Loch} : $L_{Presskanal}$ – Verhältnisse und Durchsätze während des Vorversuches gewählt wurden.

Tabelle 12: Darstellung der Varianten des Vorversuches der 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	*M. x g.* + *P. t.*	1 : 7	250
2	2	*M. x g.* + *P. t.*	1 : 7	290
3	2	*M. x g.* + *P. t.*	1 : 7	350
4	2	*M. x g.* + *P. t.*	1 : 7	385
5	2	*M. x g.* + *P. t.*	1 : 7	400
6	4	*M. x g.* + Fichte	1 : 7	350
8	4	*M. x g.* + Fichte	1 : 6	350
9	4	*M. x g.* + Fichte	1 : 5	390

Während des Versuches wurde die Qualität der Pellets beider Varianten 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.

Hauptversuch

Im Anschluss an den Vorversuch wurden die vier verschiedenen Varianten (siehe Tabelle 11) unter den in Tabelle A5 beschriebenen Bedingungen pelletiert (siehe Anhang). Dabei wurde der spezifische Energiebedarf der Pelletierung erfasst, die Pellettemperatur gemessen und anschließend die Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Pelletvarianten analysiert.

4.7 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Miscanthus-Mischpellet-Produktionsmodelles

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer theoretischen Miscanthus-Mischpelletproduktion erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von THEK und OBERNBERGER (2004). In die eigene Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurden alle soweit bekannten Produktionskosten mit einbezogen, wobei kein Anspruch auf absolute Vollständigkeit der Daten erhoben wurde. Vielmehr soll am Beispiel einer Jahresproduktionsmenge von 10.000 Tonnen Mischpellets gezeigt werden, ob die Produktion von Miscanthus-Mischpellets wirtschaftlich sein kann. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von THEK und OBERNBERGER (2004) wurde aus der Kosten-Erlös-Differenz 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 2 (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.

4.7.1 Ermittlung des Gewinnes einer Miscanthus-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 Tonnen Pellets pro Stunde ausgelegt ist, soll in einem zwei Schichtbetrieb 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.

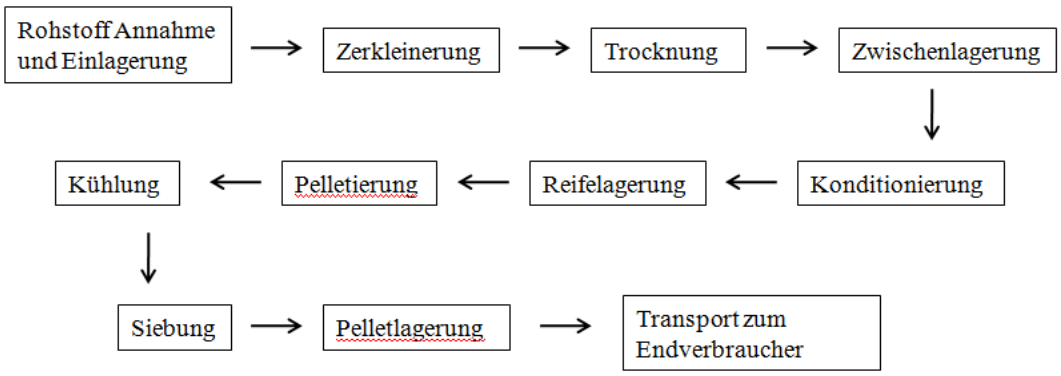

Abbildung 13: Prozessschritte der geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion (WENGHOEFER, 2013)

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

Erläuterung der Kostenposten der Produktion.

Das Produktionsgelände soll auf der „grünen Wieses“ in Nähe (max. 30 km Entfernung) zu den Betrieben der Gesellschafter der GmbH errichtet werden.

Die Kosten für das **Gebäude** setzten sich aus Planung, Grundstück (2 ha), Baukosten der Betriebshalle (5.000 m²), Gebäudereparatur und Silos für 40.000 m³ Pellets zusammen. Die jährlichen Kosten für diese unterteilten Posten ergeben sich aus der der Absetzung für die Nutzung (AfA) und den Zinsen zusammen. Besonders zu beachten gilt es, dass für das Grundstück keine Abschreibungskosten entstehen. Die Kosten für das Grundstück ergeben sich aus den Zinskosten für das gebundene Kapital. Des Weitern wurden für die Reparaturkosten des Gebäudes, welche laut (ANONYMUS 3, 2011) 6% der Baukosten für die Betriebshalle K_{Bau} betragen, keine Zinskosten erhoben.

Erläuterung der Kostenposten der Produktion

Das Produktionsgelände soll auf der „grünen Wieses“ in Nähe (max. 30 km Entfernung) zu den Betrieben der Gesellschafter der GmbH errichtet werden.

Die Kosten für das **Gebäude** setzten sich aus Planung, Grundstück (2 ha), Baukosten der Betriebshalle (5.000 m²), Gebäudereparatur und Silos für 40.000 m³ Pellets zusammen. Die jährlichen Kosten für diese unterteilten Posten ergeben sich aus der der Absetzung für die Nutzung (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 Miscanthushäcksel 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 der 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 werden 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 13: 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	Kapitalbedarf Einheit [I]	Kapitalbedarf ges. [I]	AfA [I]	Zinsen [I]	Kosten pro Jahr [I]
	Gebäude	Gebäude Planung	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	m³	200 [1]	1.000.000	40.000	26.000	66.000
		Reparaturen und Inst.	6 [1]	% K_{Bau}		60.000	2.400	0	2.400
		Pelletsilo	40.000	m³	20 [3]	800.000	32.000	20.800	52.800
		gesamt				**2.260.000**	**86.400**	**59.600**	**146.000**
Kapital-gebunden	**Technik**	Nasszerspanung	10.000	t a^{-1}	320.000 [4]	320.000	25.600	8.653	34.253
		Trocknung	10.000	t a^{-1}	400.000 [4]	400.000	32.000	10.816	42.816
		Trockenspanlager	10.000	t a^{-1}	130.000 [4]	130.000	10.400	3.515	13.915
		Pelletierung, Kühlung	10.000	t a^{-1}	300.000 [4]	300.000	24.000	8.112	32.112
		Elektronik und Versch.	10.000	t a^{-1}	210.000 [4]	210.000	16.800	5.678	22.478
		Sicherheitstechnik	10.000	t a^{-1}	70.000 [4]	70.000	5.600	1.893	7.493
		gesamt-$K_{Rep.}$	10.000	t a^{-1}		1.430.000	114.400	38.667	**153.067**
		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 [5]	-	-	-	300.000
		Paulownia	5.000	t a^{-1}	70 [6]	-	-	-	350.000
		Transport Feld-Betrieb	10.000	t a^{-1}	20 [7]	-	-	-	200.000
		gesamt	10.000	t a^{-1}	85	-	-	-	**850.000**
	Additiv	Kaolin	100	t a^{-1}	200 [8]	-	-	-	**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	% $K_{ver.}$ - $K_{var.}$		-	-	-	**59.617**
Betriebs-gebunden	**Personal**	Anlagenführer	3	/	45.000 [11]	-	-	-	135.000
		Aushilfe	1	/	35.000 [11]	-	-	-	35.000
		Geschäftsführer	1	/	75.000 [11]	-	-	-	75.000
		gesamt	5	/		-	-	-	**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] Anonymus 7 (2012), [5] Sieverdingbeck et al. (2012), [6] Pühl (2012), [7] Toews (2010), [8] Anonymus 8 (2012), [9] Anonymus 2 (2012), [10] Anonymus 1 (2012), [11] Anonymus 3 (2012), [12] Obernberger und Thek (2004)

Als **Rohstoffe** für die Mischpellets werden jährlich 5.000 t Miscanthus mit einem Feuchtegehalt von 15 M.-% und 5.000 Tonnen Paulowniahackschnitzel mit einem Ausgangsgehalt von 10 M.-% Feuchte vor der Pelletierung eingesetzt. Dabei belaufen sich laut SIEVERDINGBECK (2010) die Produktionskosten für Miscanthus (15 M.-% Feuchte) auf 60 € t^{-1} und für Paulownia (10 M.-%) 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 € pro Tonne.

Zu den beiden Hauptkomponenten werden jährlich 100 t Traubentrester, für den lediglich Transportkosten von 30 € t^{-1} gezahlt werde, als **Additiv** beigemischt. Vor der Beimischung muss dieser jedoch getrocknet, gesiebt und zermahlen werde, sodass zusätzliche Additivkosten für den Traubentrester entstehen, welche in der Summe 79 € pro Tonne betragen. Desweiteren wird feinpulveriges Kaolin in Form einer wässrigen Suspension dem Gemisch zugeführt, welches laut Anonymus 8 (2012) 200 € pro Tonne 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 1, 2012). Weiterhin benötigt die Trocknung der Paulowniahackschnitzel, 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 2, 2012). Die einzigen betriebsgebundenen Kosten stellen in diesem Fallbeispiel **Personal**kosten 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. Desweiteren 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 3 (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 3).

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

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*

Formel 3: Berechnung der Kapitalbindungskosten, die durch die Vorratshaltung der Pellets entstehen (abgeändert nach MUMM, 2008)

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, dabei betrugen die Stückkosten je Tonne Mischpellets 184,4 €.

Ermittlung des Gewinnes

Die Ermittlung des Erlöses für die 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}, sodass für die vorliegende Arbeit ein Pelletpreis von 161 € t^{-1} angenommen wurde. Dieser Preis pro Tonne wurde mit der Anzahl von 10.000 Tonnen 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.

Berechnung der Internen Rendite

Zusätzlich wurde anhand des jährlichen Gewinnes und der jährlichen Gesamtkosten die interne Rendite errechnet. Die interne Rendite wurde nach Formel 4 berechnet.

$$i^* = 100 * K^{-1} * G$$

Dabei gilt:

i = interne Rendite [%]*
K= Gesamtkosten[€]
G = Gewinn [€]

Formel 4: Berechnung der internen Rendite (nach SCHNEEBERGER und PEYERL, 2011)

4.7.2 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 elektrischer Energie ermittelt wurde. Zusätzlich wurde der kritische Wert in Abhängigkeit des Pelletpreises ermittelt. Die Bezugsmenge für diese Analyse betrug dabei eine produzierte Tonne Mischpellets.

4.8Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Analysedaten erfolgte mit der Software SPSS Version 19 für Windows. Anhand des Tukey und T Tests wurden auf Grundlage einer Irrtumswahrscheinlichkeit von kleiner als 5% die Analyseergebnisse auf signifikante Unterschiede vergleichend untersucht.

Die graphische Darstellung der statistischen Analysen, die Berechnung der Standartabweichungen und des Regressionsmaßes erfolgte mit Microsoft Excel. Signifikante Unterschiede wurden durch lateinische Klein- und Großbuchstaben über den jeweiligen Balken dargestellt.

5. Ergebnisse

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen dargelegt. In einem ersten Schritt fanden Vorversuche zur Biomasseauswahl und Identifikation geeigneter Pelletpresseneinstellungen statt. Diesen Versuchen folgten Zerkleinerungs- und Pelletierungsversuche, mit deren Hilfe optimale Maschinentypen und -einstellungen für den Pelletierungsprozess ermittelt werden sollten. Des Weiteren wurden im Näheren die vorausgewählten Biomassen stofftechnisch analysiert und charakterisiert. Zusätzlich wurde die verbrennungstechnische Wirkung einer Beimischung von Kaolin zu den ausgewählten Mischungspartnern untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse eines Pelletierungspraxisversuches, der bei der Firma Amandus Kahl unter definierten Bedingungen mit dem ausgewählten Biomassegemisch durchgeführt wurde, vorgestellt. Um eine mögliche Miscanthus-Mischpelletproduktion ökonomisch bewerten zu können wird, in dem letzten Abschnitt dieses Kapitels die Wirtschaftlichkeit eines Fallbeispiels einer Pelletproduktion aufgezeigt.

5.1 Ergebnisse aus Vorversuchen

In diesem Abschnitt wird zuerst dargelegt, wie der Aschegehalt bei verschiedenen *Misc.* x *gig*.- Typen variieren kann. Anhand dieser Ergebnisse der Aschegehaltsanalysen, wurde ein bestimmter *Miscanthus* x *giganteus*- Typ für folgende Untersuchungen ausgewählt. Zusätzlich wird anhand des Aschegehaltes und erster Pelletierungsversuche aufgezeigt, welche holz- bzw. halmgutartigen Biomassen neben Miscanthus für die Mischpelletproduktion geeignet sind. Weiterhin werden die Ergebnisse zur Eignung verschiedener Presshilfsstoffe dargestellt.

5.1.1 Aschegehaltsanalyse verschiedener Biomassen

5.1.1.1 Aschegehalte von Miscanthus

<u>Einfluss Erntejahr und Genotyp</u>

Dieses Unterkapitel zeigt auf, in wie weit der Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus*-Typen durch das Erntejahr, den Genotyp, das Bestandesalter und den Standort beeinflusst wird.

Die nachfolgende Abbildung demonstriert, die Schwankungsbreite des Aschegehaltes verschiedener *M. x g.* Genotypen, die gleichen Alters waren und auf dem selben Standort wuchsen, in Abhängigkeit zu dem Erntejahr.

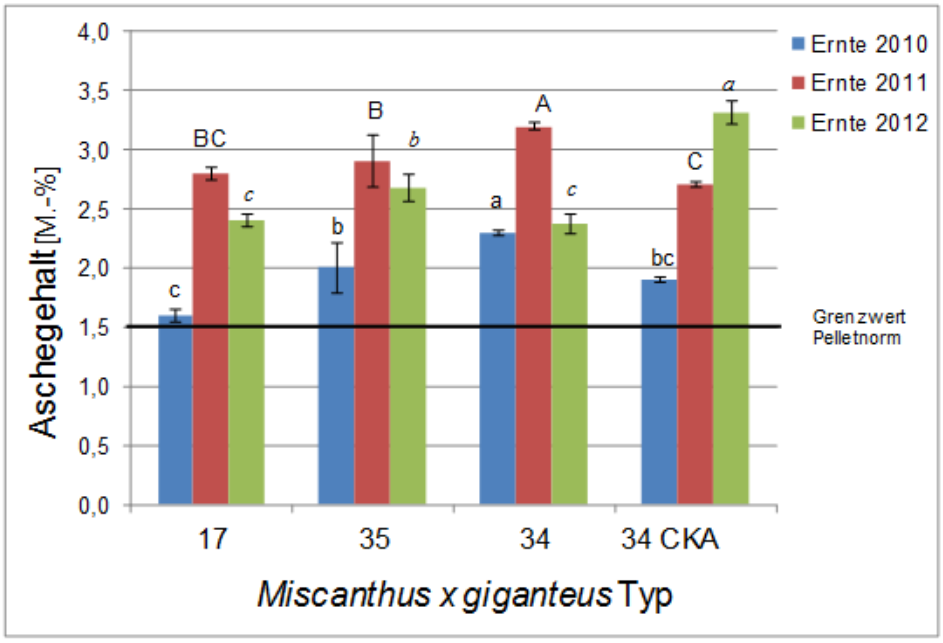

Abbildung 14: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen aus Beständen des gleichen Alters (3, 4 und 5 jährig) und Standortes (CKA), in Abhängigkeit von Erntejahr und Genotyp in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2, Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a - c, A – C und *a* - *c* ($p \leq 0{,}05$)

Aus Abb. 14 geht hervor, dass die Miscanthus-Biomasse des Erntejahres 2010 niedrigere Aschegehalte hat als die Ernte des Folgejahres. Mit Ausnahme des Types 34 CKA sank der Aschegehalt im Erntejahr 2012 wieder ab, wobei die Werte über den Aschegehalten des Jahres 2010 lagen. Bei dem Typ 34 CKA stieg 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 hatte der Typ 17, der 2010 einen Aschegehalt von nur 1,6 M.-% besaß, über alle Erntejahre tendenziell den geringsten Aschegehalt, gefolgt vom Typen 35 und 34 bzw. 34 CKA. Der Vergleich der Typen 34 und 34 CKA, die sich lediglich in der Bestandesgröße und der Art des Pflanzgutes unterscheiden, können über die Erntejahre hinweg keine klaren Aussagen getroffen werden. Besonders auffällig ist bei dem Typ 34 CKA, dass der Aschegehalt in den ersten beiden Erntejahren tendenziell ähnlich zu dem des Types 17 war. Dagegen war im Erntejahr 2012 der Aschegehalt des Typs 34 CKA signifikant am höchsten. Allgemein lagen 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.

In dieser ist der Aschegehalt von 3 verschiedenen dreijährigen Genotypen (17, 35 und 34) dargestellt, welche auf dem Standort CKA im Jahr 20011 geerntet wurden. Dabei wird ersichtlich, dass sich die Genotypen 17 und 35 nicht signifikant voneinander unterschieden. Dagegen war der Aschegehalt des Genotyps 34 signifikant am höchsten. Die Aschegehalte dieser drei Typen variierten zwischen 2,6 und 3,3 M.-%.

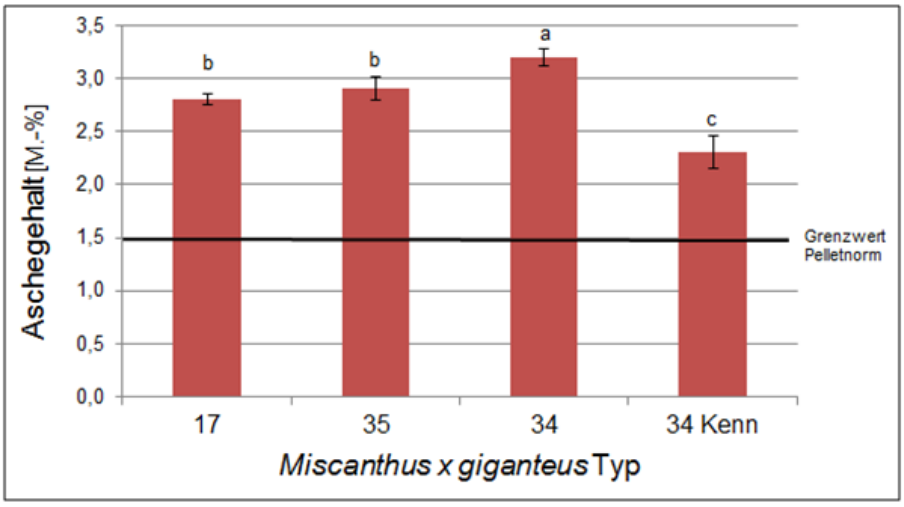

Abbildung 15: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen aus dreijährigen Beständen, die im April 2011 geerntet wurden in Abhängigkeit von Genotyp und Standort (CKA/Kenn) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2. Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a – c ($p \leq 0{,}05$)

Im Gegensatz zu dem relativ geringen Einfluss des Genotyps, zeigt der Vergleich der Varianten 34 CKA und 34 Kenn, dass der Standort einen stärkeren Einfluss auf den Aschegehalt hat als der Genotyp. Diese beiden Varianten unterschieden sich mit knapp 1,5 M.-% signifikant voneinander.

<u>Einfluss des Bestandesalters</u>

Die folgende Abbildung stellt dar, wie hoch die Aschegehalte des Miscanthus vom Genotypen 34 bei verschiedenen Bestandesaltern 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.

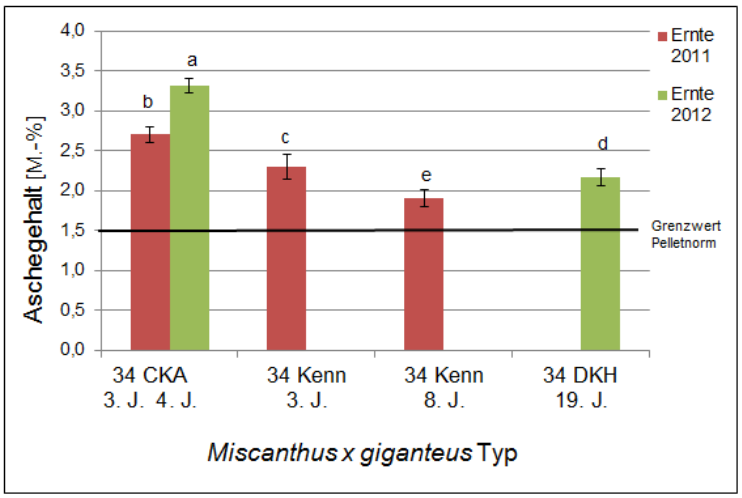

Abbildung 16: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen des gleichen Genotyps in Abhängigkeit von Bestandesalter, Erntejahr und Standort (CKA, Kenn und DKH) in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2, Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Varianten geprüft mit Tukey Test a – e ($p \leq 0,05$)

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 quantifiziert werden.

Zusammenfassung

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

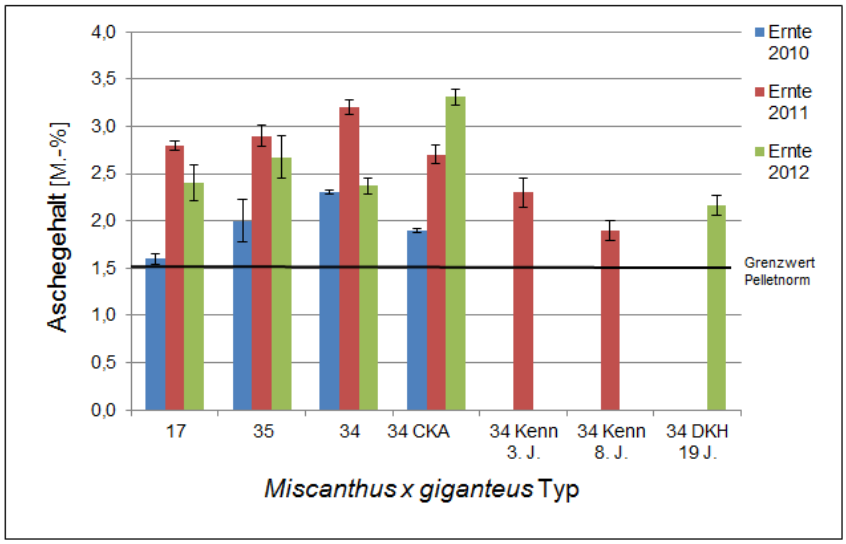

Abbildung 17: Aschegehalte (bezogen auf TM) verschiedener *Miscanthus x giganteus*- Typen in Abhängigkeit von Standort, Bestandesalter, Genotyp und Erntejahr in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Aschegehalt von der Art *Miscanthus x giganteus* um bis zu 100% sehr stark schwanken kann. In Bezug auf diese Schwankungen zeigte sich, dass das Erntejahr mit bis zu 75% Unterschied bei einem Typ (17) den stärksten Einfluss auf den Aschegehalt hatte. Weiterhin konnte 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 rief dagegen lediglich maximale Unterschiede von 44% hervor (Variante 17 und 34). Der Faktor Bestandesalter bildete bei den Untersuchungen mit 21% Unterschied den geringsten Einflussfaktor. Insgesamt zeigen die Daten, dass *Miscanthus x giganteus* im Mittel einen Aschegehalt zwischen 2 und 2,5 M.-% hat und somit 0,5 bis 1 M.-% über dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2 liegt.

5.1.1.2 Aschegehalte potentieller Mischungspartner

Der folgende Abschnitt präsentiert die Ergebnisse der Aschegehaltsanalysen potentieller Mischungspartner für die Miscanthus-Mischpelletproduktion.

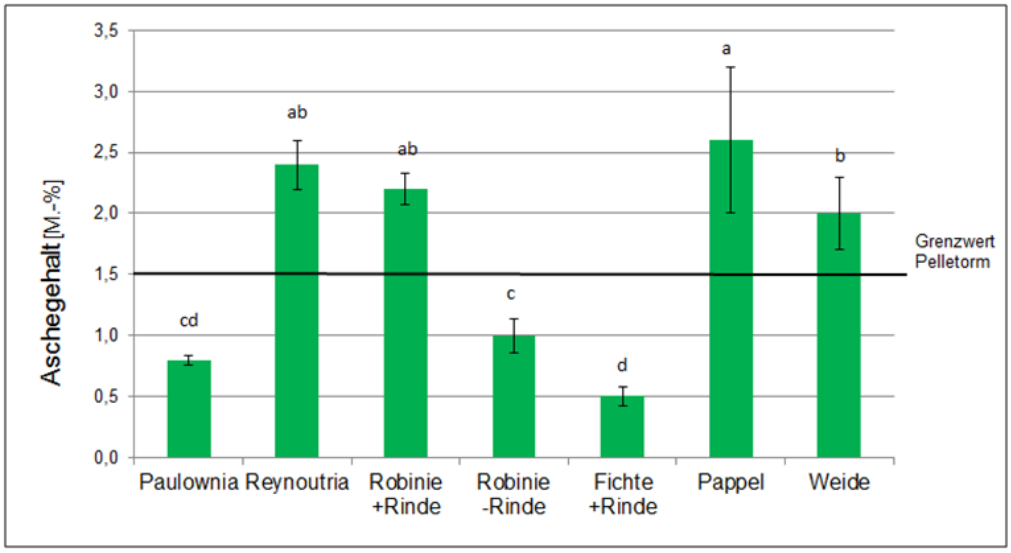

Abb. 18: Aschegehalte (bezogen auf TM) ausgewählter Biomassearten in Relation zu dem Grenzwert der Pelletnorm EN 14961-2 A2. Signifikanz der Aschegehalte der verschiedenen Biomassearten geprüft mit Tukey Test a – d ($p \leq 0{,}05$)

Abbildung 18 zeigt dabei, dass die Fichtenhackschnitzel mit Rindenanhang (0,5%) im Vergleich zu den anderen Biomassearten – mit Ausnahme von Paulownia - den signifikant geringsten Aschegehalt hat. *Paulownia tomentosa* weist einen Aschegehalt von 0,76 M.-% auf. Somit liegt Paulownia, in Bezug auf den Aschegehalt zwischen Fichte mit Rinde und Robinie ohne Rinde, deren Biomasse einen Aschegehalt von 1 M.-% hat. Die anderen vier untersuchten Varianten haben einen Aschegehalt von größer oder gleich 2 M.-%.

5.1.2 Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassearten

Tabelle 14 fasst die Ergebnisse der Überprüfung der Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassen zusammen, die unter den in Tabelle 5 beschriebenen Bedingungen pelletiert wurden.

Tabelle 14: Ergebnisse der Prüfung zur Pelletierbarkeit der verschiedenen Biomassen in Rein- und Mischform

Versuch Nr.	**Mischkomponente**		**Visuelle Qualität**	**Abriebfestigkeit > 3,15 mm** [%]	**Schüttdichte** [kg m^{-3}]
	Anteil [M.-%]	**Biomasse**			
1	**100**	**Miscanthus**	4	92,0	604
2	**50** **50**	**Miscanthus** **Paulownia**	1	98,1	624
3	**100**	**Paulownia**	1	97,4	608
4	**100**	**Pappel**	2	93,0	617
5	**100**	**Weide**	4	91,0	603
6	**100**	**Paulownia**	1	97,9	628
7	**50** **50**	**Pappel** **Miscanthus**	2	97,2	609
8	**50** **50**	**Miscanthus** **Paulownia**	1	98,2	623
9	**50** **50**	**Miscanthus** **Paulownia**	1	97,8	627
10	**25** **25** **25** **25**	**Pappel** **Weide** **Paulownia** **Miscanthus**	5	-	-
11	**25** **25** **25** **25**	**Pappel** **Weide** **Paulownia** **Miscanthus**	3	93,8	612
12	**50** **50**	**Miscanthus** **Reynoutria**	2	97,7	627

Das Ergebnis dieser Voruntersuchung zur Pelletierfähigkeit der verschiedenen Biomassearten war, dass die Pellets mit 50% Paulownia- und 50% Miscanthusanteil die beste Pelletierbarkeit aufzeigten (Varianten 2,8 und 9). Abbildung 19 zeigt exemplarisch Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die eine sehr gute visuelle und physikalische Qualität aufwiesen.

Abbildung 19: Miscanthus-Paulownia-Mischpellets -Versuchsnummer 9 aus Tab. 7 (WENGHOEFER, 2012)

Im Gegensatz zu den Miscanthus-Paulownia- Mischpellets, haten die Pellets der anderen Varianten (Rein- und Mischstoffe) schlechtere visuelle und physikalische Eigenschaften.

5.1.3 Eignung der verschiedenen Additive als Presshilfsstoffe

Tabelle 15 zeigt, dass Melasse aus Zuckerrüben den höchsten und Stärke den niedrigsten Aschegehalt aufweist. Der Aschegehalt des Traubentresters lag mit 5,4 M.-% genau zwischen den Aschegehalten der beiden anderen und 3,9 M.-% über dem Grenzwert der Pelletnorm.

Tabelle 15: Aschegehalte der Additive Melasse, Traubentrester und Stärke

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 20 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 hatte (siehe Abb. 21). Beide Varianten erfüllten die Anforderungen der Norm.

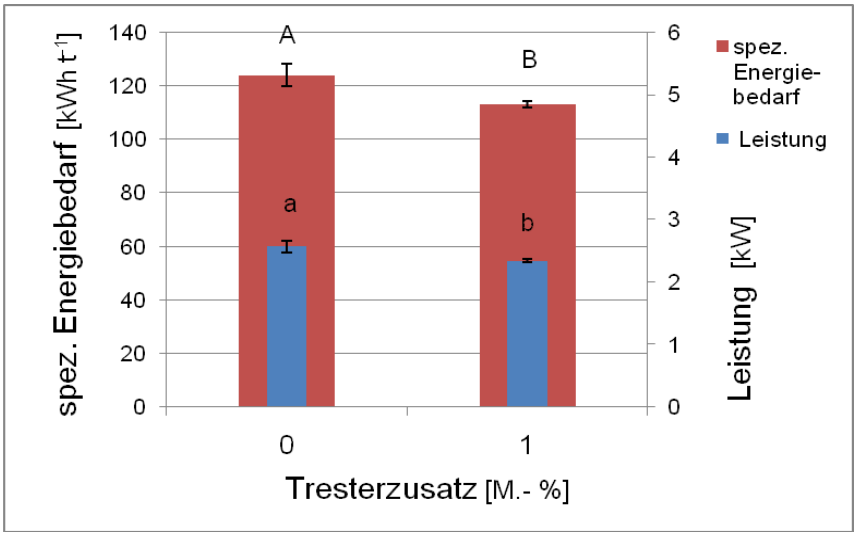

Abb. 20: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* und Paulownia mit einem Wassergehalten von 14 M.-% bei Zugabe von 0 M.-% und 1 M.-% Traubentrester. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A - B und a - b ($p \leq 0{,}05$), n=4

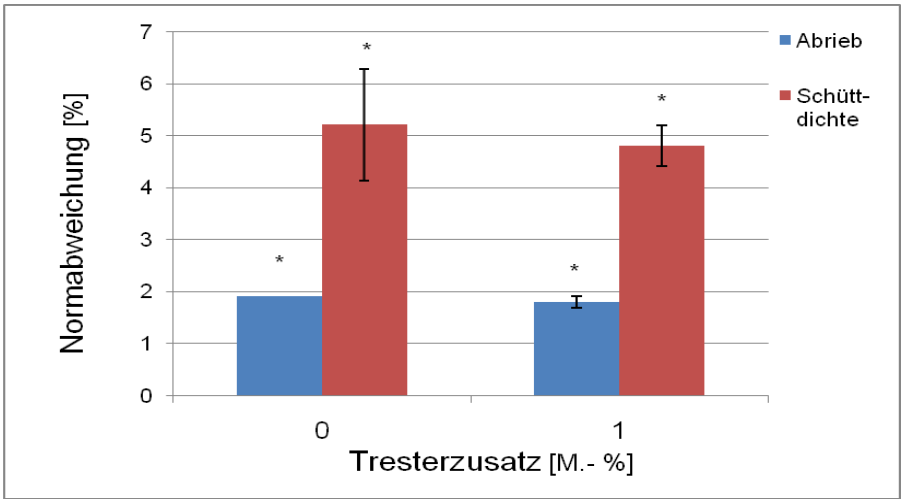

Abb. 21: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Miscanthus- Paulownia- Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; ($p \leq 0{,}05$), * = nicht signifikant, n=4

5.2 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren

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

5.2.1 Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle und Zerfaserung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlungen der Zerkleinerung von Miscanthus mit der Hammermühle und der beiden Zerfaserungen vom Typ 22/600 bzw. 45/1500, welche im Jahr 2011 erfolgte und 2012 nochmals wiederholt wurde. Desweiteren wird zusätzlich aufgezeigt welchen Einfluss die Biomasseart und Partikelgröße der Biomasse auf den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Hammermühle hat.

Versuche zur Erfassung des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens

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

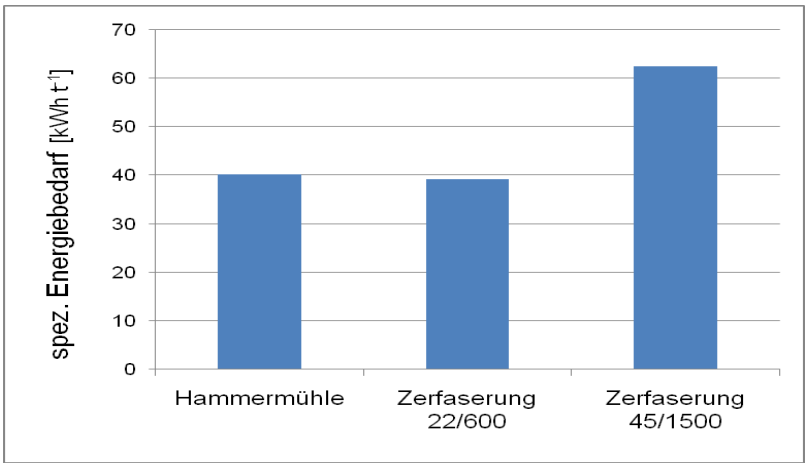

Abb. 22: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung von Miscanthus mit einem Wassergehalt von 9,6 M.-% in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens (Versuchsjahr 2011)

Die Wiederholung des Versuches im Jahr 2012 konnte die Ergebnisse des Vorjahres bestätigen. Abbildung 23 stellt die Ergebnisse der Energiebedarfsermittlung der Zerkleinerung von *M. x g.* mittels Hammermühle und Zerfaserung in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes vergleichend dar.

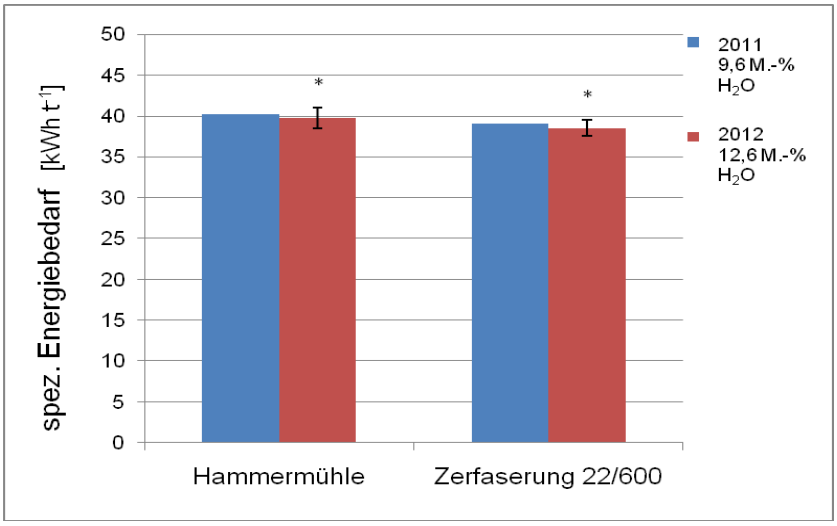

Abb. 23 : Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens und des Wassergehaltes (Versuchsjahr). Signifikanz des E_{spez} der Varianten 2012 geprüft mit T-Test; * ($p \leq 0,05$), * = nicht signifikant, n=4

Aus der Abbildung 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 als trockenerer.

<u>Versuche zur Erfassung des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von unterschiedlichen Biomassen mittels Hammermühle</u>

Die Zerkleinerungsversuche der verschiedenen Biomassen mittels Hammermühle verdeutlichten, dass die Zerkleinerung der Fichtensägespäne den signifikant geringsten Energieaufwand benötigten (21 kWh t^{-1}). Den signifikant höchsten spezifischen Energiebedarf hatte die Zerkleinerung der Paulowniahackschnitzel mit einer L_{Kante} von 18 mm (64 kWh t^{-1}). Der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthushäcksel und Hackschnitzel von Fichte und Paulownia mit der Größe G 30 unterschied sich signifikant von den vorher benannten Varianten. Dabei zeigte die Variante Miscanthus Häcksel (40 kWh t^{-1}) einen signifikant niedrigeren spezifischen Energiebedarf als die Varianten Paulownia G 30 und Fichte G 30, die sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Allerdings benötigte die Variante Paulownia G 30 (53 kWh t^{-1}) tendenziell 8% weniger Energie als die Fichte G 30 (57 kWh t^{-1}). In Abbildung 24 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

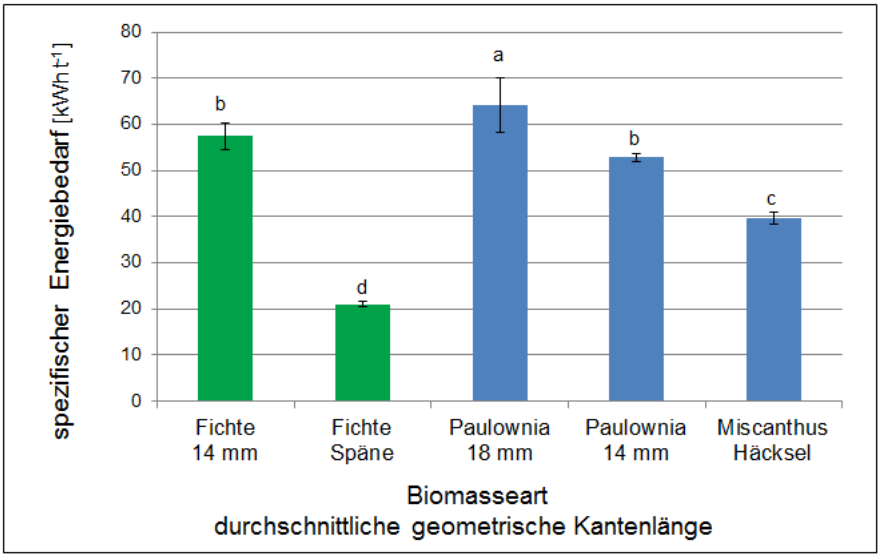

Abb. 24: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Hammermühle in Abhängigkeit der Biomasseart und L_{Kante}. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes des Prozessschrittes der Zerkleinerung geprüft mit Tukey Test a - d ($p \leq 0,05$) (Versuchsjahr 2012)

5.2.2 Zerkleinerungsversuche von Miscanthus mittels Kollermühle

Das folgende Kapitel zeigt die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche von Miscanthus mittels Kollermühle. Diese erfolgten im Technikum der Firma Amandus Kahl und waren in zwei Versuchsreihen unterteilt.

5.2.2.1 Versuchsreihe zur 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 der Miscanthus-Mischpellets dargestellt, deren Miscanthusanteil mit unterschiedlichen Matrizen zerkleinert wurde.

Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung mittels Kollermühle

Der in Kapitel 4.2.1.3 beschriebene Zerkleinerungsversuch von Miscanthus mittels Kollermühle zeigte, 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 es bei Verwendung dieser Matrize zum Verstopfen der Matrize kam.

Die Varianten mit einem Lochdurchmesser von 8 mm bzw. 6 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 erzeugten 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 war 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)

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

Der ebenfalls in Kapitel 4.2.1.3 dargestellte Pelletierungsversuch ergab, dass alle drei Versuchsvarianten, mit einem Matrizenlochdurchmesser von 6 mm, 8 mm und 10 mm, für den Prozessschritt der Pelletierung mit 180 kWh t^{-1} gleich viel Energie benötigten. Die Presskanalverhältnisse der Varianten betrugen 1 : 2 (Variante 10 mm) bzw. 1 : 1 (Varianten 6 mm und 8 mm).

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.

Es zeigte sich, dass die Mischpellets deren Miscanthusanteil unter Einsatz einer Matrize mit 6 mm Lochdurchmesser als einzige beide Mindestanforderungen der Pelletnorm A2 erfüllen. Die beiden anderen Varianten hatten zwar eine höhere Abriebfestigkeit als die 6 mm Variante, jedoch war deren Schüttdichte unterhalb des Normgrenzwertes. Dabei lag die Schüttdichte der 10 mm Variante mit -2,25% Abweichung (586 kg m^{-3}) unterhalb der Anforderung der Pelletnorm von 600 kg m^{-3}.

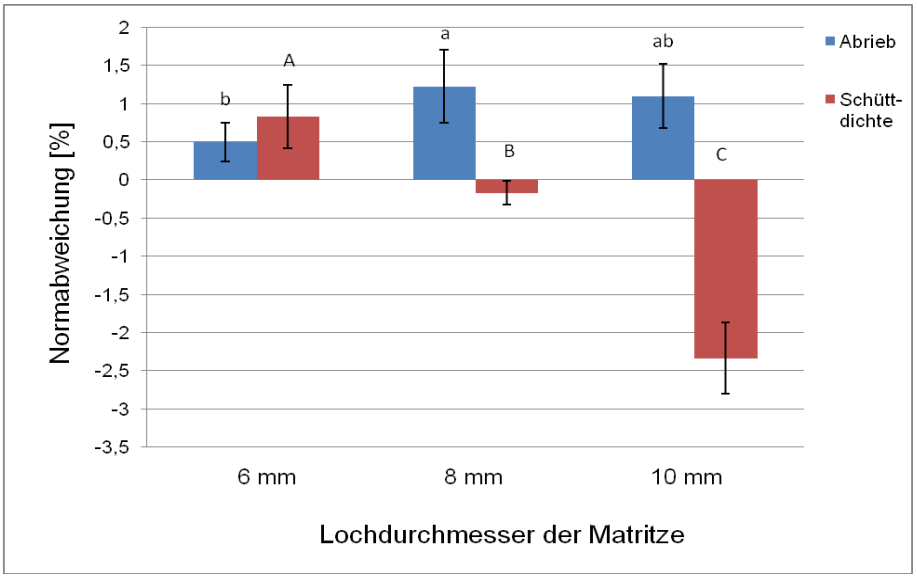

Abb. 25: Abriebfestigkeit und Schüttdichte von Miscanthus- Fichten- Mischpellets, deren Miscanthusanteil mit verschiedenen Lochmatrizendurchmessern in der Kollermühle zerkleinert wurde, in Relation zu den Grenzwerten der Pelletnorm EN 14961-2 A2. Signifikanz der Abriebfestigkeit und Schüttdichte geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - B ($p \leq 0{,}05$), n=4 (Versuchsjahr 2011)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zerkleinerung bei Einsatz einer 6 mm Lochmatrize mit einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 den Miscanthus gut pelletierbar aufarbeitet und einen moderaten spezifischen Energiebedarf aufzeigt.

5.2.2.2 Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus und Paulownia mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuch 2012)

Auf Grundlage der Ergebnisse der Versuchsreihe im Jahr 2011 wurde im darauf folgenden Jahr ein weiterer Versuch in dem Technikum der Firma Amandus Kahl durchgeführt.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen auf, wie der Durchsatz und eine Wasserzugabe während des Zermahlens auf den Leistungsbedarf und spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthushäckseln bzw. Paulowniahackschnitzeln wirken.

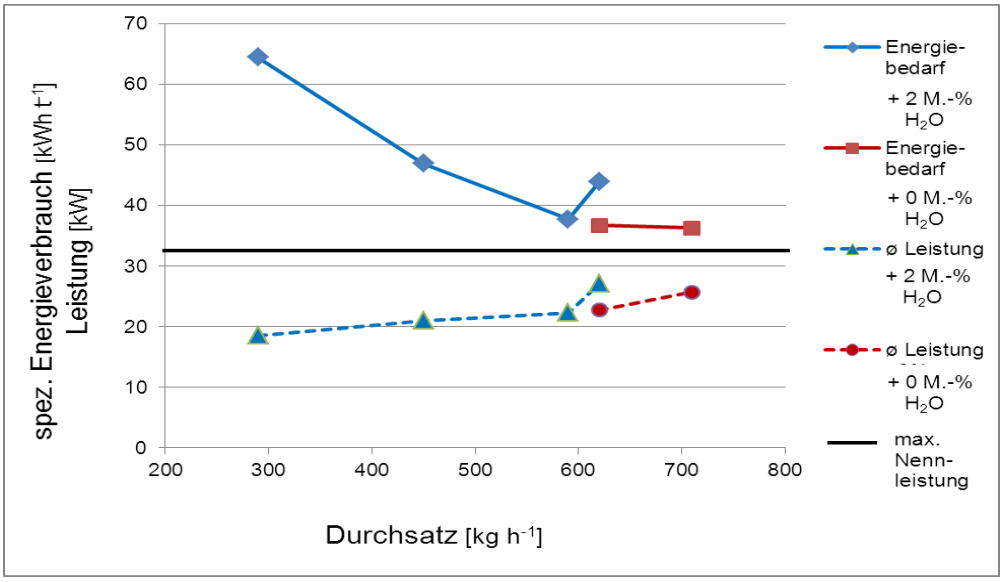

Abbildung 26: Spezifischer Energiebedarf und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle (Versuchsjahr 2012)

Aus der Abbildung 26, welche die Zerkleinerung von Miscanthus beschreibt, geht hervor, 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) anstieg. Diese lineare Erhöhung des Leistungsbedarfes um 20% wurde durch eine Durchsatzerhöhung von 110% hervorgerufen. Verbunden mit der Erhöhung des Durchsatzes um 110% sank der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung um knapp 40% auf 38 kWh t^{-1}. Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes auf 620 kg h^{-1} führte zu einem sprunghaften Anstieg des Leistungsbedarfes auf 82% der maximalen Nennleistung. Mit dem starken Anstieg des Leistungsbedarfes (+12%) und einer minimalen Erhöhung des Durchsatzes stieg der spezifische Energiebedarf ebenfalls um 16% auf 44 kWh t^{-1}.

Bei Beibehaltung des Durchsatzes von 620 kg h^{-1} und einer Wasserzugabe von 0 M.-% sank der Leistungsbedarf um 14%, womit eine Reduktion des spez. Energiebedarfes mit ebenfalls 14% verbunden war. Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes um 15% auf 710 kg h^{-1} hatte eine Steigerung des Leistungsbedarfes von 13% auf 78% der maximalen Nennleistung zur Folge. Damit ging einher, dass sich der spezifische Energiebedarf leicht um 3% verringerte.

Es kann zusammen gefasst werden, dass in diesem Versuch eine Zugabe von 0 M.-% Wasser und eine Durchsatzerhöhung auf 710 kg h^{-1} - bei einem Leistungsbedarf von 78% der maximalen Nennleistung - den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus (12,6 M.-% Feuchte) verringert.

Der gleiche Versuch, bei dem Paulownia mit einem Ausgangsfeuchtegehalt von 9,2 M.-% zerkleinert wurde, zeigte im Gegensatz zu dem Versuch mit Miscanthus ein unterschiedliches Ergebnis. Die Daten der Abbildung 27 veranschaulichen dies deutlich.

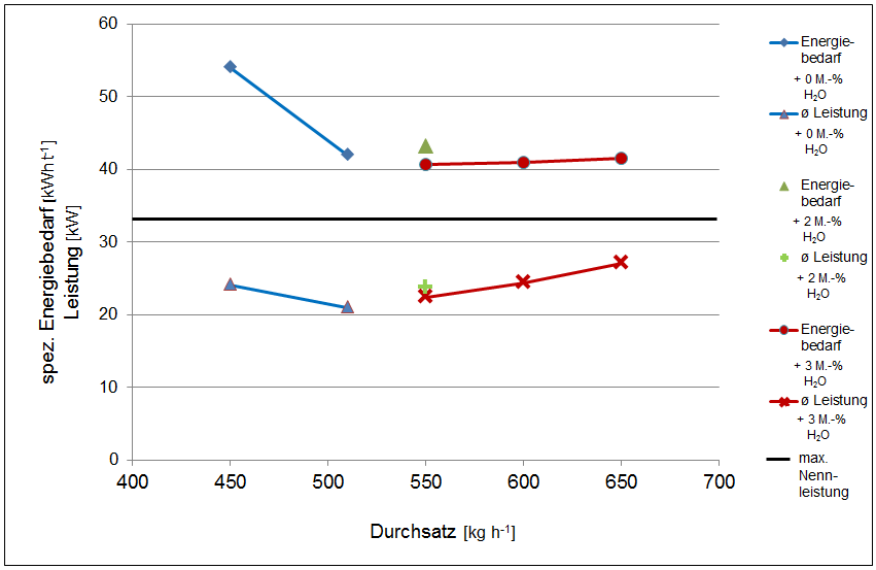

Abbildung 27: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Abhängigkeit der Wasserzugabe und des Durchsatzes in Bezug zur maximalen Nennleistung der Kollermühle

Gegensätzlich zu den Werten des vorherig beschriebenen Versuches führte eine Wasserzugabe zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Paulownia. Den höchsten spezifischen Energiebedarf zeigte die Variante mit 0 M.-% und einem Durchsatz von 450 kg h^{-1} auf. Dabei betrug der Leistungsbedarf der Kollermühle 72% der maximalen Nennleistung. Die Erhöhung des Durchsatzes um 13% führte zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes um 22%. Gleichzeitig zu dieser Durchsatzerhöhung sank auch der Leistungsbedarf um 12%. Dieses Ergebnis steht ebenfalls im Wiederspruch zu den Ergebnissen des Zerkleinerungsversuches mit Miscanthus, da bei allen anderen Varianten der Leistungsbedarf bei einer Erhöhung des Durchsatzes anstieg.
Weiterhin zeigt die Abbildung 27, 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.-% führte dazu, dass bei einem gleichbleibenden Durchsatz der Leistungsbedarf um 6% sank was eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfes um 6% bewirkte. Zuletzt wurde der Durchsatz in zwei Stufen um jeweils 50 kg h^{-1} angehoben. Diese lineare Durchsatzsteigerung, mit Beibehaltung der Wasserzusatzmenge von 3 M.-%, führte zu einem linear ansteigenden Leistungsbedarf. Dies verursachte eine geringfügige Anhebung des spezifischen Energiebedarfes. Im Vergleich zu der Variante mit einem Durchsatz von 550 kg h^{-1} hatte die Variante mit einem Durchsatz von 650 kg h^{-1} einen um 2% höheren spezifischen Energiebedarf von 42 kWh t^{-1}. In dem gleichen Zug erhöhte sich der Leistungsbedarf um 22% auf 82% der maximalen Nennleistung der Kollermühle.

Dieser Versuch zeigte, 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 wurde 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 hatten. Jedoch führte bei der gleichen Wasserzugabemenge eine Erhöhung des Durchsatzes auf 650 kg h^{-1} nur zu einer minimalen Anhebung des spezifischen Energiebedarfes.

5.2.2.3 Zusammenfassung der Versuche zur Qualitätsbestimmung des Zerkleinerungsprozesses mittels Kollermühle

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche mit Miscanthus und Paulownia mittels Kollermühle zusammen. Die nachgestellte Abbildung beschreibt dabei den Leistungsbedarf und den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus und Paulownia, der unter optimalen Bedingungen während des Versuches 2012 ermittelt wurden.

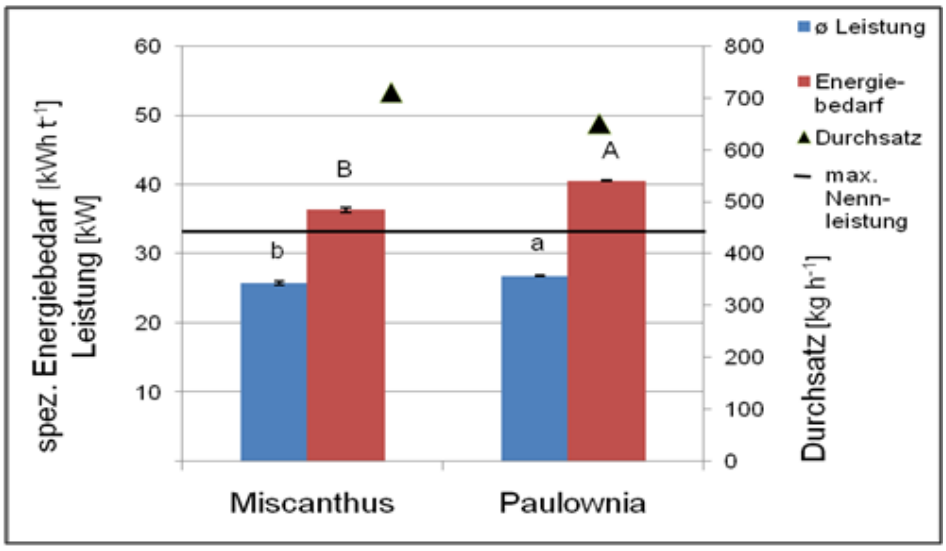

Abbildung 28: Spezifischer Energie- bzw. Leistungsbedarf in Abhängigkeit des Durchsatzes der Zerkleinerung von Paulownia und Miscanthus mittels Kollermühle unter optimierten Bedingungen (Versuchsjahr 2012). Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A-B bzw. a-b ($p \leq 0{,}05$), n=4

Aus Abbildung 28 geht hervor, dass die Kollermühle für die Zerkleinerung von Miscanthus, bei einer im Vergleich zu Paulownia höheren Durchsatzmenge, die selbe Leistung benötigt wie für Paulownia. Daraus resultiert, dass die Zerkleinerung von Miscanthus unter optimierten Bedingungen signifikant weniger Energie benötigt, als die Zerkleinerung von Paulownia.

5.2.3 Zerkleinerungsversuche mit dem 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 wurde.

Tabelle 17: Spezifischer Energiebedarf der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Prallreaktor in Abhängigkeit der Maschineneinstellungen

Versuchs-nummer	**Material-masse** [kg]	**Sieb**		**Prall-fläche** [cm²]	**Drehzahl** [U min^{-1}]	**spez. Ener-gie-bedarf** [kWh t^{-1}]
		ø Loch [mm]	**Fläche** [cm²]			
1	87	5	400	192	3000	**66**
2	200	5 und 6	800	192	3000	**47**
3	12	5 und 6	800	384	3000	**50**
4	90	5 und 6	800	384	1800	**53**

Die Variante mit der Versuchsnummer 1, die lediglich eine Siebfläche von 400 cm² aufwies, zeigte mit 66 kWh t^{-1} den höchsten Energiebedarf auf. Durch Verdoppelung der Siebfläche und Beibehaltung der anderen Maschineneinstellungen konnte 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) führte im Vergleich zu der Variante Nr. 2 zu einer leichten Erhöhung des Energiebedarfs. Im Vergleich zu Variante Nr. 3 hatte eine Reduktion der Drehzahl (Versuchsnummer 4) zur Folge, dass der Energiebedarf ebenfalls leicht auf 53 kWh t^{-1} anstieg.

5.2.4 Vergleich des Energiebedarfes zur Zerkleinerung von Miscanthus, der verschiedenen Verfahren

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

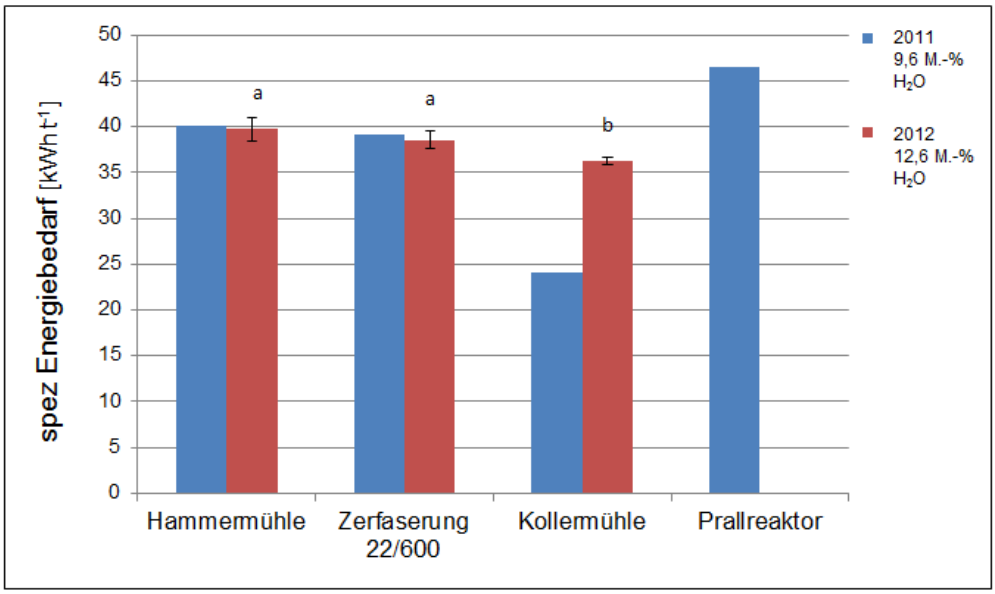

Abb. 29: Vergleich des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung, Kollermühle und Prallreaktor in Abhängigkeit des Wassergehaltes (Versuchsjahre 2011 und 2012). Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle, Zerfaserung und Kollermühle aus dem Versuchsjahr 2012 geprüft mit Tukey-Test; a - b ($p \leq 0{,}05$), n=4

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

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

5.2.5 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Pelletierungsprozess

In den folgenden Kapiteln wird dargestellt, wie die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren die prozesstechnologische Qualität der Miscanthus- Zerkleinerungsprodukte beeinflussen. 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 zu der 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.

5.2.5.1 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf den Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung

Durch die Pelletierungsversuche mit Miscanthus-Fichten-Gemischen wurde gezeigt, dass die Mischvariante Kollermühle, signifikant weniger Energie für die Pelletierung benötigt, als die Varianten Hammermühle und Zerfaserung (Typ 22/600).

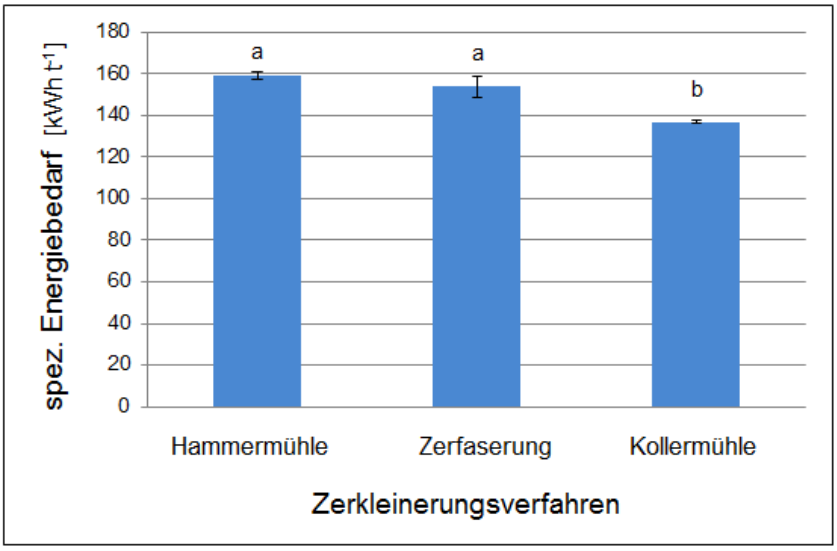

Abb. 30: Spezifischer Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung von Miscanthus- Fichten-Pellets in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren, Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes der Pelletierung in Abhängigkeit des gewählten Zerkleinerungsverfahrens geprüft mit Tukey Test a – b ($p \leq 0{,}05$)

5.2.5.2 Auswirkungen der Zerkleinerungsverfahren auf die physikalischen Pelleteigenschaften von Mischpellets

Die folgende Abbildung zeigt die Analyseergebnisse des in Kapitel 4.2.2.2 beschriebenen Versuches.

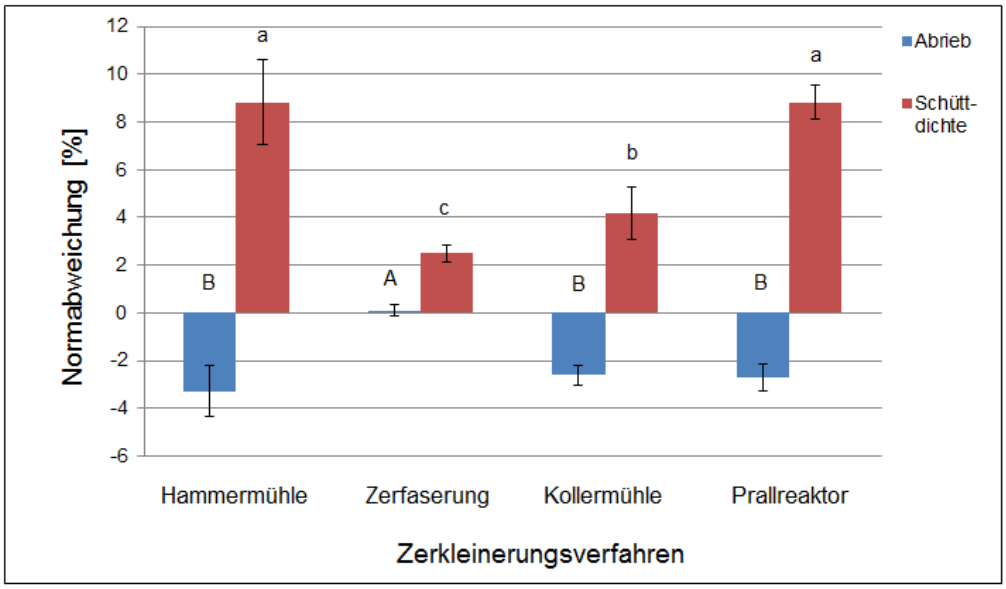

Abb. 31: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Fichten-Pellets in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren. Signifikanz Abriebfestigkeit und Schüttdichte geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - B ($p \leq 0{,}05$), n=4

Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass lediglich die Mischpellet- Variante, deren Miscanthusanteil mittels Zerfaserung zerkleinert wurde, die Anforderungen der EN-14961-2 A2 erfüllt. Die Varianten Hammermühle und Kollermühle hatten zwar höhere Schüttdichten, als die Variante Zerfaserung, jedoch war die Abriebfestigkeit dieser Mischpellet- Varianten unter den von der Norm geforderten 97,5 M.-%. Dabei besaßen die Varianten Hammermühle und Prallreaktor eine nahezu identische Schüttdichte und Abriebfestigkeit. Die Variante Kollermühle zeigte dagegen in Bezug auf die Variante Zerfaserung geringere Abweichungen in der Schüttdichte und Abriebfestigkeit als die Varianten Hammermühle und Prallreaktor.

5.2.5.3 Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte

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

Für die zwei verschiedenen Produkte, die mit zwei unterschiedlichen Zerfaserungmaschinentypen zerkleinert worden sind, wurden zwei separate Siebkennlinien erstellt. Das gleiche gilt für die drei Produktvarianten der Kollermühle, die sich durch unterschiedliche Matrizenlochdurchmesser auszeichnen.

Tabelle 18: Siebkennlinien der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus (Kenn) in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahren. Signifikanz Partikelgrößenverteilung der jeweiligen Variante geprüft mit Tukey-Test; a - d ($p \leq 0{,}05$), 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

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 aufweisen. 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.

5.2.5.4 Einfluss der Korngrößenverteilung, des durch unterschiedliche Verfahren zerkleinerten Miscanthus auf die physikalische Pelletqualität

Um den Einfluss der Korngrößenverteilung, der durch das Zerkleinerungsverfahren beeinflusst wird, zu untersuchen wurden die Mischpellets aus dem in Kapitel 4.2.2.3 beschriebenen Versuch analysiert. Diese Miscanthus- Fichten- Mischpellets zeichneten sich dadurch aus, dass über alle drei Varianten hinweg, der Miscanthusanteil eine definierte Korngrößenverteilung aufwies.

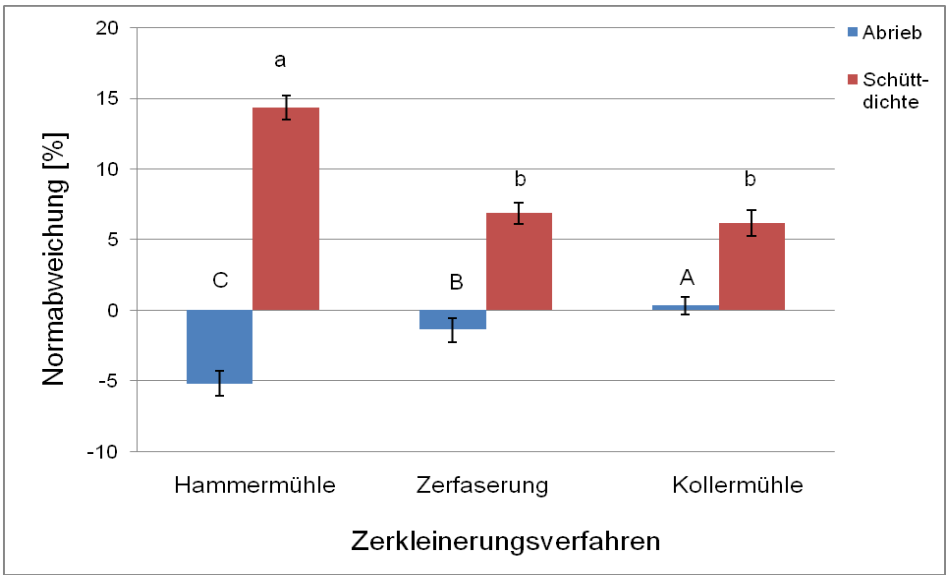

Abb. 32: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Fichten-Pellets, deren Miscanthus-Partikelgröße einheitlich eingestellt wurde, in Abhängigkeit zu dem für die Zerkleinerung von Miscanthus gewählten Verfahren. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - b und A - C ($p \leq 0{,}05$), n=4

Nach Anpassung der Korngrößenverteilung des Miscanthusanteils, an die Ergebnisse der in Kapitel 5.2.4.2 dargestellten Siebkennlinie der Variante Zerfaserung (Typ 22/600), veränderte sich Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Mischpellets. Im Vergleich zu Abbildung 31 erfüllte nun die Variante Kollermühle die Anforderungen der Pelletnorm. Die Variante der Zerfaserung zeigte im Vergleich zu der Variante Kollermühle eine etwas höhere Schüttdichte, wobei die Abriebfestigkeit knapp 2% unterhalb des Normgrenzwertes lag. Die Variante der Hammermühle wich wie schon in Abbildung 31 dargestellt, tendenziell am stärksten von der Norm ab. Dabei lag die Schüttdichte mit 14% Normabweichung über den geforderten 600 kg m^{-3} und die Abriebfestigkeit 5% unter der Norm.

5.2.6 Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse

In Vorbereitung für die Pelletierungsversuche ließen sich alle vorher beschriebenen holzartigen Biomassen mittels der **Hammermühle** zerkleinern. Der Versuch Paulowniaholzhackschnitzel mittels **Zerfaserung** zu zerkleinern scheiterte. Während der Zerkleinerung der Hackschnitzel mittels Zerfaserung brachen die Sägeblätter, die zwischen den Sieben angebracht waren. Weitere Versuche zur Zerkleinerung holzartiger Biomassen wurden daraufhin eingestellt.

Die Zerkleinerung von Paulowniahackschnitzeln mit Hilfe der **Kollermühle** funktionierte dagegen problemlos. Jedoch wurde das Zerkleinerungsprodukt zu stark vorkompaktiert.

Während der Versuchreihe mit dem Prallrektor konnte Robinienholz erfolgreich auf kleiiner als 5 mm zerkleinert werden.

5.3 Wirkungsweise von Wassergehalt, Matrizenpresskanallängen und Durchsatzmenge auf den Pelletierungsvorgangs

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Optimierung des Pelletierungsvorganges aufgezeigt. Diese sollen exemplarisch darlegen wie sich unterschiedliche Gehalte von Wasser und verschiedene Zumischungen von Traubentrester in den Biomassegemischen auf den Vorgang der Pelletierung auswirken. Zusätzlich wird dargestellt wie ein unterschiedliches Presskanalverhältnis auf diesen Prozessschritt auswirkt. Bei diesen Optimierungsversuchen standen in der Regel der spezifische Energiebedarf der Pelletierung und die physikalischen Eigenschaften der produzierten Pellets im Fokus der Betrachtungen.

5.3.1 Versuch zum Einfluss des Wassergehaltes auf den Prozessschritt der Pelletierung

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, wie sich unterschiedliche Wassergehalte eines Biomassegemisches auf den spezifischen Energiebedarf der Pelletierung und die Abriebfestigkeit bzw. die Schüttdichte der Pellets auswirken. Die folgende Abbildung stellt exemplarisch am Beispiel der Pelletierung von *Miscanthus x giganteus* und Paulownia dar, wie hoch der spezifische Energiebedarf des Pressvorgangs in Abhängigkeit des Wasserbedarfes ist. Zusätzlich für nähergehende Erläuterungen ist in dieser Abbildung der Leistungsbedarf und der Matrizentemperaturverlauf der unterschiedlichen Varianten aufgezeichnet. Die Standartabweichungen aller Varianten lag unter 2%.

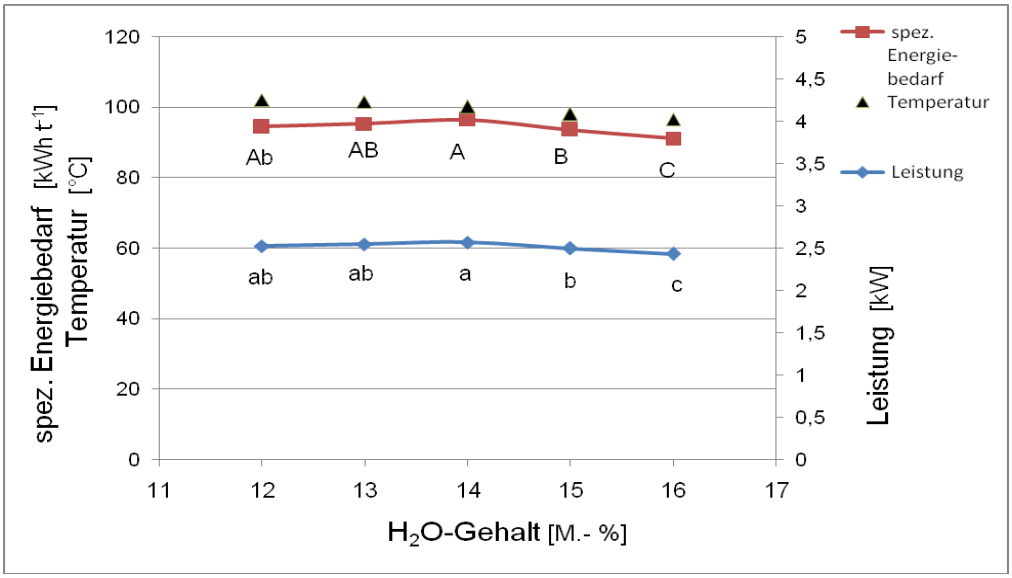

Abbildung 33: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrize und Leistungsbedarf während des Pelletierungsvorganges eines Biomassegemisches aus *M. x g.* (Kenn) und Paulownia mit Zuschlag von 1 M.-% Traubentrester in Abhängigkeit des Wassergehaltes. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und des Leistungsbedarfes geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - C ($p \leq 0{,}05$), n=4

Es zeigte sich, dass die Variante mit 14 M.-% den höchsten spezifischen Energiebedarf und Leistungsbedarf hatte, wobei die Matrizentemperatur 99°C betrug.

Der spezifische Energiebedarf und der Leistungsbedarf der Pelletierung der Varianten mit 13 bzw. 12 M.-%, bei der die Matrizentemperatur auf über 100°C anstieg, war ähnlich hoch wie der von der Variante mit 14 M.-%. Erst ab einem Wassergehalt von 15 M.-% verringerte sich der spezifische Energiebedarf und der Leistungsbedarf des Pressvorganges. Einher mit diesem Verlauf ging ein Abfall der Matrizentemperatur auf 96°C (16 M.-% Wassergehalt). Dabei unterschied sich die Variante mit 15 M.-% Wassergehalt nur signifikant zu der Variante 14% und 16%. Generell hatte 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 von einander unterschieden. Dabei hatte das Gemisch mit 14 M.-% Ausgangsfeuchte die tendenziell höchste und das Gemisch mit 16 M.-% die tendenziell niedrigste Abriebfestigkeit. Die anderen Varianten unterschieden sich nicht signifikant zu diesen (siehe Abbildung x). Ähnlich wie bei dem spezifischen Energiebedarf und dem Leistungsbedarf war die Standartabweichung der verschiedenen Varianten sehr gering.

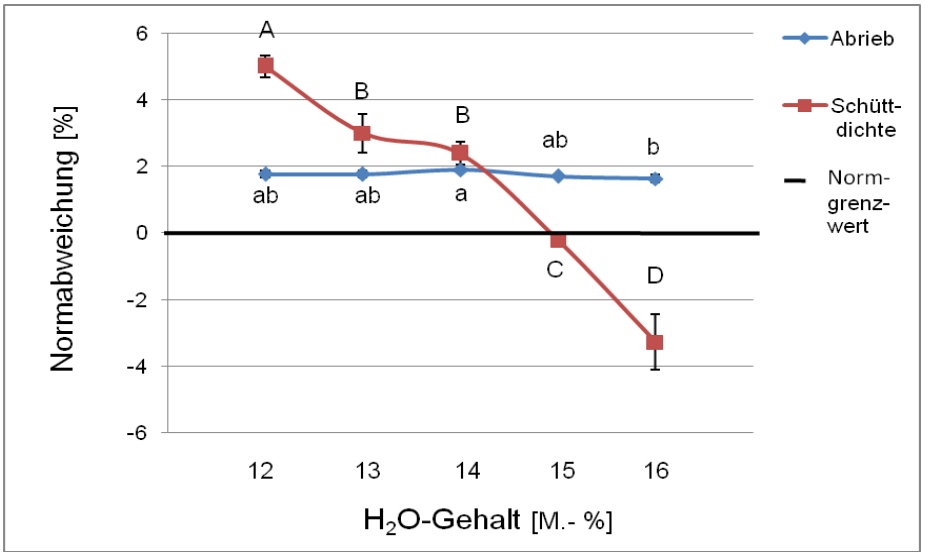

Abb. 34: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Paulownia-Pellets, deren Ausgangsgemisch auf einen Wassergehalt von 12, 13, 14, 15% und 16 M.-% eingestellt wurde in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; A - D und a - b ($p \leq 0{,}05$), n=4

Im Gegensatz zu der Abriebfestigkeit ist bei den Schüttdichten der verschiedenen Varianten eine klare Tendenz zu erkennen. Aus Abbildung 34 geht hervor, dass die Schüttdichte der Pellets bei zunehmendem Wassergehalt des Ausgangsmaterial abnimmt. Mit Ausnahme der Varianten 13 und 14 M.-% war bei höherem Wassergehalt des Gemisches die Schüttdichte der Pellets signifikant geringer. Die Schüttdichten der Varianten 13 und 14 M.-% unterschieden sich nicht signifikant voneinander, waren jedoch geringer als die der Variante 12 M.-% und höher als bei Variante 15 M.-%.

Um die Ergebnisse dieses Versuches auf andere Biomassegemische beziehen zu können, wird in dem 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 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.

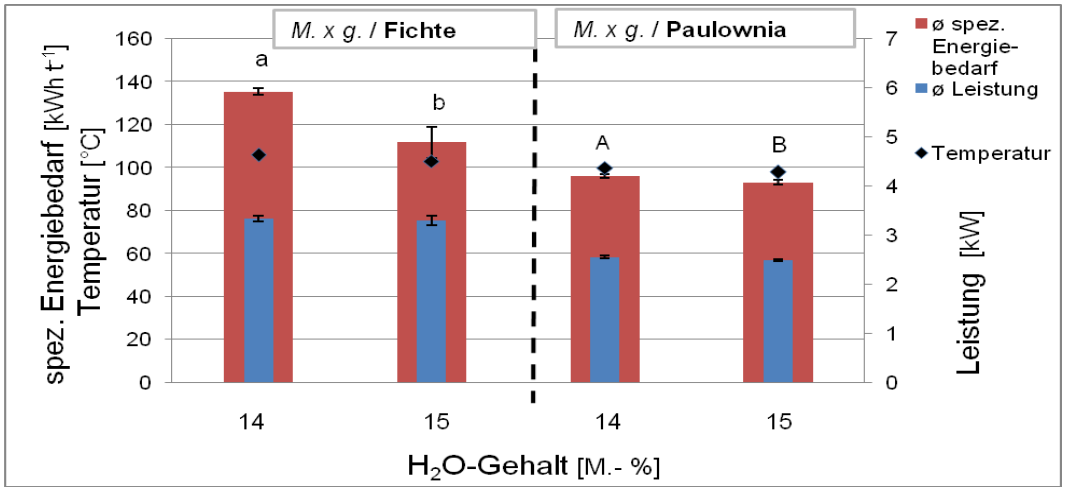

Abb. 35: Spezifischer Energiebedarf, Temperatur der Matrize und Leistungsbedarf, während des Pelletierungsvorganges der Biomassegemische aus *M. x g.* (Kenn) und Paulownia bzw. *M. x g.* und Fichte, mit Wassergehalten von 14 und 15 M.-%. Signifikanz des spezifischen Energie- und Leistungsbedarfes geprüft mit T-Test; A-B bzw. a-b ($p \leq 0{,}05$), n=4

5.3.2 Einfluss der Presskanallänge der Matrize auf die Pelletierung

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

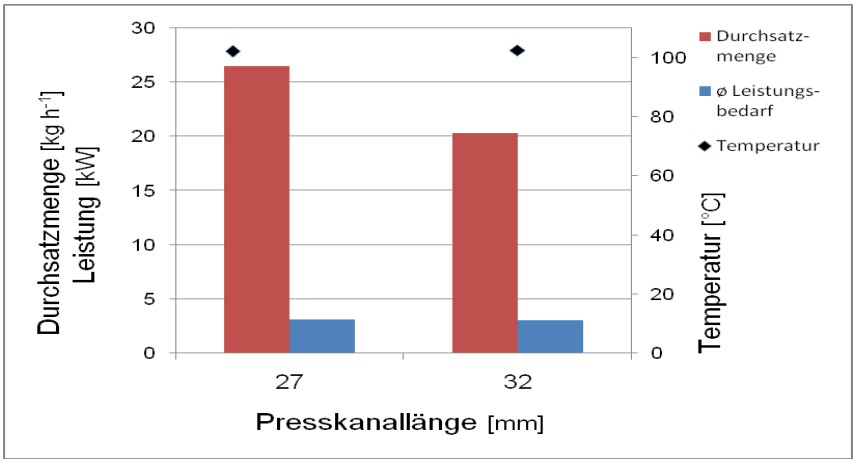

Abbildung 36: Einfluss der Presskanallänge mit 6 mm Lochmatritzen auf die Durchsatzmenge und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Gemisches aus *M. x g.* (Kenn) und Fichte mit einem Wassergehalt von 14 M.-% bei gleichbleibendem Leistungsbedarf.

Abbildung 36 zeigt, dass bei gleichbleibendem Leistungsbedarf die Durchsatzmasse durch eine Verringerung der Presskanallänge erhöht werden kann. Durch diese Erhöhung der Durchsatzmasse wird, wie in Abbildung 37 ersichtlich, der spezifische Energiebedarf signifikant verringert. Die Matrizentemperatur erhöhte sich dabei nur minimal um 1°C.

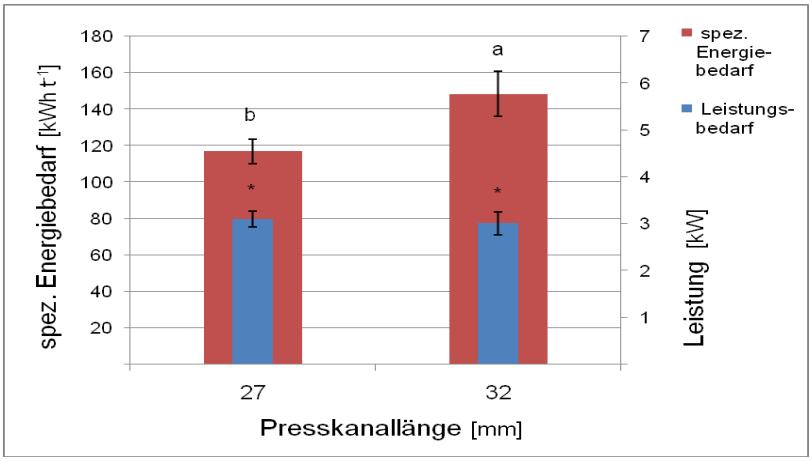

Abbildung 37: Spezifischer Energie- und Leistungsbedarf der Pelletierung eines Miscanthus-Fichten-Gemisches mit zwei 6 mm Lochmatrizen, deren Presskanallängen unterschiedlich waren. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes geprüft mit T-Test; a-b ($p \leq 0{,}05$), * = nicht signifikant, n=4

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

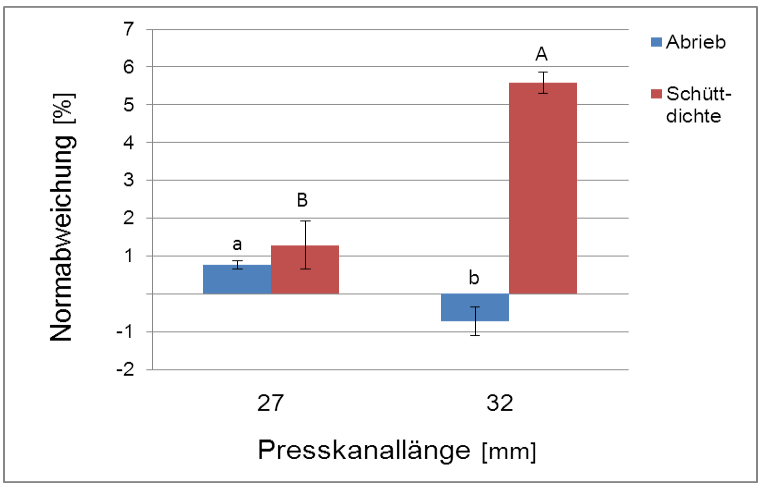

Abb. 38: Schüttdichte und Abriebfestigkeit der Miscanthus-Fichten-Pellets, die mit zwei 6 mm Lochmatrizen pelletiert wurden, deren Presskanallängen unterschiedlich waren, in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit T-Test; A - B und a - b ($p \leq 0{,}05$), n=4

Die Reduktion der Presskanallänge hatte neben dem Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf und die Durchsatzleistung zur Folge, dass die Abriebfestigkeit der Pellets signifikant abnahm und unter den Normgrenzwert sank. Gleichzeitig erhöhte sich die Schüttdichte signifikant.

5.3.3 Einfluss der Durchsatzes auf den Prozessschritt der Pelletierung

In den folgenden beiden Abbildungen ist dargestellt, wie sich eine Erhöhung der Durchsatzmasse, auf die Qualität der Pelletierung auswirken kann. Abbildung 39 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 Erhöhung des Durchsatzes von 20,7 auf 26,7 kg h^{-1} (29%) erhöhte den Leistungsbedarf signifikant um 9% und verringerte gleichzeitig den spezifischen Energiebedarf signifikant von 114 auf 96 kWh t^{-1} (16%). Durch diese Durchsatzveränderung erhöhte sich auch die Matrizentemperatur von 99°C auf 101°C.

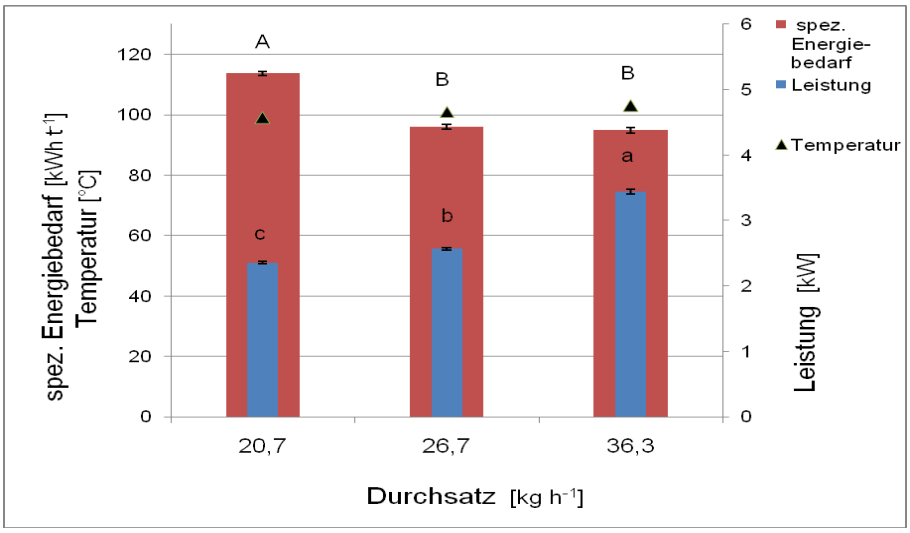

Abbildung 39: Spezifischer Energiebedarf, Leistungsbedarf und Matrizentemperatur während der Pelletierung eines Miscanthus- Paulownia-Gemisches und einem Tresterzuschlag von 1% mit 14% Wassergehalt in Abhängigkeit des Durchsatzes. Signifikanz des spezifischen Energiebedarfes und Leistungsbedarfes geprüft mit Tukey-Test; A - B und a - c ($p \leq 0,05$), n=4

Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes um 35% auf 36,3 kg h^{-1} ließ den Leistungsbedarf um 34% signifikant auf 3,7 kWh ansteigen. Durch diesen mit der Durchsatzerhöhung linearen Anstieg der Leistung veränderte sich der spezifische Energiebedarf nicht. Jedoch war eine Erhöhung der Temperatur auf 103°C abzulesen.

Weiterhin war 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 einhielten. Aus Abbildung 40 geht hervor, dass die Variante mit dem geringsten Durchsatz die besten Werte erreichte. Die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Variante mit dem höchsten Durchsatz waren signifikant schlechter als die mit dem geringsten Durchsatz.

Die Schüttdichte der mittleren Variante lag signifikant unterschiedlich zwischen den anderen jedoch unterschied sich die Abriebfestigkeit nicht von den anderen beiden.

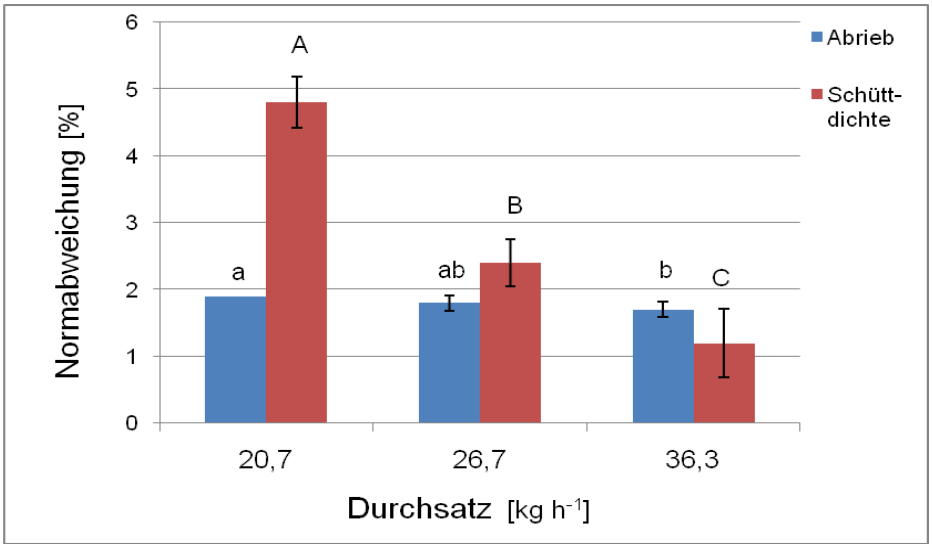

Abb. 40: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Miscanthus-Paulownia-Pellets, die bei unterschiedlichen Durchsatzmassen pelletiert wurden in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - b und A - C ($p \leq 0{,}05$), n=4

5.4 Brennstoffeigenschaften ausgewählter Biomassen

In dem folgenden Kapitel werden die Analyseergebnisse der verbrennungsrelevanten Eigenschaften (Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und Ascheerweichungstemperatur) der verschiedenen Biomassen dargestellt.

5.4.1 Brennstoffeigenschaften von *Miscanthus x giganteus*

Tabelle 19 beschreibt den Aschegehalt und den Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Typ, Erntejahr und Standort. Abbildung x die Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte dieser Varianten. Es geht hervor, dass der Misc. 17 aus dem Erntejahr 2010 mit 1,6% einen niedrigeren Aschegehalt und einen höheren Brennwert (19,3 MJ kg^{-1}) hat als der gleiche Miscanthus aus dem Folgejahr (2,8% und 19,3 MJ kg^{-1}). Außerdem ist zu erkennen, dass Miscanthus CKA 34, der auf dem gleichen Standort angebaut wurde wie der Miscanthus 17, einen nahezu identischen Aschegehalt und einen etwas höheren Brennwert hatte als Miscanthus 17.

Tabelle 19: Aschegehalt und Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Typ, Erntejahr und Standort

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

Dagegen zeigte der Miscanthus von dem acht jährigen 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 EN 14961-2 A2 (siehe Abbildung 41), so wird deutlich, dass alle Typen höherer Schwefel- und Chlorgehalte aufweisen als die Norm zulässt. Bei allen vier Typen wurde ein Schwefelgehalt von 0,1 M.-% festgestellt. Der Miscanthus von dem Standort Kenn hatte im Vergleich zu den anderen drei Typen den geringsten Chlorgehalt. Dieser lag nur 0,01 M.-% über dem Norm Grenzwert von 0,02 M.-%. . Die Chlorgehalte der übrigen Varianten lagen zwischen 0,08 und 0,12 M.-%. Die Stickstoffgehalte aller Varianten lagen mit maximal 0,3 M.-% unterhalb des Norm-Grenzwertes von 0,5 M.-%.

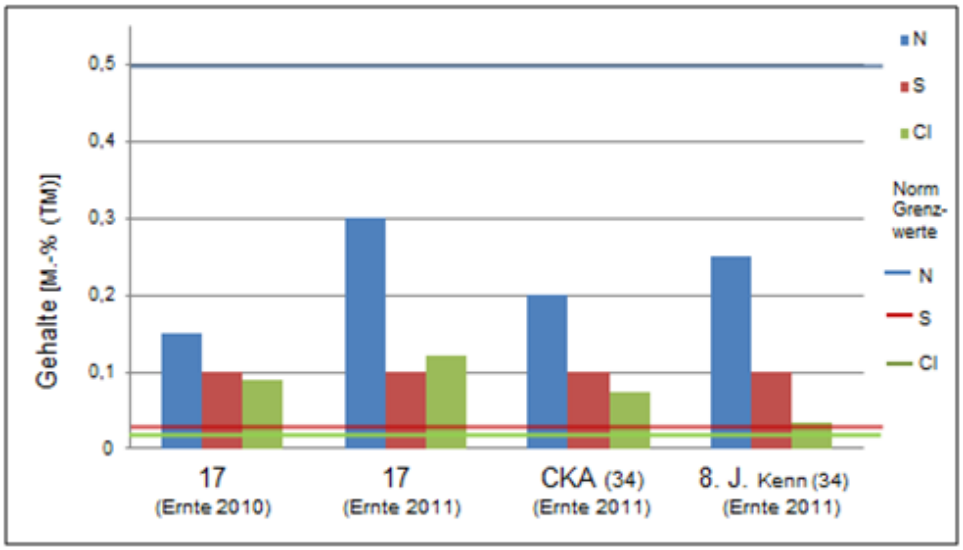

Abb. 41: Vergleich der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Standort, Genotyp und Erntejahr in Relation zu der Pelletnorm EN 14961-2 (A2)

Die Analysen des Ascheschmelzverhaltens von Miscanthus 34 Kenn 8. J. zeigte, dass der Ascheschmelzpunkt (DT) bei 1.180°C (nach Formfaktor Methode) bzw. 1.020°C (nach optischer Methode) lag.

5.4.2 Brennstoffeigenschaften von *Paulownia tomentosa*

Die Tabelle 20 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 20: Asche-, Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt, Brennwert und DT von *Paulownia tomentosa* in Abhängigkeit des Untersuchungslabors im Vergleich zu *Miscanthus x giganteus* (Kenn).

Biomasse	**Paulownia**	**Paulownia**	**Miscanthus** Kenn 8 J.
Parameter	**Labor I**	**Labor II**	**Labor I**
Aschegehalt [M.-% (TM)]	0,76	0,75	-
Stickstoffgehalt [M.-% (TM)]	0,35	0,5	0,25
Schwefelgehalt [M.-% (TM)]	0,1	0,037	0,1
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 Chlorgehaltsanalysen von *Paulownia tomentosa* der beiden Labore, so wird ersichtlich, dass diese deutlich von einander abweichen. Zusätzlich geht aus Tabelle 19 hervor, dass 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 waren ebenfalls mit 19,4 MJ kg^{-1} einheitlich. Die hauseigene Brennwertanalyse von Paulownia ergab dagegen einen mittleren Brennwert von 19,1 MJ kg^{-1}.

Die mittels LEM bestimmte Ascheschmelztemperatur von Paulownia betrug 1.290°C (nach optischer Methode) bzw. 1.340°C (nach Formfaktor Methode) und war somit knapp 300°C höher als der von Miscanthus.

5.4.3 Brennstoffeigenschaften von Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia

Die Tabelle 21 beschreibt die Ergebnisse, der in Labor I durchgeführte 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.-%), Stickstoffgehalt (0,3 M.-%) und den Brennwert (19,3 MJ kg^{-1}) konnten die Mischpellets die Anforderungen der Pelletnorm erfüllen. Dagegen war der Schwefel- und Chlorgehalt der Pellets deutlich über den Grenzwerten der Pelletnorm.

Tabelle 21: 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.-% im Vergleich zu der Pelletnorm EN 14961-2 A2, * Umrechnung Heizwert (Hu) zu Brennwert nach KALTSCHMITT et al. (2009)

	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 dem Miscanthus und knapp 400°C unter der DT von Paulownia lag (siehe Abb. 42). Die Analyseergebnisse nach Formfaktor-Methode lagen bei allen drei Varianten zwischen 50 und 140°C über den Werten nach optischer Methode. Jedoch wurde auch bei der Bestimmung der Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets nach Formfaktor-Methode der Grenzwert von 1.100°C nicht erreicht.

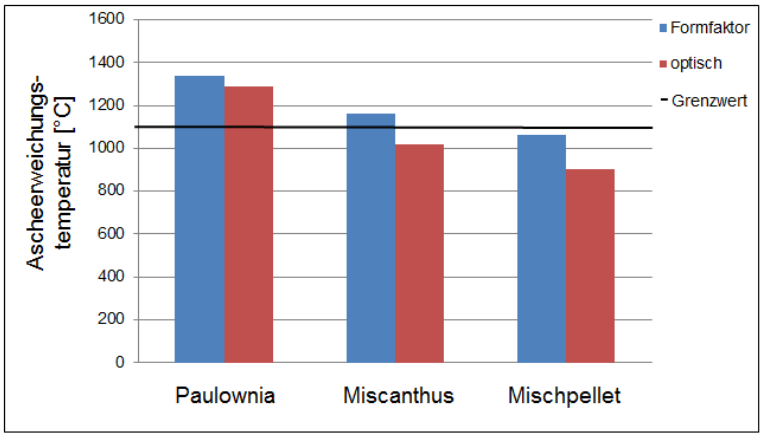

Abb. 42: Ascheerweichungstemperaturen von *Paulownia tomentosa* und *Miscanthus x giganteus* (34 Kenn 8. J.) von Mischpellets aus den beiden Biomassen

5.5 Versuch zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperaturen der Pellets durch die Beimischung von Kaolin

Am Beispiel von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets sollte gezeigt werden, wie sich eine Kaolinzugabe auf das Ascheerweichungsverhalten von Miscanthus-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 selbe Gemisch in unpelletierter Form und die Asche des Gemisches, der erst nach Veraschung das Kaolin beigemischt wurde.

Abbildung 43 verdeutlicht, wie bei den verschiedenen Gemischformen eine Erhöhung der Kaolinbeimischung die DT verändert

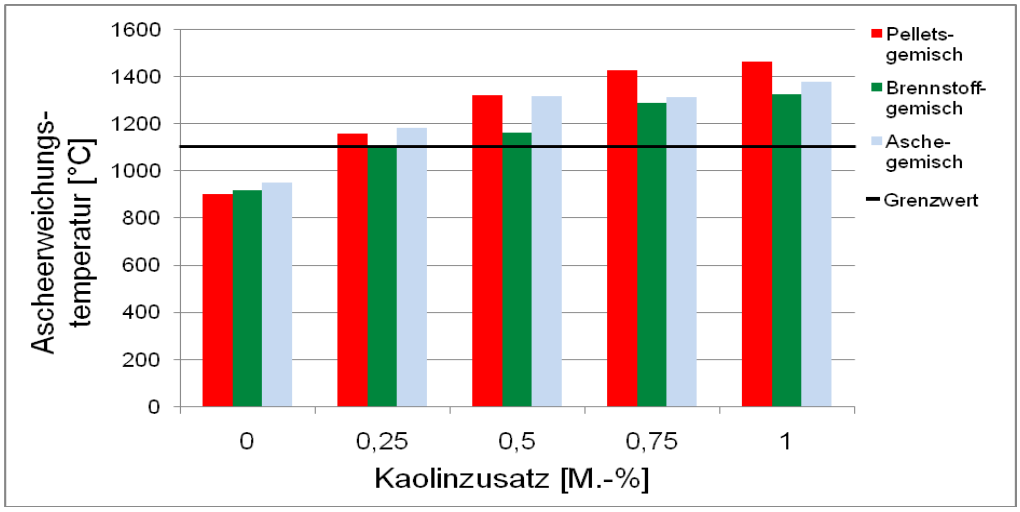

Abbildung 43: Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia-Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN_{plusA2} Pellets

Durch die optische Bestimmung der DT der verschiedenen Varianten mittels LEM stellte sich heraus, dass eine Erhöhung des Kaolinzusatzes bei jeder Gemischform eine höhere DT hervorrief. Die DT der verschiedenen Gemischformen ohne Kaolin lagen bei 900°C bis 950°C. Schon die Zugabe von 0,25 M.-% Kaolin führte – je nach Gemischform – zu einem Anstieg der DT auf 1100°C bis 1180°C, sodass der Grenwert der EN_{plusA2} erreicht wurde. Die höchsten Ascheerweichungstemp-eraturen hatten die drei Gemischformen, welchen 1 M.-% Kaolin beigemischt wurde (1320°C – 1450°C). Mit Ausnahme der Variante 0 M.-% Kaolin hatte die Variante Brennstoffgemisch bei allen Varianten eine niedrigere DT als die anderen beiden Gemischformen. Zur weiteren statistischen Absicherung der Daten wurden die Mittelwerte der DT der verschiedenen Gemischformen bei jeder Kaolinzusatzvariante gebildet, sodass jede Form eine Wiederholung darstellte. Die folgende Abbildung stellt diese Mittelwerte in Relation zu dem Grenzwert der EN_{plusA2} dar.

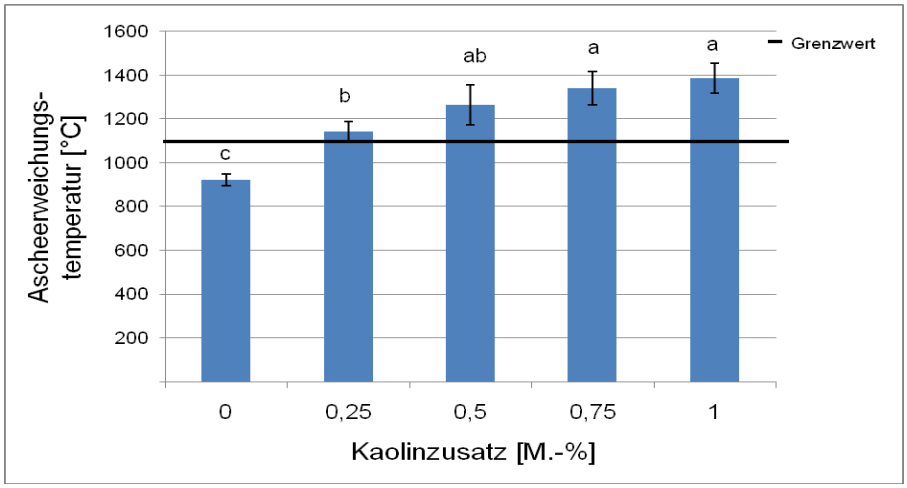

Abbildung 44: Mittelwerte der Ascheerweichungstemperaturen von verschiedenen Miscanthus-Paulownia- Gemischformen mit unterschiedlich hohen Kaolinzugabemengen in Relation zu dem Grenzwert von EN_{plusA2} Pellets. Signifikanz der Ascheerweichungstemperaturen geprüft mit Tukey-Test; a - c ($p \leq 0,05$), n=3

Aus der Zusammenfassung der Ergebnisse in Mittelwerte wird deutlich, dass die in der vorherigen Abbildung dargestellte Erhöhung der DT durch eine 0,25 prozentige Zugabe von Kaolin signifikant ist. Desweiteren zeigt sich auch, dass die Variante 0,75 M.-% und 1 M.-% signifikant die höchste DT hervorriefen. Die Variante 0,5 M.-% unterschied sich nicht von den anderen Varianten, denen Kaolin zugegeben wurde und deren DT lag mit 1.280°C im Mittelfeld der Werte.

5.6 Pelletierungspraxisversuch bei Amandus Kahl

In dem folgenden Abschnitt werden zuerst die Ergebnisse des Vorversuches aus Kapitel 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 der Durchsatzleistung, der visuellen Qualität der Pellets und des spezifischen Energiebedarfes.

5.6.1 Vorversuch - Pelletierung - bei Amandus Kahl

Aus der folgenden Tabelle (Versuchsnr. 1 – 5) und Abbildung 45 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 hervorrief. Desweiteren zeigen die Versuchsnummern 6 – 9 welche Presskanalverhältnisse für die Pelletierung des Gemisches aus Fichte und Miscanthus geeignet waren.

Tabelle 22: Visuellen Qualität und Temperatur der Pellets (T_P) aus den beiden Gemischen von *M. x g.* und Paulownia bzw. *M. x g.* (Kenn) und Fichte mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin die während des Vorversuches produziert wurden, in Abhängigkeit von Durchsatz bzw. Presskanalverhältnis

Nr.	Variante	Biomasse	d_{Loch} : $L_{Presskanal}$	Durchsatz [kg h^{-1}]	Visuelle Qualität	T_P [°C]
1	2	*M. x g.* + *P. t.* + K	1 : 7	250	**3**	**80**
2	2	*M. x g.* + *P. t.* + K	1 : 7	290	**3**	**86**
3	2	*M. x g.* + *P. t.* + K	1 : 7	350	**2**	**91**
4	2	*M. x g.* + *P. t.* + K	1 : 7	385	**2**	**93**
5	2	*M. x g.* + *P. t.* + K	1 : 7	400	**1**	**95**
6	4	*M. x g.* + Fichte + K	1 : 7	350	**-**	**-**
7	4	*M. x g.* + Fichte + K	1 : 6	350	**-**	**-**
8	4	*M. x g.* + Fichte + K	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 diesem Punkt, an welchem der Leistungsbedarf der Pelletierung knapp 90% der maximalen Nennleistung des Elektromotors beträgt (siehe Abbildung 45).

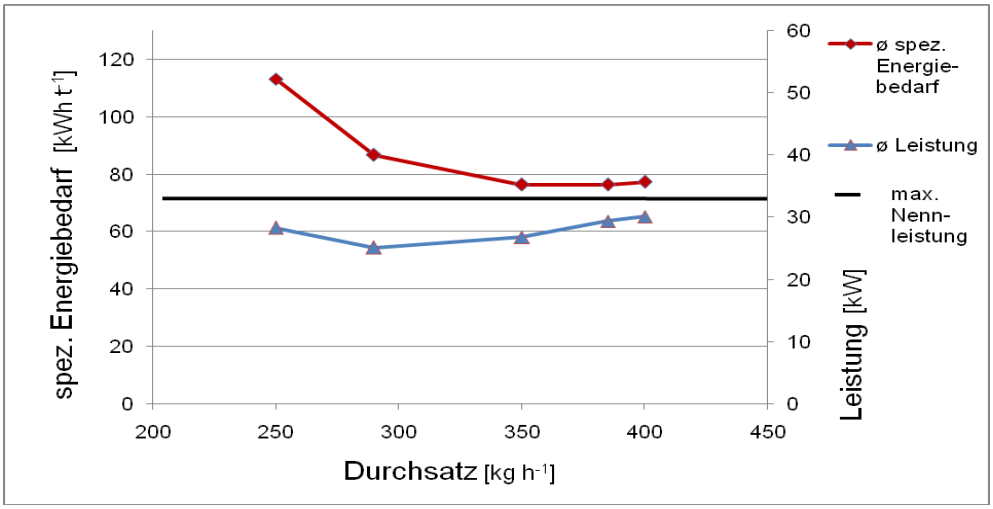

Abbildung 45: Spezifischer Energiebedarf und Leistungsbedarf der Pelletierung des Gemisches *M. x g.* (Kenn) und *P. tomentosa* mit einem Zuschlag von 0,3% Kaolin bei verschiedenen Durchsätzen

Bei der Pelletierung des Gemisches aus Miscanthus und Paulownia zeigte sich, dass die Versuchsnummer 4 die beste Pelletqualität (siehe Abbildung 46) bei möglichst hohem Durchsatz (385 kg h^{-1}) und möglichst geringstem spezifischen Energiebedarf (76 kWh t^{-1}) hatte.

Abbildung 46: Optimierte Miscanthus-Paulownia-Mischpellets, die unter den in Tabelle 12 (Versuchsnummer 4) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden (WENGHOEFER, 2012)

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 22 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 wiesen eine gleichmäßige Form mit einer sehr gut verglasten Oberfläche auf (siehe Abbildung 47).

Abbildung 47: Miscanthus-Fichten-Mischpellets, die unter den in Tabelle 12 (Versuchsnummer 9) dargestellten Bedingungen während des Vorversuches bei Amandus Kahl produziert wurden (WENGHOEFER, 2012)

5.6.2 Hauptversuch - Pelletierung – bei Amandus Kahl

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 zeigte sich, dass die Pelletierung der Variante Miscanthus und Paulownia ohne Kaolin mit 72 kWh t^{-1} den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf hatte. Der spezifische Energiebedarf der Pelletierung der Variante Paulownia bzw. Fichte mit Miscanthus und Kaolin unterschied sich nicht signifikant von einander. Dieser lag 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.

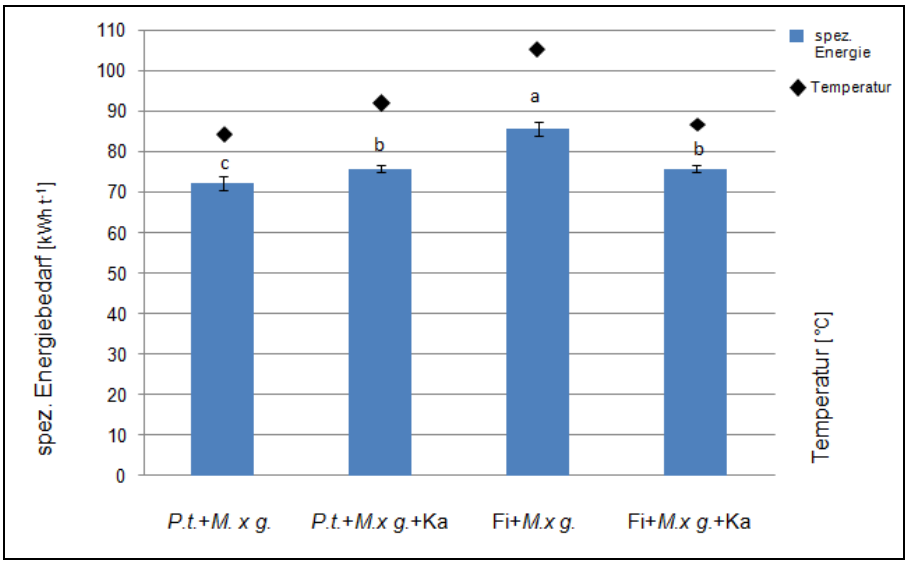

Abbildung 48: Spezifischer Energiebedarf der Pelletierung und Pellettemperatur der in Tabelle 12 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl

Die Analyseergebnisse der Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Pellets, die während des Hauptversuches produziert wurden, sind in der Abbildung 49 aufgezeigt. Von allen vier Varianten hatte die Variante *M. x g.* und Fichte ohne Kaolinbeimischung (Fi + *M. x g.)* die besten physikalische Eigenschaften, da sowohl die Abriebfestigkeit und Schüttdichte über den Anforderungen der Norm lagen. Die Variante *M. x. g.* und Paulownia mit Kaolinbeimischung (*P. t.* + *M. x g*. + Ka) erfüllte ebenfalls die Anforderungen der Pelletnorm, allerdings war 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 erfüllten nicht die beiden physikalischen Anforderungen der Pelletnorm.

Dabei zeigte die Varianten 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 lagen, hatte die signifikant geringste Schüttdichte.

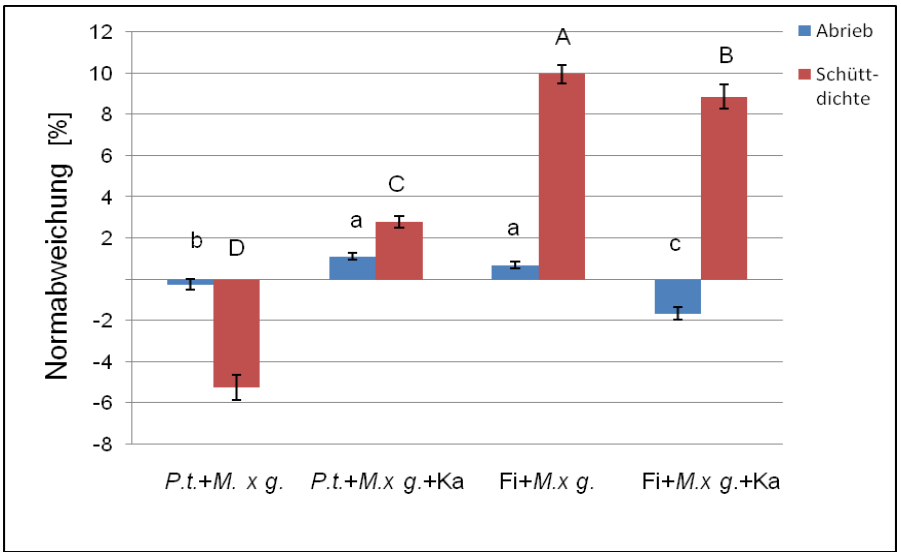

Abbildung 49: Abriebfestigkeit und Schüttdichte der der in Tabelle 12 dargestellten Pelletvarianten des Hauptversuches bei Amandus Kahl in Relation zu dem Normgrenzwert. Signifikanz der Schüttdichte und Abriebfestigkeit geprüft mit Tukey-Test; a - c und A - D ($p \leq 0{,}05$), n=4

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

5.7 Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

5.7.1 Gewinn und interne Rendite

Die Ermittlung des jährlichen Gewinnes der geplanten Mischpelletproduktion ergab bei einer theoretischen Produktionsmenge von 10.000 t a^{-1}, Produktionskosten von rund 1,84 Mio. € und einem Erlös von 1,61 Mio. €.

Bei einem statischen Preisniveau der Produktionskosten und Erlöse ergab die Gewinnrechnung, dass die Unternehmung einen jährlichen Verlust von 238.127 € erwirtschaften würde (siehe Abbildung 50).

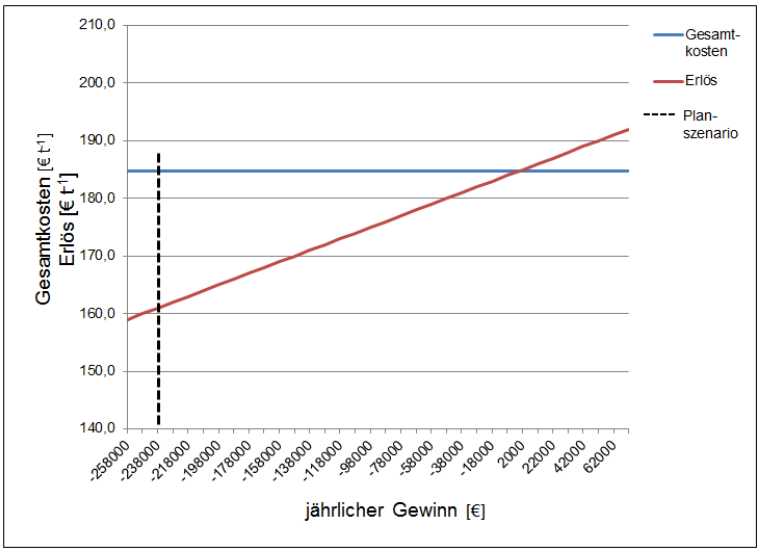

Abbildung 50: Gewinn der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von konstanten Gesamtkosten und variierendem Erlös in Relation zu dem Planszenario

Neben dem jährlichen Verlust der geplanten Unternehmung verdeutlicht die vorab dargestellte Graphik, dass bei gleichbleibenden Gesamtkosten der Marktpreis der Pellets mindestens 184,4 € t^{-1} betragen muss, damit die Gewinnschwelle erreicht wird. Dies entspricht einer Marktpreissteigerung von knapp 15% je Tonne Mischpellets. Die interne Rendite des geplanten Szenarios betrug somit -12,9%.
Die folgende Abbildung soll verdeutlichen, wie hoch der Gewinn sein muss um eine bestimmte Rendite für die geplante Unternehmung zu erzielen.

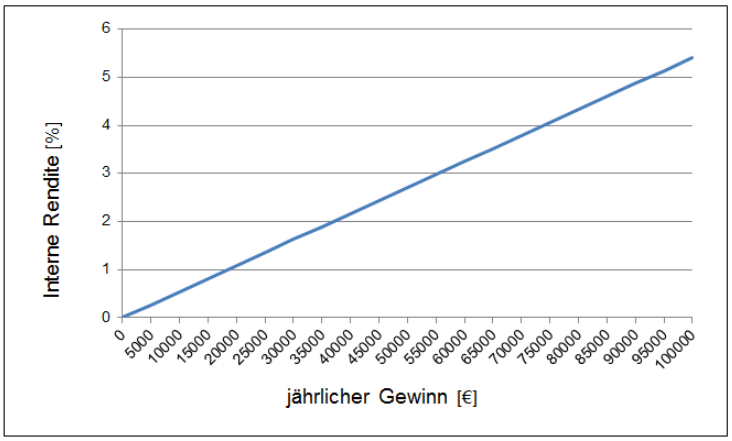

Abbildung 51: Interne Rendite der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit des jährlichen Gewinnes

In Abbildung 51 zeigt sich, 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. € aufweisen.

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

5.7.2 Sensitivitätsanalyse

Kosten

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

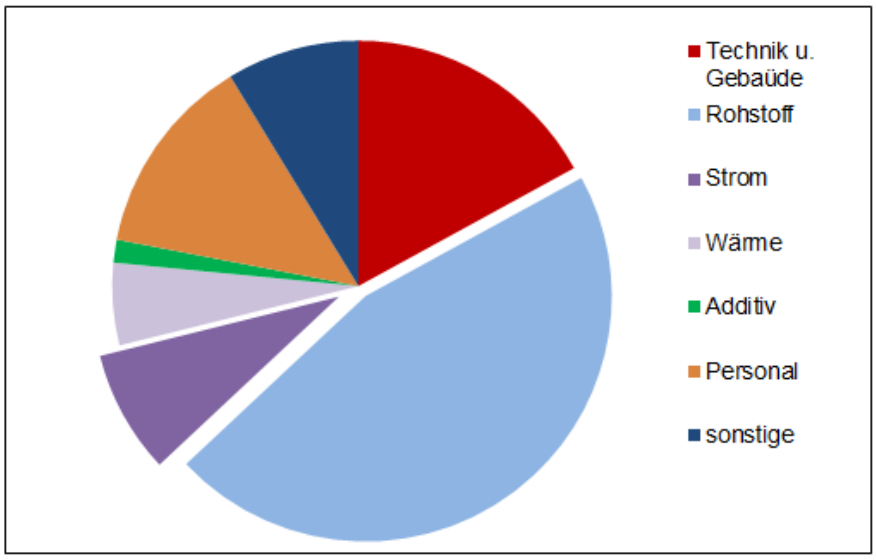

Abbildung 52: Anteil der verschiedenen Kostenpositionen an den Gesamtkosten der geplanten Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

Bei näherer Analyse der Kosten wird ersichtlich, dass knapp die Hälfte der Gesamtkosten aus Rohstoffkosten bestehen. Desweiteren ist der Kostenfaktor Energie mit 15 € pro Tonne Mischpellets ein weiterer bedeutender Kostenfaktor.

Die folgenden beiden Abbildungen sollen verdeutlichen, in wie weit sich, bei gleichbleibendem Erlös und konstanten sonstigen Gesamtkosten, die Rohstoffkosten bzw. Energiekosten verringern müssten, damit der kritische Wert erreicht wird.

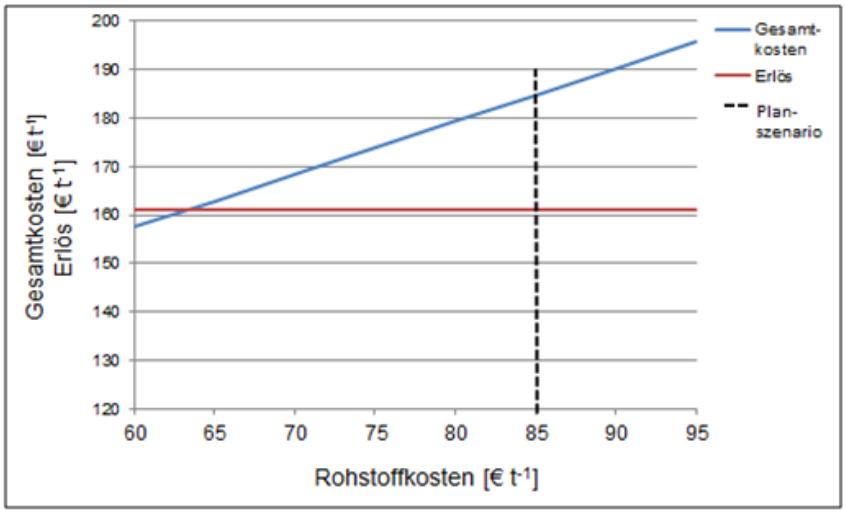

Abbildung 53: Ermittlung des kritischen Wertes (Gewinnschwelle) des Planszenarios der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit von variierenden Rohstoffkosten und einem konstanten Erlös

In Abbildung 53 zeigt sich, dass die Rohstoffkosten um 25% auf 63,5 € t^{-1} sinken müssten, damit der kritische Wert, der die Gewinnschwelle darstellt, erreicht wird.

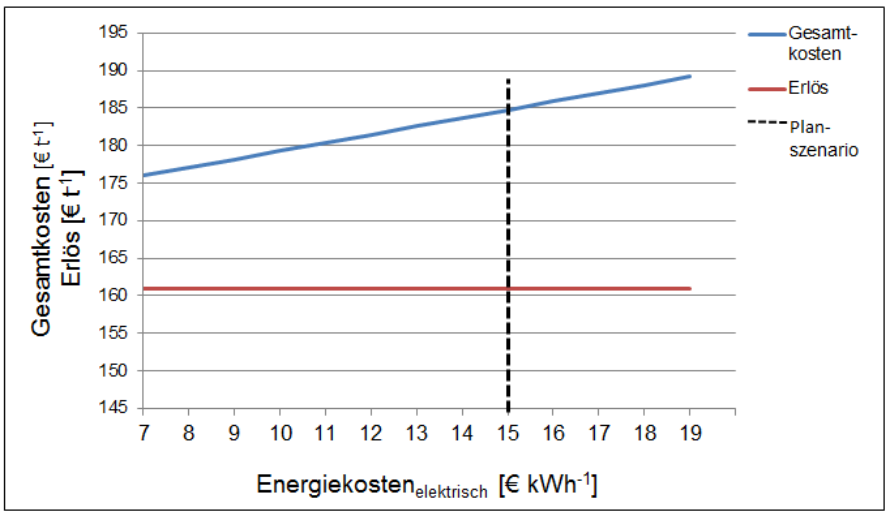

Abbildung 54: Gesamtkosten der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion in Abhängigkeit der elektrischen Energiekosten bei konstantem Erlös

Aus Abbildung 54 geht hervor, 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 angenommen Marktpreis der Mischpellets bestimmt. Wie in Abbildung 55 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.

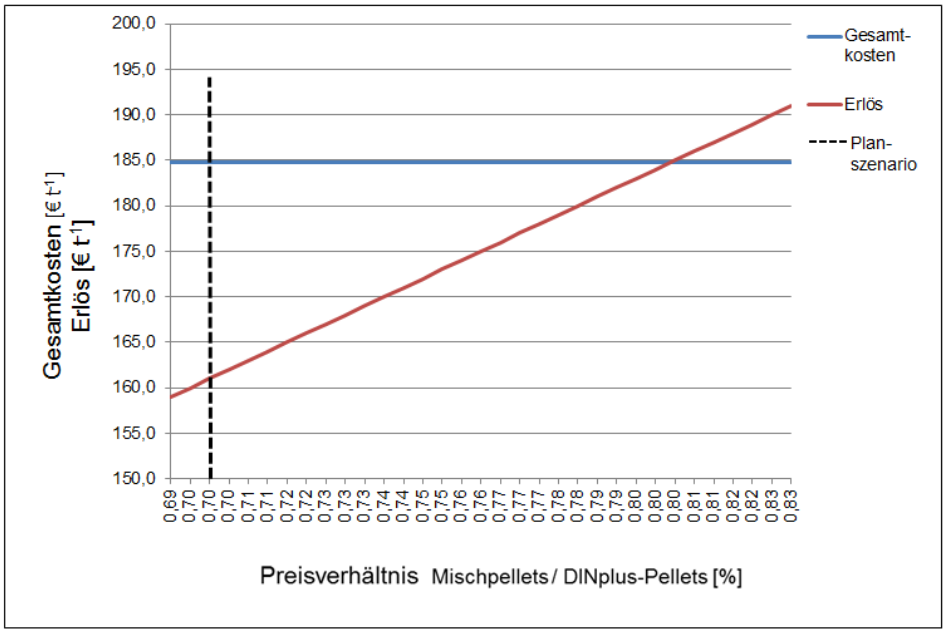

Abbildung 55: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

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 nachfogende 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.

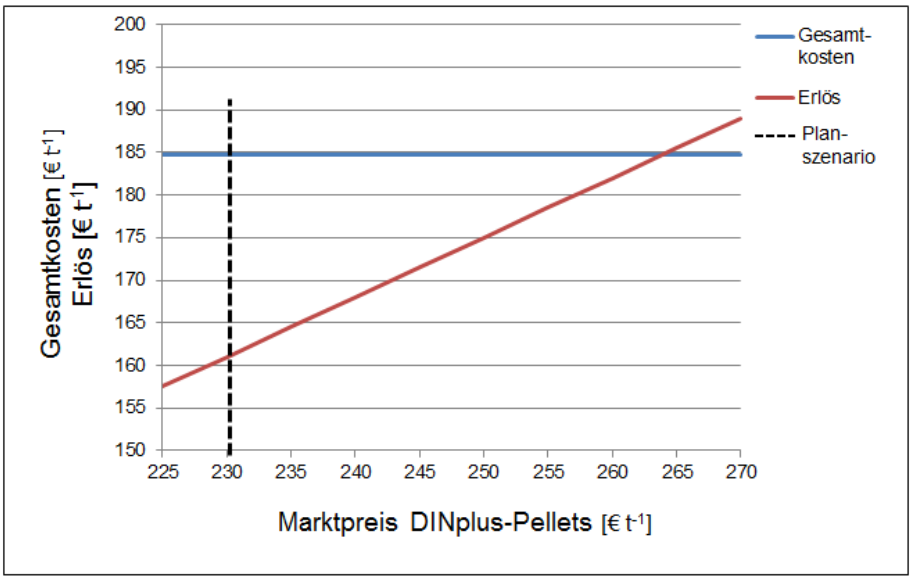

Abbildung 56: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion

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.

6. Diskussion der Ergebnisse und deren Bedeutung für die Mischpelletproduktion

In Kapitel 1 und 3.4 wurde bereits aufgezeigt, dass die Produktion von Quallitätspellets aufgrund einer Rohstofflücke von Sägerestholz einem enormen Kostendruck ausgesetzt ist. Diese Rohstofflücke wird sich vermutlich - bei einer weiteren Steigerung der Produktionsmenge von Qualitätspellets - weiter vergrößern.

Aus diesem Grund war das übergeordnete Ziel des Projektes, durch eine anteilige Substitution des Fichtenholzes durch Miscanthus diese weiter anwachsende Rohstofflücke zu schließen.

Das folgende Kapitel erläutert, wie die Ergebnisse der zahlreichen Versuche zustande kamen und setzt diese in Kontext zu Erkenntnissen aus vorhergegangenen Untersuchungen anderer Autoren. Abschließend wird jeweils dargelegt, welche Bedeutung die einzelnen Ergebnisse für eine potentielle Mischpelletproduktion haben und ob MiscanthusMischpellets ein geeignetes Substitut für die Produktion von Quallitätspellets sind.

6.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen sollen im Folgenden Aussagen über die Auswahl geeigneter *Miscanthus x giganteus* Typen, Mischungspartner und Presshilfsstoffe getroffen werden. Diese Vorabbeurteilungen erfolgten anhand des Aschegehaltes und den Pelletierungseigenschaften.

6.1.1 Aschegehalte der Mischungspartner für die Pelletproduktion

Der Aschegehalt war zu Beginn der Untersuchungen zur Identifikation von geeigneten Biomassen für die Mischpelletproduktion der wichtigste Parameter. Zum einen können zu hohe Aschegehalte zu mechanischen Problemen während der Verbrennung führen (KALTSCHMITT et al., 2009). Zum anderen ist der Aschegehalt in Biomassen ein Indiz für die Gehalte von verbrennungskritischen Elementen wie Stickstoff, Chlor oder Schwefel (FRITZ und FORMOWITZ, 2009).

6.1.1.1 Aschegehalte von *Miscanthus x giganteus*

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

Lehrbücher und Veröffentlichungen weisen immer noch darauf hin, dass die Aschegehalte von *Miscanthus x giganteus* in der Regel zwischen 2,6 und 3,9% liegen (KALTSCHMITT et al., 2009.; FRITZ und FORMOWITZ, 2009; KRISTÖFEL und WOPIENKA, 2012). Dagegen hatte ein untersuchter Typ (Misc. 17 (2010), siehe Abb. 14) einen Aschegehalt von 1,6%. Die Untersuchungsergebnisse deckten sich – im Gegensatz zu Lehrbüchern – mit einigen neueren Veröffentlichungen. So zeigten STOLZENBURG und MASTEL (2010) oder auch SCHWARZ und RAUTENBERG (2011), dass *Miscanthus x giganteus* Aschegehalte von 1,5% – 2% aufweisen kann.

Einfluss des Erntezeitpunktes und Bedeutung des Blatt- / Stängelverhältnisses

BAXTER et al. (2012) beschreiben, dass der Erntezeitpunkt einen sehr hohen Einfluss auf den Aschegehalt hat. Dabei gilt, dass spätere Erntezeitpunkte zu niedrigere 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, die wiederum negative Auswirkungen auf die Verbrennungseigenschaften von Miscanthus haben. Dazu stellten 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 Chlorgehalt sein kann. Diese Annahme bestätigt die Veröffentlichung von RÖHRICHT et al. (2002). Im Rahmen der Untersuchungen von RÖHRICHT et al. (2002) wurde Miscanthus mit einem Trockenmassegehalt von 66% 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. Im Besonderen untersuchte dieser, in dem Jahr 2012, die verschiedenen *M. x g.* Genotypen des Standortes CKA. Somit kann bestätigt werden, dass das Blatt- / Stängelverhältnis der Ausschlag gebende Grund für die Unterschiede der Aschegehalte war. In vorliegender Arbeit wurde der Faktor Erntezeitpunkt durch eine zeitgleiche Beerntung der Flächen im April des jeweiligen Jahres ausgeschlossen.

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

Einfluss des Bestandesalters und des Erntejahres

In Abbildungen 14 und 16 (siehe Kapitel 5.1.1.1) wurde aufgezeigt, dass die Aschegehalte eines *M. x g*.- Typs je nach Erntejahr 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 Bestandesalter beeinflusst wird. Bei nähergehender Betrachtung der eigenen Ergebnisse kann diese These nicht gänzlich aufrechterhalten werden. Am Beispiel der Miscanthusbestände in Kenn, die sich im Bestandesalter unterschieden (siehe Abb. 16 Kap. 5.1.1.1), 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 16 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 haben. Diese Vermutung wird durch die Untersuchungen von ATIENZA et al. (2003) gestützt, da diese ebenfalls annahmen, 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 hat als das Bestandesalter lässt sich aus Abbildung 17 ableiten, da über alle Typen hinweg bei steigendem Bestandesalter der Aschegehalt nicht immer abnahm. Der weitere Anstieg der Aschegehalte über die Jahre kann damit erklärt werden, dass im Winter 2010/2011 eine sehr lang anhaltende Schneebedeckung einen Windschutz bildete, der den Blattfall reduzierte. Zusätzlich könnte 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 dazu war der Herbst / Frühwinter 2011/2012 überdurchschnittlich warm (ANONYMUS 5, 2012), was vermutlich eine nur in begrenzten Maße stattgefundene 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 beobachten CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2000), dass höhere Temperaturen (8 - 12°C) diese Abreife einschränken kann.

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 des Projektes 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 Bestandesalter beeinflusst wurden.

Einfluss des Genotyps auf den Aschegehalt

Derzeit ist eines der Hauptthemenfelder der Miscanthusforschung 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 unterschieden. Die höchsten Schwankungen des Aschegehaltes der drei Genotypen innerhalb eines Jahres lag bei einer Differenz von 0,4%. Auch CLIFTON-BROWN und LEWANDOWSKI (2002) untersuchten fünf verschiedene *Miscanthus x giganteus*-Genotypen. Aus deren Analyseergebnissen lassen sich ähnlich hohe Schwankungen im Aschegehalt feststellen.
Im Allgemeinen sind diese Unterschiede vermutlich auf morphologische Unterschiede zurück zu führen, wobei das Blatt- / Stängelverhältnis, dabei das wichtigste Kriterium darstellt. Sowohl PUDE (2005), als auch SUSSYK (2012) untersuchten die gleichen Genotypen und stellten dabei fest, dass sich diese in ihrer Morphologie tendenziell unterschieden. 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 aufwies. 2010 und 2011 erfolgte jedoch keine Bestimmung des Blatt- / Stängelverhältnisses, sodass nicht geklärt werden konnte, durch was der Aschegehalt beeinflusst wurde. Erst 2012 untersuchte SUSSYK (2012) das Blatt- / Stängelverhältnis dieser Genotypen. Dabei zeigte sich, dass der 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. Dennoch kann festgehalten werden, dass der Genotyp einen Einfluss auf die Eignung von Miscanthus für die thermische Verwertung hat.

Aus diesem Grund sollten zukünftige Forschungsarbeiten, in Hinblick auf die verbrennungstechnischen Merkmal, 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.

Einfluss des Standortes

Der Einfluss des Standortes auf den Aschegehalt 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 KIRCHNER (1997); LEWANDOWSKI und HEINZ (2003).

Die in Kapitel 5.1.1.1 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 Düngeversuchen 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. Viel mehr ist zu vermuten, dass unterschiedliche Witterungsbedingungen und Bodenfeuchtebedingungen zu diesen Unterschieden führten (LEWANDOWSKI und HEINZ, 2003).

Bedeutung der Ergebnisse für die Auswahl eines geeigneten Miscanthus-Typs und für eine potentielle Miscanthus-Mischpelletproduktion

Für das Projekt “C4-Kompakt“ wurde für den weiteren Verlauf 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 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 ein realistischer Aschegehalt von *Miscanthus x giganteus*, welcher durch die Faktoren Erntejahr, Standort, Genotyp und Bestandesalter beeinflusst wird, in Höhe von 2 bis 2,5 M.-% angenommen werden kann. Weiterhin fasst die folgende Tabelle die eigens ermittelten Schwankungsbreiten der Aschegehalte in Abhängigkeit zu den jeweiligen Einflussfaktoren

Zusätzlich sind in dieser Tabelle aus anderen Untersuchungen Schwankungsbreiten des Aschegehaltes, in Abhängigkeit des Einflussfaktors dargestellt.

Tabelle 23: Vergleich von Schwankungsbreiten der Einflussfaktoren, des Aschegehaltes von *Miscanthus x giganteus* der eigenen Untersuchungen mit Literaturwerten

Faktor	Schwankungsbreite eigene Untersuchungen [%]	Schwankungsbreite Literatur [%]
Erntejahr	**75**	72 [1] ; 53 [2] ; 30 [3]
Standort	**52**	60 [3]
Genotyp	**44**	10 [2]
Bestandesalter	**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 keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden, welcher Faktor am stärksten den Aschegehalt beeinflusst. Generell zeigte sich, 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 Bestandesalter abhängig. Allgemein sind möglichst geringe Blattanteile in der Biomassemasse 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 kann empfohlen werden, dass der Miscanthus für die Mischpelletproduktion von Ende März bis Anfang April geerntet werden sollte, dann wie schon im Abschnitt Erntezeitpunkt beschrieben, der Blattanteil am geringsten ist.

Desweiteren sollte bei der Ernte die Schnitthöhe so hoch sein, dass die abgefallenen Blätter, die sich teilweise in den Stängelhorsten sammeln nicht mit eingezogen werden.

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

6.1.1.2 Aschegehalte potentieller Mischungspartner

In dem vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass *Miscanthus x giganteus* unter optimalen Anbaubedingungen einen Aschegehalt von 1,6 M.-% bis 2 M.-% erreichen kann. Um die von der Pelletnorm 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.

Aus Abbildung 18 geht hervor, dass nur Fichtenholz, welches exemplarisch für Waldhölzer (bspw. Eiche, Buche oder Kiefer) untersucht wurde, und *Paulownia tomentosa* einen Aschegehalt von unter 1 M.-% haben. Der Aschegehalt der untersuchten Fichtehackschnitzel von 0,6 M.-% deckt sich mit den Angaben anderer Untersuchungen (KALTSCHMITT et al., 2009). Das Holz von *Paulownia tomentosa* hatte einen Aschegehalt von 0,78 M.-%. Diese Daten decken sich weitgehend mit bisherigen Literaturwerten (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: 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 eigenen Aschegehaltsuntersuchungen erfolgte mit Paulowniabiomasse, aus einem drei jährigen 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) höherer Aschegehalt der eigenen Untersuchungen, auf das junge Bestandesalter zurück zu führen ist. Mit wachsendem Alter sinkt laut (KALTSCHMITT et al., 2009) der Rindenanteil. Da bei Bäumen die Rinde einen höheren Aschegehalt als Kernholz hat (PICCHIO et al., 2012; KAUTNER et al. 2001) ist davon auszugehen, dass der Aschegehalt von Paulownia mit steigendem Bestandesalter, aufgrund des sinkenden Rindenanteils, abnimmt.

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

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

Die von GARCIA et al. (2011); KARAMPINIS et al. (2012) und VILLANUEVA et al. (2011) untersuchte Paulowniabiomasse stammten aus Südeuropäischen Länder (Spanien, Griechenland). PÜHL (2012) zeigte auf, dass Paulowniaholz aus der Türkei aufgrund einer längeren Vegetationsperiode, andere mechanische Eigenschaften als Mitteleuropäisches Paulowniaholz 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 Paulowniaholz aus Mitteleuropa ebenso gut für eine Mischpelletproduktion geeignet ist wie Fichtenholz. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die thermischen Eigenschaften von Paulownia und die bestimmenden Faktoren bisher kaum untersucht worden sind.

Ebenso wie die Eigenschaften der Paulowniabiomasse, ist über den Anbau und die Ertragsleistung von Paulownia in Mitteleuropa bisher wenig bekannt. Lediglich die Daten von MEIER und VETTER (2004) und WENGHOEFER et al. (2012) deuten darauf hin, dass *Paulownia tomentosa* mit 12- 15 t ha^{-1} (TM) ähnlich hohe Erträge liefern kann wie z. B. *Salicaceae*-Arten. Neben diesen agronomischen Fragestellungen besteht aus Sicht des Naturschutzes ebenfalls noch Bedenken, ob Paulownia aufgrund einer möglichen Selbstversamung zu einer invasiven Pflanze werden könnte (BÖHMER et al., 2000 und ESSL, 2007). Dieses Thema wird zurzeit intensiv in einer Prüfung der Zulassung vom Paulownia, als förderfähige Kurzumtriebsbaumart, durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) bearbeitet.

Damit Paulownia als hochwertige landwirtschaftlich produzierte Biomasse für die Mischpelletproduktion bereitgestellt werden kann, bedarf es noch weiterer Forschung über die landwirtschaftliche Nutzung von Paulownia.

6.1.2 Additive 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 Aschegehaltsanalyse der drei ausgewählten Additive ergab, dass Stärke mit 0,1 M.-%, bezogen auf die TM, den geringsten Aschegehalt aufwies. Traubentrester hatte 5,4 M.-% und Melasse über 10 M.-% Aschegehalt. Der eigens ermittelte Aschegehalt des Traubentresters lag im Mittel der Angaben von KRISTÖFEL und WOPIENKA (2012).

Melasse wurde aufgrund des zu hohen Aschegehaltes aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Ein Zuschlag von 1 M.-% zu dem Biomassegemisch aus *M. x g*. und Paulownia bzw. Fichte hätte zur Folge, dass der Aschegehalt des Gemisches um 0,1 M.-% ansteigen würde.
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. Ein weiterer Grund, warum Stärke aus den Betrachtungen ausgeschlossen wurde war, dass Stärke ein Handelsgut ist. Der derzeitige Preis von 1 Tonne Stärke beträgt laut Bundesverband der Kartoffelstärkeerzeuger rund 500 € (ANONYMUS 6, 2012). Traubentrester ist kein Handelsgut, sondern 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. Dabei zeigte sich, dass die Variante mit einem Tresterzuschlag, für die Pelletierung einen signifikant geringeren spezifischen Energiebedarf aufwies. 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 der Wirkbeziehung zwischen Material und Matrize zurückzuführen. Der eingesetzte Traubentrester enthielt neben Traubenschalen sehr viele Traubenkerne, welche nach FRÖMBGEN (1942) und ROHNE (1984) Ölgehalte von 10 M.-% bis 18 M.-% aufweisen. Wie schon in Kap. 3.2.2.2 gezeigt wurde, reduziert Öl die Reibung in der Matrize, sodass die Durchsatzleistung bei gleichbleibendem Leistungsbedarf erhöht werden kann (BRIGGS et al.,1999 und KALIYAN und MOREY, 2009). Somit decken sich die Ergebnisse mit dem bisherigen Erkenntnisstand. Die Ergebnisse der Analyse der Abriebfestigkeit und Schüttdichte der beiden Pelletvarianten stimmen jedoch nicht mit den Aussagen von KALIYAN und MOREY, 2009 überein. Laut dieser Autoren müsste die physikalische Pelletqualität der Variante mit Trester schlechter sein als die der Variante ohne Trester. Die Analyse ergab aber, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten erkennbar waren. Das die physikalische Qualität durch die Tresterbeimischung nicht signifikant verringert wurde, 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 beeinflussen.
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Beimischung von Traubentrester die Pelletierung positiv beeinflusst, da diese 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 Additivvariante, da lediglich bei der Aufbereitung Kosten entstehen. Traubentrester hat laut ROHNE (1984) einen Ausgangstrockenmassegehalt von rund 40 M.-%. Dieser muss aus Gründen der Lagerung, für den Einsatz als Additiv, durch Pressen und Trocknung auf über 85 M.-% erhöht werden. Desweiteren müssen mittels Siebung die Traubenschalen und Kerne von dem Stielgerüst getrennt werden, welche in einem weiteren Prozessschritt auf kleiner 1 mm zermahlen werden. Nach eigenen Berechnungen auf Grundlage von gesammelten Daten und KTBL Angaben kostet diese Weiterverarbeitung als Additiv 130 € t^{-1}. Somit kann durch die Substitution von Stärke, die 500€ t^{-1} kostet, mit 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.

6.1.3 Herleitung des Mischungsverhältnisses der Mischpellets

Wie schon in Kapitel 6.1.1.1 abgeleitet wurde, ist anzunehmen, dass die jeweilige Mischrezeptur der Pelletproduktion, an die jährlich schwankenden Inhaltsstoffe angepasst werden muss. Dabei ist der Aschegehalt vermutlich ein geeigneter Indikator für die Abschätzung dieser Inhaltsstoffe.

Dennoch wurde für die folgenden Untersuchungen ein festes Mischungsverhältnis angenommen. Diese Mischung setzt sich aus jeweils 50 M.-% Miscanthus vom Typ 34 Kenn 8.J. und *Paulownia tomentosa* zusammen. Diese Mischung wurde aufgrund der Aschegehalte gewählt, wonach der theoretische Aschegehalt der Mischpellets bei 1,25% liegen sollte. Zusätzlich zeigte ein erster Pelletierungsversuch (siehe Kapitel 5.1.2), dass diese Gemischvariante gute Pelletierungseigenschaften (physikalische Pelletqualität) aufweist.

Generell könnte der Paulowniaanteil auch durch Fichte substituiert werden, da zum einen Fichtenholz die stofflichen Qualitätsanforderungen erfüllt (siehe Tablle 4, Kapitel 3.4.1) und zum anderen als Miscanthus-Fichten-Mischpellet, in Bezug auf die Abriebfestigkeit und Schüttdichte, die Grenwerte der DIN_EN 14961 einhält (siehe Abbildungen zu Quallitätseigenschaften von Miscanthus-Fichten-Mischpellets,Kapitel 5.2.5 ff). Da aber das Ziel des Projektes, darin bestand Fichte durch alternative Rohstoffe zu ersetzen, wird im Folgenden primär die Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets erörtert.

Desweiteren zeigte sich in Kapitel 5.1.3, dass Traubentrester ein geeigneter Presshilfsstoff ist. Deshalb wurde den Pellets 1 M.-% Traubentrester zugefügt. Der Aschegehalt dieser Pellets lag bei 1,45%, sodass der Grenzwert der EN 14961-2(A2) eingehalten wurde.

6.2 Optimierung des Zerkleinerungsverfahrens für die Mischpelletproduktion

6.2.1 Vergleich des Energiebedarfes der Zerkleinerung von Miscanthus mittels Hammermühle und Zerfaserung

Als allgemeine Bezugsgrundlage der Zerkleinerungsversuche für Vergleiche der Verfahren, wurde in einem ersten Schritt der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Hammermühle ermittelt.

Spezifischer Energiebedarf Hammermühle

In den beiden Versuchsjahren zeigte sich, dass der spezifische Energiebedarf zur Zerkleinerung der Miscanthushäcksel rund 40 kWh t^{-1} betrug. In dem 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 lag der ermittelte Energiebedarf im unteren Bereich der Literaturwerte, die für die Zerkleinerung von Biomasse mittels Hammermühle 20 bis 150 kWh t^{-1} angaben (PERRY und GREEN, (1999)**;** CADOCHE und LÓPEZ (1989); MANI et al. (2004); SAMSON et al. 2000). Es ist anzunehmen, dass auf Grund der geringen durchschnittlichen geometrischen Partikellänge von 8 mm die eigenen Untersuchungsergebnisse im unteren Bereich der Literaturwerte lagen. 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 könnte 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.

Spezifischer Energiebedarf Zerfaserung

Der erste Zerfaserungsversuch im Jahr 2011 zeigte, dass die beiden Prototypen der Zerfaserung unterschiedliche Energiemengen zur Zerkleinerung von einer Tonne Miscanthus benötigten (siehe Kapitel 5.2.1). Dass die größere Zerfaserung vom Typ 45/1500 einen mehr als 60% höheren spezifischen Energiebedarf hatte 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 hatten. So beschreibt MIAO et al. (2011), dass Leistung, Drehzahl, Durchsatz und Materialeigenschaften den Energiebedarf von Zerkleinerungsmaschinen bestimmen. Nähergehende Untersuchungen zu diesen angenommenen „Upscaling-Effekten“ konnten jedoch durch das Projekt nicht durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfes des Typs 45/1.500 wurde dieser aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Im Gegensatz dazu wurde der Typ 22/600 weiterhin untersucht.

Aus Abbildung 23 in Kapitel 5.2.1 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 2000 bis 3500 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 dem damit verbunden geringeren Luftströmungen konnte der Energiebedarf durch den Einsatz dieses Verfahrens nicht markant reduziert werden.

Betrachtet man hingegen den gesamten Zerkleinerungsprozess der Biomasse, so bedarf laut GAESE (2011) die Nachzerkleinerung mittels Zerfaserung weniger Energie als die 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.

6.2.2 Zerkleinerung von Miscanthus mittels 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.

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.

6.2.2.1 Identifikation geeigneter Matrizen

Spezifischen Energiebedarfes der Zerkleinerung

In dem ersten Versuch (2011) bei Amandus Kahl zeigte 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 kWh t^{-1}) erreicht wurde (siehe Tabelle 16). Lediglich die Variante mit einem Lochdurchmesser von 10 mm und einem Presskanalverhältnis von 1 : 2 hatte 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 3.2.2), die den Reibungskoeffizienten der Kollermühle – die eine modifizierte Pelletpresse darstellt – beeinflussen. Diese können jedoch für eine mögliche Begründung der Ergebnisse ausgeschlossen werden, da sich zum einen die Wirkbeziehung zwischen Material und Material nicht verändert. Zum anderen hatte die Variante mit einem D_{Loch} von 10 mm und einer $L_{Presskanal}$ von 20 mm eine in Relation zum Volumen größere Reibungsfläche zwischen Material und Matrize, als die Variante mit einem D_{Loch} von 6 mm, was zu einem Anstieg der Reibung führen müsste. Da aber trotz dieses Anstiegs der Reibung, was laut POPOV (2009) zu einer Erhöhung des Energiebedarfes führen müsste, sich der tatsächliche Energiebedarf verringerte, kann wie schon beschrieben lediglich die Wirkbeziehung Material – Koller diesen Unterschied beeinflusst haben.

Vergleicht man diese Erkenntnisse mit den weiteren Ergebnissen aus Tabelle 16 (siehe Kapitel 5.2.2.1), so kann für die Matrizenwahl der Zerkleinerung einer gleichbleibenden Biomasse folgendes postuliert werden:

Eine Verringerung des D_{Loch}, bei gleichbleibendem Presskanalverhältnis, führt bei gleichbleibendem Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize zu einem Anstieg des Reibungskoeffizienten zwischen Material und Koller. Eine Erhöhung der $L_{Presskanal}$, 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.

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

Da in dem ersten Versuch keine digitale Leistungsmessung erfolgte, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, konnten die Ergebnisse dieses ersten Versuches nicht statistisch abgesichert werden. Aus diesem Grund erfolgte im Folgejahr ein weiterer Versuch mit der Kollermühle, um die ermittelten Werte verifizieren zu können.

Pelletierbarkeit des Zerkleinerungsproduktes in Abhängigkeit des D_{Loch} der Matrize

Der in Kapitel 4.2.1.3 dargestellte Pelletierungsversuch zeigte, dass der Energiebedarf der Pelletierung nicht durch den D_{Loch} der Matrize in der Kollermühle beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu hatte der D_{Loch} der Matrizen jedoch einen signifikanten Einfluss auf die physikalische Qualität der Mischpellets (siehe Abb. 25, Kap. 5.2.2.1). Aufgrund der unterschiedlichen Matrizenlochdurchmesser hatten die verschiedenen Varianten vor der Pelletierung unterschiedliche Korngrößenverteilungen. Diese wurden durch die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der verschiedenen Miscanthusvarianten beeinflusst (siehe Tabelle 18, Kap. 5.2.4.3). Dabei hatte das Material, welches mit einer Matrize mit einem D_{Loch} von 6 mm zerkleinert wurde, den größten Anteil an kleineren Partikeln.

Laut BHATTACHARYA et al. (1989) beeinflusst die Korngrößenverteilung neben anderen Faktoren die physikalischen Eigenschaften von Pellets. Die eigenen Untersuchungen zeigten, dass sich die Abriebfestigkeit der verschiedenen Pellet-Varianten nur tendenziell voneinander unterschied. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen von BERGSTRÖM et al. (2008), die ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen Korngrößenverteilung und Abriebfestigkeit feststellen konnten. Im Gegensatz zu der Abriebfestigkeit unterschieden sich die Schüttdichten der verschiedenen Varianten signifikant. Dabei sank 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) einhielt.

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

Aus Sicht der Pelletquallität, war die Zerkleinerung mit der 6 mm Lochmatrize und einem Presskanalverhältnis von 1 : 1 am besten geeignet.

Schlussfolgerung

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

6.2.2.2 Zerkleinerung unter optimierten Maschineneinstellungen

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 resultiert aus einer überproportionalen Erhöhung der Durchsatzmenge bei nur leicht ansteigendem Leistungsbedarf. Diese Tendenz wird aber laut BUSCHHART (2012) durch die maximale Nennleistung der Kollermühle limitiert.

Aus Abbildung 26 (siehe Kapitel 5.2.2.2) geht hervor, dass bei einer Wasserzugabemenge von 2 M.-% und ab einer Durchsatzmenge von 590 kg h^{-1} eine weitere Durchsatzerhöhung zu einem Anstieg des spezifischen Energiebedarfes führt. Dieses Minimum des spezifischen Energiebedarfes (38 kWh t^{-1}) lag bei 70% der maximalen Nennleistung. Der starke Anstieg des spezifischen Energiebedarfes um 16%, bei einer minimalen weiteren Durchsatzerhöhung (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. 57).

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 auch der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize, sodass nach den Erkenntnissen von POPOV (2009) mehr Energie zum Durchdrücken des Materials durch die Matrize benötigt wurde.

In dem weiteren Versuchsverlauf wurde den zu zerkleinernden Miscanthushäckseln 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 wurde. Zusätzlich verringerte sich der Anteil der anpelletierten Partikel und die Temperatur des Zerkleinerungsgutes sank auf 60°C (siehe Abb. 58).

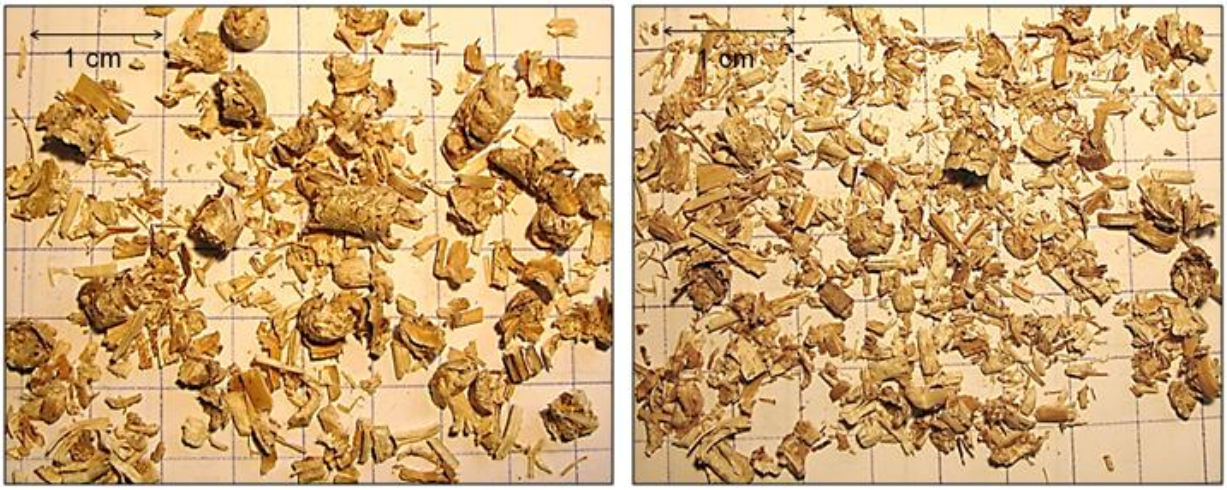

Abbildung 57: Zerkleineringsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus. Links: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 590 kg h^{-1}, Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts: Geringfügig anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 625 kg h^{-1}, Wasserzugabe: 0 M.-%) (WENGHOEFER, 2013)

Nach den 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. Aufgrund dieser geringeren Anpelletierung des Materials sank vermutlich der Reibungskoeffizient zwischen Material und Matrize, was dann zu der Verringerung des spez. 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 war im Vergleich zu dem Vorjahresversuch (24,5 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 Miscanthushäcksel zurückzuführen. Die Feuchtemessungen ergaben, dass der Wassergehalt im Jahr 2011 bei 9,6 M.-% und im Folgejahr bei 12,6 M.-% lag. Aufgrund des um 3 M.-% gestiegenen Wassergehaltes, führte im Jahr 2012 die bereits beschriebene Anpelletierung (siehe Abb. 58) des Zerkleinerungsgutes zu diesem höheren spezifischen Energiebedarf.

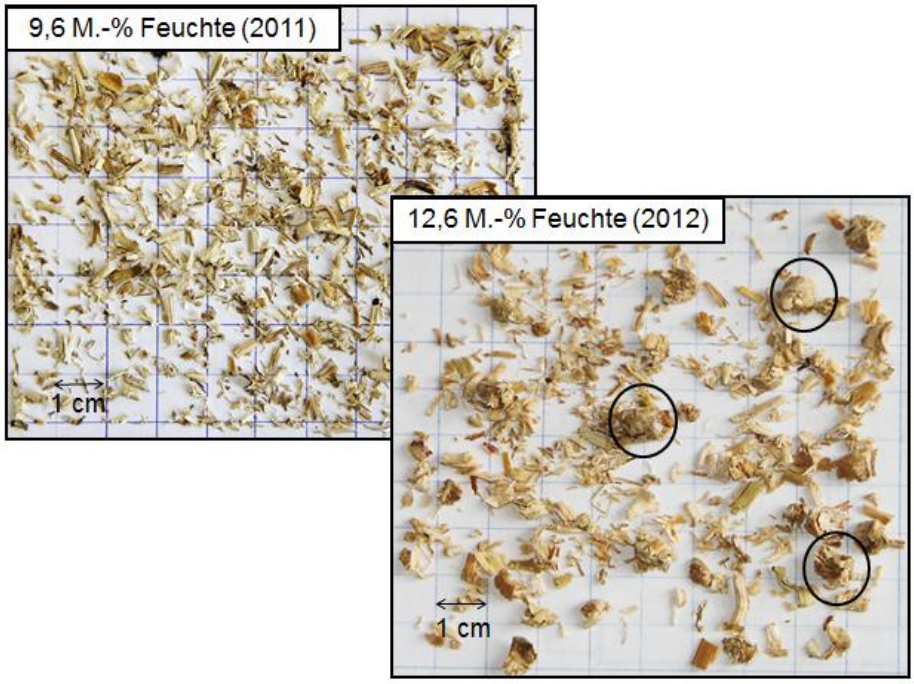

Abbildung 58: Vergleich der Zerkleinerungsprodukte (Kollermühle) von Miscanthus, der Versuchsjahre 2011 und 2012. links oben: aus 2011 (Ausgangsfeuchte: 9,6 M.-%), rechts unten: aus 2012 (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%) (WENGHOEFER, 2013)

Schlussfolgerung

In den beiden 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 werde, dass ein steigender Wassergehalt den Energiebedarf der Zerkleinerung per Kollermühle erhöht. Dies bestätigte 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.

6.2.3 Zerkleinerung von Miscanthus mittels Prallreaktor

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

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

Die eigenen Untersuchungen bestätigten diese Angaben (siehe Tabelle 17, Kapitel 5.2.3). Aus Tabelle 17 geht hervor, dass insbesondere eine Erhöhung der Siebfläche zu einer deutlichen Reduktion des spezifischen Energiebedarfes führte. Dies deckt sich mit den Angaben von KARINKA et al. 2013, die ebenfalls feststellten, dass eine Erhöhung der Siebfläche bei gleichbleibender Zufuhrmenge die Effektivität von Prallzerkleinerungsverfahren optimiert. 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 im Partikel stärker beschleunigt und somit häufiger zerschlagen wurden. Nach der Theorie von 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 verzeichnen. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass die Beschleunigung der Partikel so gering war, dass die Aufprallenergie der Partikel zu niedrig war, um ein Zerplatzen zu erzeugen.

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. Nach Aussagen von SCHÄFER (2011) hatte die Versuchsmaschine lediglich 20% der praxisüblichen Prallfläche.

6.2.4 Zerkleinerung holzartiger Biomasse

Das folgende Kapitel soll aufzeigen in wie weit die verschiedenen Zerkleinerungsverfahren für Holz geeignet sind. Dies ist für die Mischpelletproduktion von besonderer Bedeutung, da der Mischrezeptur neben Miscanthus auch holzartige Biomasse beigefügt wird.

6.2.4.1 Zerkleinerung von Holz mittels Hammermühle

Die in Kapitel 5.3.2 dargestellten Ergebnisse der Zerkleinerungsversuche mit holzartiger Biomasse decken sich weitest gehentst mit anderen Untersuchungen.

HOLZAPPELT et al. (1989) ermittelte für die Zerkleinerung von Pappelhackschnitzeln einen spezifischen Energiebedarf von 50 kWh t^{-1}. Das Ausgangsmaterial deren Untersuchungen hatte eine L_{Kante} von 16 mm und in die Hammermühle war ein 2 mm Lochsieb eingesetzt.
Im Gegensatz dazu wurde bei den eigenen Untersuchungen unter anderem Fichten- und Paulowniaholz, mit einer L_{Kante} von 14 mm mit einem 5 mm Lochsieb zerkleinert. Trotz eines höheren Sieblochdurchmessers und einer geringeren L_{Kante} lag der gemessenen 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 beschreibt ZHAO-HUA (1986) für *Paulownia tomentosa* eine Druckfestigkeit von 20 N mm^{-2} und eine Biegefestigkeit von 38 N mm^{-2}. Laut RANTA-MAUNUS et al. (2011), PUSHINSKIS et al. (2002) und LOHMANN (1986) hat Fichte eine Druckfestigkeit von 40 bis 56 N mm^{-2} und eine Biegefestigkeit von 58 bis 106 N mm^{-2}. Diese Daten zeigen, dass Paulownia und Fichte eine deutlich höherer Materialfestigkeit haben als Pappel, was erklärt, dass die Zerkleinerung dieser Biomassen mehr Energie benötigt als die Zerkleinerung von Pappelholz.
Die signifikant unterschiedlichen Energieeinträge für die Zerkleinerung von Fichtenspäne und Paulowniahackschnitzeln mit einer L_{Kante} von 18 mm, im Vergleich zu den untersuchten Hackschnitzeln mit einer L_{Kante} von 14 mm sind auf die Ausgangsgröße der Partikel zurückzuführen. Nach ESTEBAN und CARRASCO (2002) erhöht sich der Energiebedarf der Zerkleinerung mit steigender Partikelgröße des Ausgangsmaterials.
Mit Ausnahme der Fichtensägespäne benötigte 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 zeigte sich das der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerung von Biomassen mittels Hammermühle nach folgender Auflistung zunimmt: Fichtenspäne < Miscanthushäcksel < Paulowniahackschnitzel < Fichtenhackschnitzel.

6.2.4.2 Zerkleinerung von Holz mittels Kollermühle

Die Zerkleinerungsversuche mit Paulownia zeigten, dass die Kollermühle, wie schon bei den Zerkleinerungsversuchen mit Miscanthus, signifikant energieeffizienter ist als die Hammermühle.

Der Vergleich der beiden Verfahren zeigt, dass bei der Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle im Gegensatz zur Hammermühle 20% des Energiebedarfes eingespart werden kann.

Entgegen der in Kapitel 6.2.2.2 erläuterten Zerkleinerung von Miscanthus, zeigte die Zerkleinerung von Paulownia mittels Kollermühle in Bezug auf optimale Wassergehalte gegensätzliche Eigenschaften. Der Zerkleinerungsversuch mit Miscanthus zeigte, dass eine Verringerung der Wasserzugabemenge zu einer Optimierung des Zerkleinerungsvorganges führte. Dagegen konnte bei der Zerkleinerung von Paulownia durch eine Wasserzugabe der Zerkleinerungsprozess optimiert werden (siehe Abb. 26, siehe Kapitel 5.2.2.2).

Dieses Zerkleinerungsverhalten ist vermutlich auf den um 3 M.-% geringeren Wassergehalt zurückzuführen. Durch den geringen Wassergehalt von 9,2 M.-% erwärmte sich die Matrize aufgrund eines höheren Reibungskoeffizienten zwischen Material und Matrize sehr viel schneller, was zu einer starken Anpelletierung des Zerkleinerungsproduktes führte (siehe oberes Bild Abb. 59).

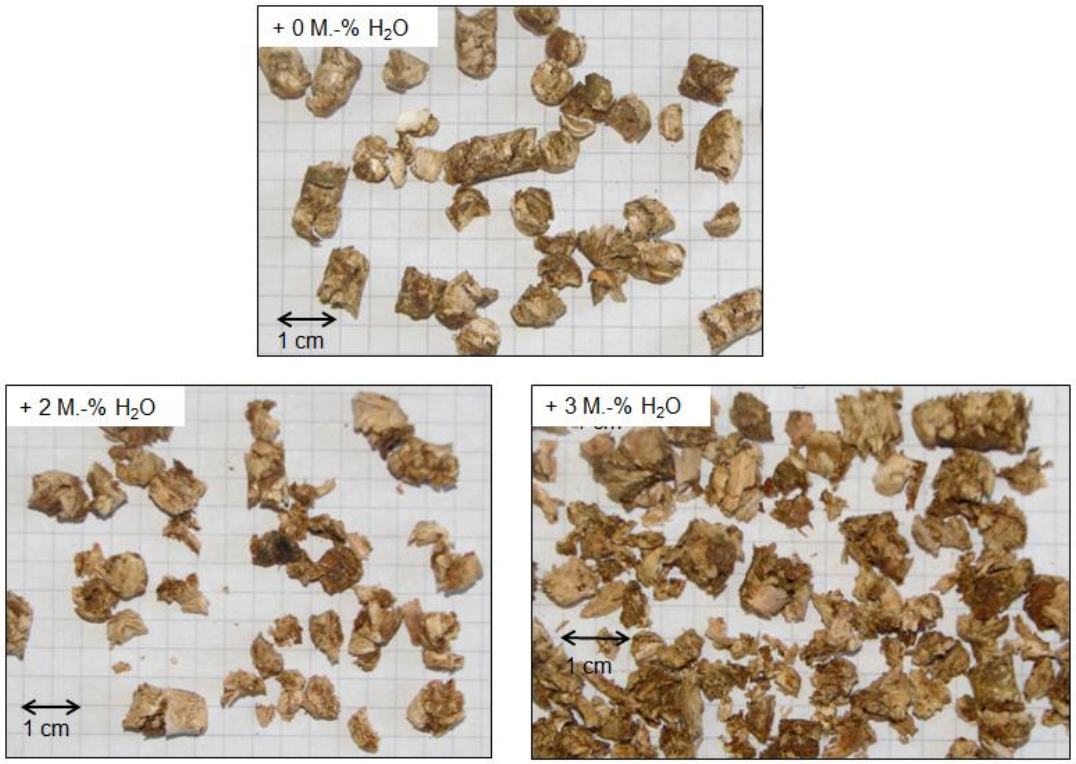

Abbildung 59: Zerkleineringsprodukte (Kollermühle) von Paulownia. Oben: Sehr stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 510 kg h^{-1}, Wasserzugabe: 0 M.-%) Links unten: Stark anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 9,2 M.-%, Durchsatz: 550 kg h^{-1}, Wasserzugabe: 2 M.-%) Rechts unten: Anpelletiertes Zerkleinerungsprodukt (Ausgangsfeuchte: 12,6 M.-%, Durchsatz: 600 kg h^{-1}, Wasserzugabe: 3 M.-%) (WENGHOEFER, 2013)

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 6.2.2.2 wurde, beschrieb SALMEN et al. (1984), dass eine Erhöhung des Wassergehaltes die Ligninerweichungstemperatur absenkt. Die eigenen Untersuchungen zeigten, dass dies aber nur in Bezug auf das von der Biomasse gebundene Wasser zutrifft.
STELTE et al. (2011b) hoben hervor, dass das Wasser für eine wirksame Ligninerweichung in und zwischen den Partikeln sein muss. Somit ist anzunehmen, dass die Wasserzugabe, die unmittelbar zu der Zerkleinerung erfolgte, 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. 59).
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 Diffussionsvorgang der primär von der Feuchtekonzentration der Umgebung beeinflusst wird.

Schlussfolgerung

Allgemein zeigte sich, dass die Zerkleinerung von Paulowniahackschnitzeln 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 von dem Gehalt an gebundenem Wasser in der Biomasse bestimmt wird. Dabei hatten 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 mit einem gegebenen Wassergehalt abgestimmt werden.

6.2.4.3 Zerkleinerung von Holz mittels Zerfaserung und Prallreaktor

Der Versuch Paulowniahackschnitzel 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.

Im Gegensatz dazu konnte mittels Prallreaktor sogar Robinienholz zerkleinert werden. Da laut POLLET et al. (2012) Robinienholz eine höhere Bruch und Druckfestigkeit als Eichenholz hat, ist davon auszugehen, dass der Prallreaktor auch für die Zerkleinerung von Paulownia- oder Nadelholz geeignet ist. Dennoch konnte nicht untersucht werden wie hoch der Energiebedarf der Zerkleinerung von holzartiger Biomasse ist. Bevor der Prallreaktor jedoch in der Praxis eingesetzt werden kann, bedarf es noch weiterer Forschung.

6.2.4.4 Zusammenfassung der Zerkleinerungsversuche von Holz

Die Versuche ergaben, dass die Zerfaserung nicht für die Zerkleinerung von Holz geeignet ist. Der Prallreaktor konnte nur eingeschränkt untersucht werden, sodass weitergehende Aussagen unmöglich sind.

Dagegen zeigte sich, dass die Kollermühle sehr gut Holzhackschnitzel zerkleinern kann und energieeffizienter ist als die Hammermühle. Im Besonderen ist bei der Kollermühle zu beachten, dass das Zerkleinerungsprodukt im Vergleich zu der Hammermühle sehr gut aufgespalten wurde. Nach BACK (1987) führt eine größere Partikeloberfläche zu einer verbesserten Pelletqualität.

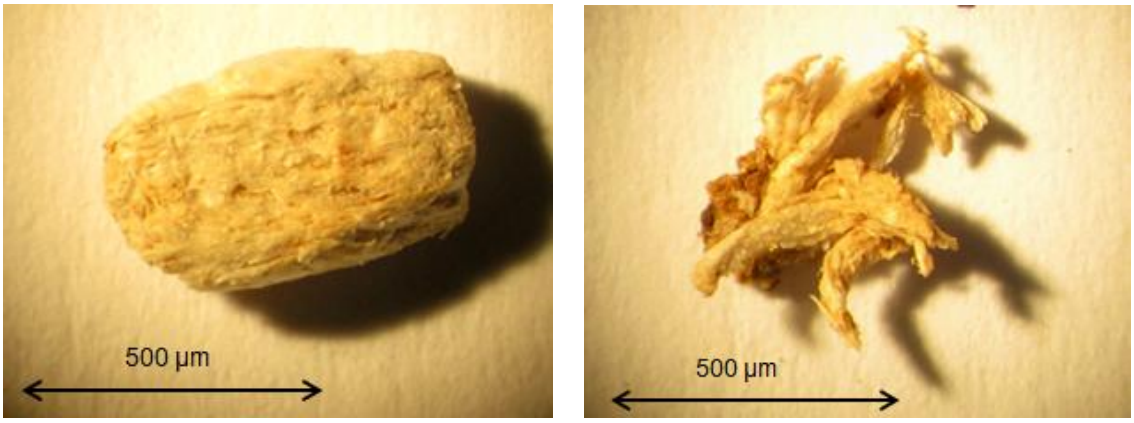

Abbildung 60: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Paulownia, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Links: Hammermühle und rechts: Kollermühle (WENGHOEFER, 2013)

Der Einfluss dieser Vergrößerung der Partikeloberfläche auf die Pelletierfähigkeit der Biomasse, wird in dem folgenden Kapitel 6.2.5.2 näher erörtert.

Resultierend aus dem geringeren spezifischen Energiebedarf und der verbesserten Zerkleinerungsproduktqualität stellt die Kollermühle, unter den untersuchten Verfahren, die geeignetste Variante zur Zerkleinerung von Holz für die Mischpelletproduktion dar.

6.2.5 Vergleich der Zerkleinerungsverfahren

In dem folgenden Kapitel wird diskutiert, welche Maschinen am besten für die Zerkleinerung von Miscanthus geeignet sind. Dabei wird vergleichend der Energiebedarf des Zerkleinerungsprozesses und die Pelletierungseigenschaften der Zerkleinerungsprodukte erörtert.

6.2.5.1 Energiebedarf der Zerkleinerungsverfahren

In Abbildung 29 (Kapitel 5.2.4) wurde aufgezeigt, dass die Kollermühle im Vergleich zu den anderen Verfahren in beiden Versuchsjahren den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf aufwies. Im Gegensatz dazu benötigte der Prallreaktor tendenziell am meisten Energie zur Zerkleinerung von Miscanthus. Die Zerfaserung unterschied sich nicht signifikant von der Hammermühle

Wie schon in Kapitel 6.2.3 gezeigt wurde, kann der spezifische Energiebedarf des Prallreaktors vermutlich weiter reduziert werden. Dennoch muss der Prallreaktor aus den weiteren Untersuchungen aufgrund des höchsten Energiebedarfes ausgeschlossen werden, da im Verlauf des Projektes keine weiteren Versuche mit dem Prallreaktor durchgeführt werden konnten. Ebenso könnte nach Aussagen von SCHOLTE-REH (2012) und GAESE (2012) der Energiebedarf der Zerfaserung durch weitere Modifikationen, welche insbesondere die Führung des Luftstromes betreffen, reduziert werden. Somit kann in Bezug zu den Zerkleinerungsverfahren Prallreaktor und Zerfaserung kein abschließendes Urteil zu deren Energieeffizienz getroffen werden

Wie schon SITZMANN und BUSCHHART (2009) beschrieben, zeigten 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 zurück zuführen. 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 auswirkt. Nach AUSTIN und SHOJI (1973) weisen Partikel während der Zerkleinerung in der Hammermühle ein unvorhersehbares Bruchverhalten auf. Die beiden Autoren zeigten auf, dass Partikel, auch wenn diese von den Hämmern getroffen werden, nicht zerplatzen müssen. Dabei wird dennoch Energie aufgewandt, die in einer Stauchung der Partikel resultiert. Bei der Rückdehnung der Partikel wird die Energie ungenutzt abgegeben. Desweiteren werden die Partikel nicht zwangsläufig bei jeder Umdrehung der Hämmer getroffen.

So zeigten BITRA et al. (2009), dass beispielsweise eine Vergrößerung der Schlagfläche, durch eine 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 erreichte. 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 zwischen gelagert 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.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Es konnte aufgezeigt werden, dass der Energiebedarf der verschiedenen Zerkleinerungsverfahren durch unterschiedliche Wirkungsweisen 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, ein sehr energieeffizientes Zerkleinerungsverfahren für den Pelletierungsprozess darstellt.
Desweiteren 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) zeigten 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. Da diese Fragestellung in dem Projekt „C4 Kompakt“ nicht untersucht werden konnte, sollte dies durch Folgeprojekte untersucht werden.

6.2.5.2 Pelletierbarkeit der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit des Zerkleinerungsverfahrens

Die in Kapitel 5.2.5.1 dargestellten Ergebnisse des Pelletierungsversuches sollten zeigen, ob sich ein unterschiedliches Zerkleinerungsverfahren auf den Pelletierungsvorgang auswirkt.

Energiebedarf der Pelletierung

Aus Abbildung 30 (Kapitel 5.2.5.1) geht hervor, dass die Pelletierung des Miscanthus-Fichten-Gemisches, dessen Miscanthus-Anteil mit der Kollermühle zerkleinert wurde, signifikant am wenigsten Energie verbrauchte (135 kWh t^{-1}). Die Varianten Hammermühle und Zerfaserung unterschieden sich nicht voneinander. Insgesamt lag 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} (Di GIACOMO und TAGLIERI, 2009, THEK und OBERNBERGER 2001).

Da diese Versuche an einer 3,2 kW Laborpresse durchgeführt wurden, sind die eigenen Werte nicht mit denen der Praxisproduktion zu vergleichen. 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}. Laut SAMSON et al (2000); HOLM et al. (2006) und MANI et al. (2006a) hat 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 30 nur schwer zu deuten. Im Gegensatz zu dem Zerkleinerungsprodukt der Hammermühle hatten die Varianten Kollermühle und Zerfaserung einen signifikant höheren Anteil an größeren Partikeln (siehe Tabelle 18, Kapitel 5.2.5.3). Dabei unterschieden sich die Korngrößenverteilungen der beiden Varianten nicht signifikant. Da aber die Gemischvariante, deren Miscanthusanteil mittels Zerfaserung zerkleinert wurde, signifikant mehr Energie benötigte als die Variante Kollermühle, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Korngrößenverteilung auf den spezifischen Energiebedarf minimal ist.

Um die Wirkung des Zerkleinerungsverfahren auf die Oberflächenstruktur, als Einflussfaktor der Pelletierfähigkeit näher erörtern zu können, wurden Partikel der verschiedenen Zerkleinerungsprodukte photographiert. Die folgende Abbildung zeigt für die Zerkleinerungsverfahren, welche zur Zerkleinerung von Miscanthus eingesetzt wurden, besonders charakteristische Miscanthus-Partikel.

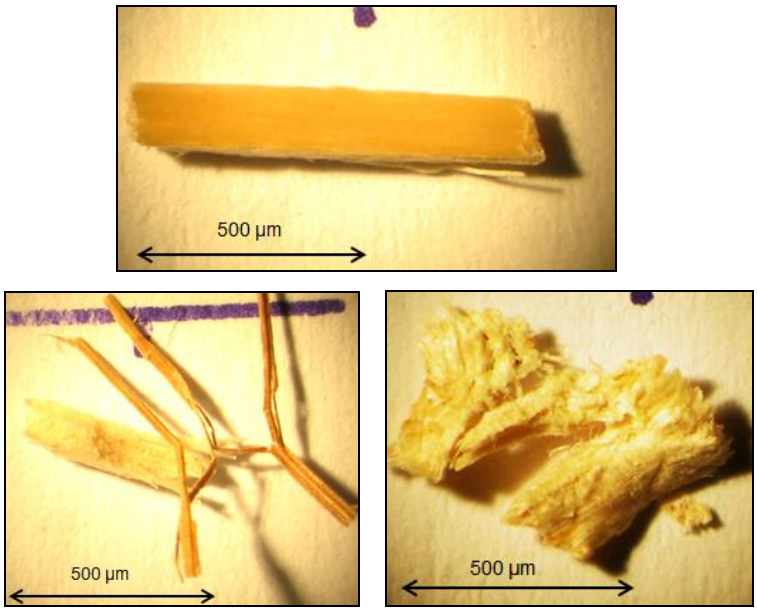

Abbildung 61: Charakteristische Partikel der Zerkleinerungsprodukte von Miscanthus, die mit unterschiedlichen Verfahren zerkleinert wurden. Oben: Hammermühle, unten links: Zerfaserung und unten rechts: Kollermühle (WENGHOEFER, 2013)

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

Da sich bei der Pelletierung der Energiebedarf der Varianten Hammermühle und Zerfaserung nicht signifikant unterschied, ist zu vermuten, dass die Oberflächenstruktur nur einen minimalen Einfluss auf den Energiebedarf der Pelletierung hat. Dagegen hatte 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 befassten, bezogen 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. 62).

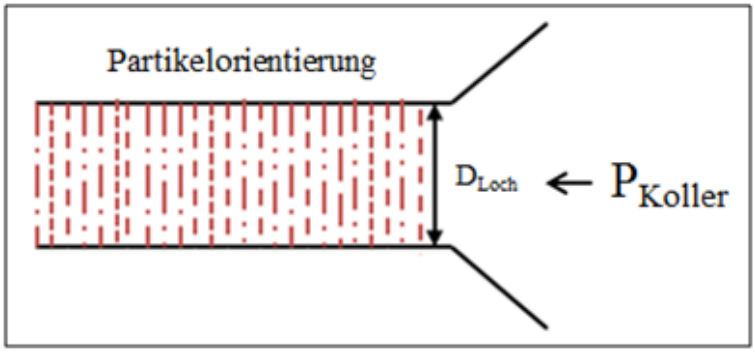

Abbildung 62: Skizze einer Matrize mit Angabe der Orientierung der Partikel (nach HOLM et al. 2006)

Damit es zu dieser Anordnung der Partikel kommt, muss eine Kraft aufgebracht werden, wobei deren Stärke unter anderem von der Wirkbeziehung Material zu Material abhängig ist. Es ist anzunehmen, dass sich kubische Partikel leichter als stäbchenförmige Partikel, die sich stärker mit einander 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) unterstützt, da diese darstellten, dass sich stäbchenförmige Partikel in dem 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 weiterer Forschung.

Physikalische Eigenschaften

Das Ergebnis der Analyse der Abriebfestigkeit und der Schüttdichte ergab im Gegensatz zu der Energiebedarfsmessung ein anderes Resultat (siehe Abb. 31, Kapitel 5.2.4). Es zeigte sich, dass die Pellet-Variante Zerfaserung als einzige beide Grenzwerte der Norm einhielt. Die Abriebfestigkeit war bei dieser Variante signifikant am höchsten. Dagegen war die Schüttdichte der Pellets signifikant am niedrigsten. Die Pellets der Variante Hammermühle hatten die signifikant höchste Schüttdichte, jedoch war die Abriebfestigkeit im Vergleich zu der Variante Kollermühle tendenziell schlechter. Somit wiedersprechen diese Ergebnisse den Aussage von OBERNBERGER und THEK (2004), die eine enge positive Korrelation zwischen Abriebfestigkeit und Schüttdichte postulierten.
Entgegen der Ergebnisse der Energiebedarfsmessungen hat laut BERGSTRÖM et al. (2008); MANI et al. (2006a), BHATTACHARYA et al. (1989) und HOLM et al. (2006) 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 Tendenz bestätigt sich in den eigenen Untersuchungen. Die in Tabelle 18 dargestellten Siebkennlinien zeigten, dass die Variante Hammermühle, bei der die höchste Schüttdichte gemessen wurde, auch die kleinere Korngrößenverteilung aufweist. Desweiteren hatte die Variante Kollermühle eine etwas geringere Schüttdichte und geringere Korngrößenverteilung, als die Variante Zerfaserung.

Im Gegensatz zu der Schüttdichte ist die Abriebfestigkeit ein Qualitätskriterium, welches von sehr vielen Variablen abhängig ist. So benennt PAYNE (2004) die Abriebfestigkeit als eine Funktion des Energieeinsatzes für die Pelletierung. Neben dieser Größe bestimmen aber auch viele andere Faktoren (siehe Kapitel 4.2.3) die Abriebfestigkeit. 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 könne jedoch nicht auf die Korngrößenverteilung zurückgeführt werden (BERGSTRÖM et al., 2008 und MANI et al., 2006a). Neben den Literaturangaben konnte dies auch durch einen weiteren Pelletierungsversuch verdeutlicht werden.

In diesem Versuch wurden, wie in Kapitel 4.2.2.3 beschrieben, die Zerkleinerungsprodukte auf eine einheitliche Größe gesiebt. Dabei war die Wahl der Siebgeometrie eine mögliche Fehlerquelle, die zu Fehlinterpretationen führen könnte. 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. Diese Phänomen beobachteten auch MA et al. (2000); STARK und CHEWNING (2012) und WOMAC et al. (2007). WOMAC et al. (2007) beschreiben, 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 Zerfaserung eine nahezu einheitliche Korngrößenverteilung aufweisen, da die Partikel beider Varianten eine stäbchenförmige Geometrie haben. Trotz dieser vermuteten einheitlichen Korngrößenverteilungen hatte die Varianten 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 erörtert werden, in wie weit diese für die Unterschiede der Pellet-Varianten verantwortlich war.

Dagegen geht aus verschiedenen Quellen hervor, dass die Partikeloberflächenstruktur die Abriebfestigkeit von Pellets beeinflusst (KALIYAN und MOREY, 2009 und BACK 1987).
So beschrieb BACK (1987), dass die Größe der Bindungsfläche, einen der wichtigsten Faktoren für das Verkleben von Partikeln darstellt. In Abbildung 61 ist sehr gut zu erkennen, dass die Miscanthus-Zerkleinerungsprodukte der Zerfaserung und der Kollermühle eine sehr viel größerer 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 kamen.
Da diese beiden Varianten eine signifikant größere Abriebfestigkeit als die Variante Hammermühle hatten, ist davon auszugehen, dass die Partikeloberflächenstruktur neben den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Faktoren einen deutlichen Einfluss auf die Abriebfestigkeit der Mischpellets hat.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass die Korngrößenverteilung, die Partikelgeometrie und die Partikeloberflächenstruktur von zerkleinertem Miscanthus die Pelletierfähigkeit beeinflusst. Dabei hatte eine kubische Partikelgeometrie (Variante Kollermühle) einen positiven Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf. Des Weiteren hatten Korngrößenverteilungen mit kleineren Partikeln (Variante Hammermühle) höhere Schüttdichten zur Folge und eine größerer Partikeloberfläche (Varianten Zerfaserung und Kollermühle) erhöhte die Abriebfestigkeit.
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zerfaserung das beste Zerkleinerungsprodukt lieferte, jedoch einen ähnlich hohen Energiebedarf wie die Hammermühle benötigte. Dagegen hatte die Zerkleinerung von Miscanthus mittels Kollermühle den signifikant geringsten spezifischen Energiebedarf und eine moderate 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.

6.2.5.3 Gesamtbeurteilung der Zerkleinerungsverfahren

Im Allgemeinen bestätigten die Versuche die Erkenntnisse von ESTEBAN und CARRASCO (2006), MANI et al. (2004) und MANLU et al. (2003), 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.
In Bezug auf den Energiebedarf ist die Kollermühle das energieeffizienteste Verfahren. Dagegen zeigte sich, dass die Zerfaserung aus Sicht der Pelletqualität das bessere Zerkleinerungsprodukt liefert, wobei das Zerkleinerungsprodukt der Kollermühle ebenfalls bessere Pelletierungseigenschaften aufwies, als das der Hammermühle. Des Weiteren 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 die Pelletpresse oder Kollermühle ausfällt die Produktion von Pellets durch ein absätziges Verfahren fortgeführt werden. Bei einem absätzigen Verfahren würde zuerst das Material zerkleinert und nach einem Umbau zu einer Pelletpresse weiterpelletiert werden.
Aus diesen Gründen sollte für eine Miscanthus-Mischpelletproduktion die Kollermühle als Zerkleinerungsverfahren gewählt werden.

6.3 Einfluss des Wassergehaltes, der Matritzengeometrie und des Durchsatzes auf den Pelletierungsvorgang

Das folgende Kapitel soll erörtern, in wie weit der Pressvorgang durch Wassergehalt, Matritzengeometrie und Durchsatzmenge beeinflusst wird. Dabei sind die folgenden Erkenntnisse nicht als absolute Werte anzusehen, sondern sollen einem potentiellen Mischpelletproduzenten mögliche Probleme des Pelletierens aufzeigen.

6.3.1 Wirkung des Wassergehaltes auf den Pressvorgang

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 nur bedingt durch die eigenen Ergebnisse bestätigt werden.

In Abbildung 33 (siehe Kapitel 5.3.1) zeigte sich, dass ab einem Wassergehalt von 12 M.-% lediglich die Schüttdichte mit zunehmendem Wassergehalt kontinuierlich abnimmt. Im Gegensatz dazu unterschied sich die Abriebfestigkeit der Pellets mit Wassergehalten von 12 bis 15 M.-% nicht signifikant voneinander. Erst ab einem Wassergehalt von 16 M.-% war eine tendenziell verringerte Abriebfestigkeit zu erkennen. Zieht man die Daten aus Abbildung 34 hinzu, so wird ersichtlich, dass die Matrizentemperatur bei zunehmendem Wassergehalt sinkt. Zusätzlich sank der Leistungsbedarf der Pelletierung minimal, was bei gleichbleibendem Durchsatz eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfes zur Folge hatte.

Die Abnahme der Schüttdichte mit zunehmendem Wassergehalt kann durch die verringerte Reibung zwischen Material und Matrize erklärt werden. Laut KALIYAN und MOREY, 2009 führt eine verringerte Reibung letztendlich zu einer verringerten Schüttdichte.

Die konstante Abriebfestigkeit der Pellets ist vermutlich auf das Ligninerweichungsverhalten zurückzuführen. Wie schon in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, beginnt Lignin bereits ab Temperaturen von 60°C zu erweichen, wobei höhere Wassergehalte – bezogen auf einen Bereich bis zu 25 M.-% H_2O – zu einer Absenkung der T_g führen (SAMUELSON et al 2012 und KALIYAN und MOREY, 2009). Da die eigenen Versuche bei Matrizentemperaturen von über 90°C durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass bei allen Varianten eine ähnlich hohe Ligninerweichung stattfand. Weil dieser Verglasungseffekt maßgeblich die Abriebfestigkeit bestimmt (STELTE et al., 2011a) ist davon auszugehen, dass dies der Grund für die gleichbleibende Abriebfestigkeit war.

Ebenso wie die physikalischen Eigenschaften beeinflusst der Wassergehalt den spezifischen Energiebedarf (siehe Abbildung 33). 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 Erkenntnisse wurde zusätzlich, wie in Abbildung 35 ersichtlich, der spezifische Energiebedarf, die Temperatur und der Leistungsbedarf der Pelletierung eines Miscanthus-Paulownia- Gemisches in Abhängigkeit des Wassergehaltes untersucht. Dabei zeigten sich die gleichen Tendenzen wie bei dem Gemisch mit Fichte. Somit ist anzunehmen, dass diese Ergebnisse auf andere Miscanthus-Gemische übertragbar sind.

Der Vergleich der Erkenntnisse aus Literaturangaben und der eigenen Ergebnisse 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 Pellethersteller überprüft werden, um gegebenenfalls die Pelletproduktion zu optimieren.

6.3.2 Wirkung der Presskanallänge auf den Pressvorgang

Die Abbildungen 36 und 37 (siehe Kapitel 5.3.2) zeigen, dass die Länge der Presskanäle in der Matrize den Pelletierungsvorgang maßgeblich beeinflusst.

Die Verlängerung der Presskanallänge hatte zur Folge, dass die Durchsatzmenge reduziert werden musste, da die Leistung bei beiden Varianten 90% der max. Nennleistung der Pelletpresse betrug. Eine weitere Leistungserhöhung hätte die Pelletpresse überlastet. Diese Verringerung der Durchsatzmenge hatte zur Folge, dass der spezifische Energiebedarf erhöht wurde.

STELTE et al. (2011b) und HOLM et al. (2006) benennen das Verhältnis aus D_{Loch} zu $L_{Presskanal}$ als einen der wichtigsten Faktoren, die den Kraftaufwand für den Pressvorgang bestimmen. Dabei erhöht eine Verlängerung der Presskanäle alle in Kapitel 3.2.2 beschrieben Reibungskoeffizienten. Nach den Aussagen von POPOV (2009) steigt somit der Kraftaufwand für den Pressvorgang. Diese Wirkbeziehung spiegelt sich in den ermittelten Werten wieder. HOLM et al (2006) beschreibt dazu, dass der Kraftaufwand bei steigender Presskanallänge sogar exponentiell zunimmt.

Neben den Kriterien Durchsatzleistung und Energiebedarf, veränderte sich durch eine Verlängerung der Presskanallänge auch die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Pellets. Abbildung 37 stellt dar, dass die Abriebfestigkeit bei steigender Presskanallänge signifikant sinkt und die Schüttdichte signifikant zunimmt. Die Zunahme der Schüttdichte kann durch die von HOLM et al. (2006) beschriebene Zunahme des Pressdruckes in der Matrize erklärt werden.

Im Gegensatz dazu ist es schwierig die Abnahme der Abriebfestigkeit zu erklären. Da bei den Versuchen die Durchsatzmenge 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 eine Erhöhung des innerpartikulär gebundenen Wassergehaltes dieser Entwicklung entgegenwirken, sodass trotz höherer Reibung eine Verbesserung der Abriebfestigkeit erreicht würde. Diese Wassererhöhung könnte womöglich ebenfalls den Reibungskoeffizienten absenken, sodass der Energiebedarf ebenfalls sinken müsste. Diese Annahme konnte jedoch im Rahmen des Projektes nicht mehr 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.

6.3.3 Wirkung der Durchsatzmenge auf den Pressvorgang

In den vorherigen Kapiteln wurde schon mehrfach beschrieben, dass eine Durchsatzerhöhung oft zu einer Verringerung des spezifischen Energiebedarfes führt (siehe auch Abbildung 39). Die Durchsatzmenge der Pelletpresse wird neben dem Zerkleinerungsprodukt (Biomasseart, Partikeleigenschaften u. Feuchtegehalt), den Maschineneinstellungen und durch die 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 Durchsatzmenge. Im Allgemeinen sind 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 Durchsatzmenge beeinflusst werden. Aus Abbildung 40 geht hervor, dass eine Erhöhung des Durchsatzes bei Beibehaltung aller weiteren Versuchsparameter zu einer Verringerung der physikalischen Pelletqualität führen kann. Dabei verringerte die Erhöhung der Durchsatzmenge die Schüttdichte signifikant. Dagegen sank die Abriebfestigkeit nur minimal ab. Allerdings lagen 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 Variante - aufgrund einer längeren Verweilzeit in der Matrize, stärker kompaktiert wurde, hatte diese Variante die höchste Schüttdichte.

In Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 wurde bereits aufgezeigt, dass die Matrizentemperatur einen indirekten Einfluss auf die Abriebfestigkeit hat. Diese Einfluss ist auf die Ligninerweichung zurückzuführen. Aus Abbildung 39 geht hervor, dass die Variante 20,7 kg h^{-1} eine niedrigere Matrizentemperatur hatte, 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 Verweilzeit in der Matrize abhängt.

Insgesamt gilt zu beachten, dass die Durchsatzmenge neben der Antriebsleistung stark von den in Kapitel 3.2.2 dargestellten Faktoren beeinflusst wird.
Im Allgemeinen erläuterte BUSCHHART (2012), dass der Leistungsbedarf der Pelletpresse, während des Prozessschrittes der Pelletierungs, möglichst bei 80 – 90% des max. Nennleistung betragen sollte, um eine gute Pelletqualität bei möglichst geringem spezifischen Energiebedarf zu erreichen. Diese Angabe konnte durch die eigenen Untersuchungen bestätigt werden.

6.3.4 Zusammenfassung der Pelletierungsversuche

Die Pelletierungsversuche verdeutlichen exemplarisch, dass eine Vielzahl von Faktoren die Qualität der Pelletierung beeinflussen. 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.

6.4 Beurteilung der verbrennungstechnischen Qualität der Mischrezeptur

In Kapitel 6.1.2 wurde festgestellt, dass die Mischrezeptur der Pellets zu 50 M.-% aus *Miscanthus x giganteus* und zu 50 M.-% aus *Paulownia tomentosa* bestehen soll. Zusätzlich wird dieser Mischung 1 M.-% Traubentrester als Presshilfsstoff zugegeben. Die folgenden Kapitel sollen erläutern, ob es die Brennstoffeigenschaften dieser Biomassen erlauben die Mischpellets in KFA`s zu verbrennen. Bei dieser Betrachtung wird die elementare Zusammensetzung des Traubentresters nicht näher beleuchtet, da dieser nur in einer geringen Dosis beigemischt wird.

6.4.1 Brennstoffeigenschaften *Miscanthus x giganteus*

In Kapitel 6.1.1 wurden bereits die Ergebnisse der Aschegehalte von Miscanthus, als einen der wichtigsten Brennstoffparameter diskutiert. Im Folgenden wird dargestellt in wie weit der Stickstoff-, Schwefel-, Chlorgehalt und Brennwert von *Miscanthus x giganteus* in Abhängigkeit von Standort, Typ und Erntejahr variieren kann.

Brennwert

Die Bestimmung der Brennwerte von vier verschiedenen *Miscanthus x giganteus* Typen ergab, dass die Brennwerte nur minimal variierten (siehe Tabelle 18). Dabei lagen die Brennwerte alle innerhalb der Normwerte.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen von BIERTÜPFEL et al. (2011) und SCHNEIDER (2011). Daraus wird ersichtlich, dass der Standort, das Erntejahr und der 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.

N-, S- und Cl- Gehalt

Des Weiteren zeigt Abbildung 41 (Kapitel 5.4.1), dass alle vier untersuchten Miscanthus Varianten die Stickstoffgrenzwerte einhalten. Dagegen überschreitet Miscanthus generell die Grenzwerte in Schwefel- und Chlorgehalt. Die Ergebnisse der Schwefelgehaltsanalysen sind in Frage zu stellen, da diese bei allen Varianten 0,1% betrug. Dieser homogenen Schwefelgehalte ist vermutlich auf Analysegrenzen zurückzuführen, die durch die Untersuchungsmethode limitiert wurden. Allgemein weichen diese Werte von den bisherigen Literaturangaben ab. BIERTÜPFEl et al (2011), LEWANDOWSKI et al. (2000), RÖHRICHT et al. (2002); OBERNBERGER et al. (2006) und SCHNEIDER (2011) ermittelten deutlich höherer 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 6.1.1.1 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. 63), ist davon auszugehen, dass neben dem Standort, dem Bestandesalter und der Jahreswitterung, der Erntezeitpunkt einen deutlichen Einfluss auf diese Differenz hatte.

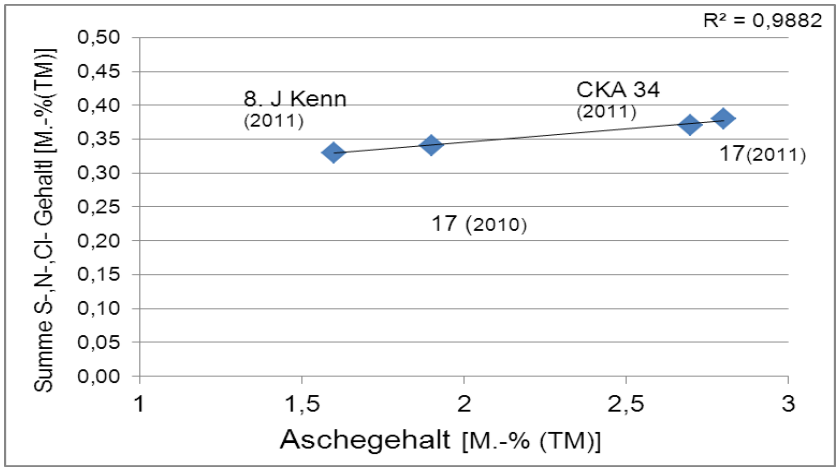

Abbildung 63: Korrelation zwischen Aschegehalt und Summe der Gehalte von Schwefel, Stickstoff und Chlor von verschiedenen *Miscanthus x giganteus* Typen

Desweiteren kann durch den Vergleich der N-, S- und Cl- Gehalte der Varianten geschlussfolgert 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 Untersuchungen ergaben, dass die ermittelten Werte bereits im unteren Bereich der Literaturangaben waren. In Bezug zu den Grenzwerten der DIN_EN 14961-2 A2 lag bei allen vier *Miscanthus x giganteus*- Typen lediglich der Stickstoffgehalt unterhalb dieser Grenzwerte. Dagegen überschritten, mit Ausnahme des Typs 34 Kenn 8. J., die Cl- und S-Gehalte aller Varianten die Grenzwerte über 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 passieren und zum anderen durch eine künstliche Bewässerung auf Mieten erreicht werden. Gegen diese Maßnahme spricht zum einen, dass solche Maßnahmen in der Praxis noch nicht erprobt worden sind und zum anderen würden die Erntekosten, die nach SIEVERDINGBECK et al., (2010) einen Großteil der Produktionskosten bestimmen, deutlich ansteigen.

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 bei späten Ernteterminen am geringsten ist (LEWANDOWSKI et al., 2003).

Ascheschmelzverhalten

Die Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens von Miscanthus (Typ 34 Kenn 8. J.) nach optischer Methode ergab eine DT von 1.020°C. Damit lag die DT des Miscanthus unterhalb der von EN_{plusA2}-Pellets geforderten DT von 1.100°C (siehe Tabelle A6, Anhang).

Da die Verbrennung von Pellets in KFA´s meist bei Brennraumtemperaturen von über 1.000°C stattfindet (KALTSCHMITT et al., 2009), muss davon ausgegangen werden, dass es bei der Verbrennung des Miscanthus vom Typ 34 Kenn 8.J. in Mischpelletform zu Verschlackungen im Brennraum kommt.

Die Verschlackungsneigung von Biomassen ist laut ÖHMANN et al. (2009) auf das Alkali- bzw. Erdalkali- Verhältnis in Relation zu dem 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 in dem Blattanteil der Biomasse in Form von Kieselsäure ($SiO_{2(s)}$) gebunden ist (PUDE, 2005; PUDE et al. 2005).

RAMPEREZ et al. (2012) beschreiben, dass eine Erhöhung des Kaliumgehaltes in Miscanthus zu einer Verringerung der DT führen. 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 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. Dies raten auch MONTI et al., (2008).

Desweiteren sollte bei einer möglichen Düngung, zur Ertragserhaltung des Miscanthus-Bestandes, darauf geachtet werden dass kein Kalium zugeführt wird, um die Kaliumakkumulation in der Biomasse zu reduzieren. 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. Die gleiche Empfehlung, zu Erhöhung der DT, geben auch CADOUX et al. (2012).

Zusätzlich zu dem negativen Einfluss von Kalium weißt BAXTER et al. (2012) daraufhin, 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.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Brennstoffeigenschaften haben gezeigt, dass *Miscanthus x giganteus* mit Ausnahme des S-, des Cl-Gehaltes und der Ascheerweichungstemperatur die verbrennungsrelevanten stofftechnischen Anforderungen von ENplusA2- Pellets erfüllen kann.

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 zu geführt 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.

6.4.2 Brennstoffeigenschaften *Paulownia tomentosa*

In Kapitel 6.1.2 wurde bereit dargestellt, dass *Paulownia tomentosa* mit 0,78 M.-% im Vergleich zu anderen landwirtschaftlich erzeugten Biomassen einen sehr geringen Aschegehalt hat. Das folgende Kapitel soll erörtern, ob in Bezug auf die weiteren verbrennungstechnisch relevanten Eigenschaften Paulownia als Rohstoff für die Mischpelletproduktion zu empfehlen ist.

Brennwert

Der ermittelte Brennwert liegt mit 19,4 MJ kg^{-1} im oberen Bereich der von LOPEZ et al., (2012); VILLANEUVA et al., (2013), KARAMPINIS et al. (2012) und MEIER und VETTER (2004) ermittelten Ho (18,3 – 19,9 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 (17,5 – 21 MJ kg^{-1}).

N-, S- und Cl-Gehalt

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 von einander abwichen (siehe Tabelle 20, Kapitel 5.4.2). Mit Ausnahme von Stickstoff waren die ermittelten Gehalte von Schwefel- und Chlor aus Labor II, welches nach EN-Norm (DIN_CEN/TS 15289) analysierte, niedriger als die die aus Labor I, welches nach der alten deutschen Norm untersuchte (DIN 51724-1 bzw. DIN 51727).

Diese Norm insbesondere am Beispiel von Schwefel zeigt sich, dass das Labor I nur ungenau den Schwefelgehalt von Biomassen bestimmen konnte, da alle analysierten Biomassen (siehe auch Abb.) einen Schwefelgehalt von 0,1 M.-% hatten. Diese Ungenauigkeit der Analysewerte ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, das 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 zeigte Paulownia (siehe Tabelle 20, Kapitel 5.4.2) mit Ausnahme des Stickstoffgehaltes bessere Brennstoffeigenschaften. Paulownia erfüllte in Bezug auf die untersuchten Brennstoffeigenschaften (0,5 M.-% N, <0,02 M.-% Cl) nahezu alle verbrennungstechnisch relevanten Anforderungen der EN 14961-2 A2. Lediglich der Schwefelgehalt lag mit 0,037 M.-% knapp über dem Normgrenzwert von 0,03 M.-%. Der Chlorgehalt konnte aufgrund methodenbedingter Grenzen nicht exakt festgestellt werden. Allgemein lagen diese Werte im Rahmen der Literaturangaben (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: 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 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. Um die Akkumulation von Schwefel näher beschreiben zu können, bedarf es weiterer Forschung. Möglicher weise könnte es durch Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen gelingen, den Schwefelgehalt in der Biomasse von Paulownia zu reduzieren.

Ascheschmelzverhalten

Die Untersuchungen des Ascheschmelzverhaltens zeigten, dass die Ascheerweichungstemperatur von Paulowniaholz bei 1.290°C liegt (optische Methode). Die bisher einzigen Vergleichswerte lieferten KARAMPINIS et al. (2012). Deren ermittelte DT (1.138°C) lag im Vergleich zu den eigenen Analyse um 150°C niedriger.

Zusätzlich zeigen diese Autoren auf, dass die von ihnen untersuchte Paulowniabiomasse minimale Silizium- und hohe Kalium- bzw. Calciumgehalte hatte.
Die Untersuchungen von RÖHRIG (2012) bestätigten dies auch für die Paulownia-Biomasse, welche im Projekt „C4-Kompakt“ verwendet wurde.
Es kann festgehalten werden, dass die DT von Paulowniaholz, aufgrund sehr geringer Siliziumgehalte über 1.100 °C liegt und somit die Anforderungen von ENplusA2-Pellets erfüllt.

Zusammenfassung

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 ENplusA2 erfüllt. Somit ist Paulownia aus verbrennungstechnischer Sicht ein geeigneter Mischungspartner für die Miscanthus-Mischpelletproduktion. Des Weiteren ist fest zu halten, dass Biomasse aus älteren Paulowniabeständen, aufgrund von geringeren Rindenanteilen, vermutlich bessere Brennstoffeigenschaften (geringerer Asche und Schwefelgehalt) besitzt als jüngere.

6.4.3 Beurteilung der Brennstoffeigenschaften der Mischpellets

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

Die in Tabelle 21 (siehe Kapitel 5.4.3.) dargestellten Brennstoffeigenschaften der Mischpellets stimmen weitestgehenst mit den Ergebnissen der Brennstoffanalysen der einzelnen Biomassen überein. Dabei sind die Werte des Asche-, N-, S-, Cl- Gehaltes und des Brennwertes der Pellets ähnlich, wie die der arithmetischen Mittel 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 den Aschegehalt, Brennwert und Stickstoffgehalt. Dagegen überschreiten die Gehalte an S und Cl die Grenzwerte leicht.
Aufgrund dieser Tatsache muss festgehalten werden, dass die produzierten Miscanthus-Mischpellets die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) nicht erfüllen.
Aus Kapitel 6.4.1 geht hervor, dass die S- und Cl- Gehalte von Miscanthus mehr als doppelt so hoch sind, wie die Grenzwerte der Norm. Desweiteren wurde auch beschrieben, dass eine weitere Reduktion dieser Gehalte von Miscanthus fraglich ist.
Deshalb muss festgehalten werden, dass Miscanthus-Mischpellets mit einem Miscanthusanteil von mindestens 50 M.-% die Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) niemals erfüllen können.

Damit Miscanthus-Mischpellets die Norm erfüllen müsste der Miscanthus-Anteil so weit reduziert werden, dass die S- und Cl-Gehalte die Grenzwerte einhalten. In einem solchen Fall wäre der Miscanthusanteil im Vergleich zu dem Mischungspartner nur marginal (10 – 20 M.-%), sodass die Pellets als Holzmischpellets benannt werden müssten. Um dennoch Miscanthus-Mischpellets in KFA´s verbrennen zu dürfen, müssten Pellets nach der neuen Mischpelletnorm DIN_EN 14961-6 (siehe Tabelle A1, Anhang), in der 1. BImSchV. unter § 3 (zugelassene Brennstoffe) aufgeführt werden. Da dies aber bisher nicht der Fall ist dürfen derzeit keine Miscanthus-Mischpellets in KFA´S verbrannt werden.
Neben den verbrennungstechnischen Problemelementen N, S und Cl, schreibt die DIN_EN 14961-2 und -6 auch bestimmte Grenzwerte an Schwermetallgehalte in den Pellets vor. Diese müssten in einem möglichen Zertifizierungsprozess ebenfalls untersucht und eingehalten werden.

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), KARAMPINIS et al. (2012) und BAXTER 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. 64) durchgeführt wurden (WENGHOEFER et al. 2012).

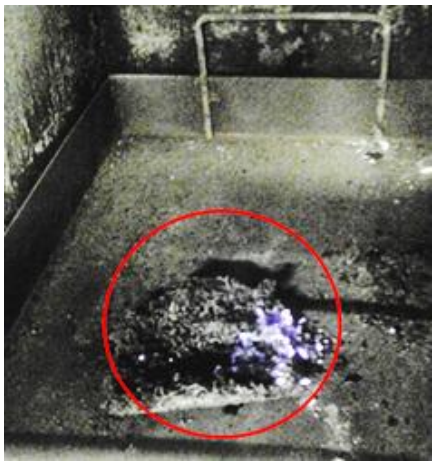

Abbildung 64: Verschlackung der Asche während eines ersten Verbrennungsversuches von Miscanthus-Mischpellets (50 M.-% Miscanthus / 50 M.-% Paulownia) durch die FH Köln (Bild: Steinbüchel 2011)

Trotz dass der Miscanthus eine DT von 1.020°C und die Paulownia eine DT von 1.290 °C hatten 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.

Wie schon in Kapitel 6.4.1 dargestellt verringert eine Erhöhung des Kaliumgehaltes die Ascheerweichungstemperatur von siliziumreichen Biomassen.
Die Untersuchungen von RÖHRIG (2012), welche die Si-, K- und Ca-Gehalte von Miscanthus (Typ 34 Kenn 8. J.), Paulownia und der Mischpellets analysierte (siehe Tabelle 26), ergaben, dass das sich Si / K Verhältnis der Mischpellets (0,84) im Vergleich zu dem reinen Miscanthus (2,55) verringerte. 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 in den Mischpellets, im Vergleich zu Miscanthus, geringer ist.

Tabelle 26: 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		
	M. x g. 34 Kenn 8. J.	*P. t.*	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			

Wie schon in Kapitel 6.4.1 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) stellten fest, dass Kalium und Silizium bei der Verbrennung von Biomassen mit einander zu $K_2Si_4O_9(s)$ reagieren können. Dieses Alkalisilikat hat eine Schmelztemperatur von 800°C. Aufgrund dieses Mechanismus kann es bei Brennraumtemperaturen von über 1000°C zur Agglomeration von kalium- und siliziumreichen Aschen kommen. Als mögliche Maßnahme gegen die Schlackebildung, schlugen diese den Einsatz von Kaolin vor. Dazu bestätigten FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008), BOSTRÖM et al. (2009), PETTERSON et al. (2009) und KHALIL et al. (2011), dass die Zugabe von Kaolin während der Verbrennung von Biomassen die Schlackebidung minimieren kann. Des Weiteren beschreiben diese Kaolin als ein deutlich effektiveres DT-erhöhendes Additiv, als beispielsweise Calciumcarbonat ($CaCO_3$), Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$), Dolomit ($CaC0_3 \cdot MgC0_3$).

In dem folgenden Kapitel 6.6 werden die Ergebnisse des Kaolinbeimischungsversuches zu den Mischpellets diskutiert und die Wirkung von Kaolin auf das Ascheschmelzverhalten erörtert.

Verbrennungseigenschaften der Mischpellets

Der von WENGHOEFER et al. (2012) beschriebene Verbrennungsversuch von Miscanthus-Mischpellets (50 M.-% Miscanthus / 50 M.-% Paulownia) weist darauf hin, dass während der Verbrennung die, von der 1. BImSchV (2. Stufe) geforderten, Grenzwerte der CO-, NO_x- und Staubemmissionen eingehalten werden könnten (siehe Abb. A 1, Anhang). Dieses erste Ergebnis wird derzeit in weiteren Kurz- und Langzeitverbrennungsversuchen von der FH Köln und der Viessmann AG überprüft. Da diese Versuch noch nicht beendet sind kann nicht abschließend beurteilt werden, ob die Verbrennung der Pellets die emmissionsrechtlichen Anforderungen erfüllen.

Zusammenfassung

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 lag der S- und Cl-Gehalt minimal über den Grenzwerten dieser Norm. Daraus resultiert, dass die Pellets nicht der Norm entsprechen. Damit Miscanthus-Mischpellets in KFA´s 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 KFA´s verbrannt werden.

Entgegen der Hindernisse, die sich aus der Brennstoffart ergeben, lässt ein erster Verbrennungsversuch vermuten, dass die Mischpellets die emmissionsrechtlichen Anforderungen erfüllen könnten.

Aus anlagentechnischer Sicht würde es dagegen bei der Verbrennung der Mischpellets, ohne eine Zumischung von Additiven, vermutlich zu einer Verschlackung des Brennraums führen.

6.5 Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur der Mischpellets durch eine Beimischung von Kaolin

In dem vorherigen Kapitel zeigte sich, 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 wurde, dass die Beimischung von Kaolin zu Biomassen eine Maßnahme zur Erhöhung der DT sein kann, wurde im Rahmen des Projektes untersucht, wie viel Kaolin der Biomasse beigemischt werden muss, um eine DT von über 1.100°C zu erreichen.

Es zeigte 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 4.6 beschrieben, das Kaolin den verschiedenen Gemischformen zugegeben. Alle drei Varianten zeigten bei steigenden Kaolinzuschlagsmengen die gleichen Tendenzen auf. Dabei erhöhten sich die DT´s bei steigender Zuschlagsmenge (siehe Abb. 43). Dieses Ergebnis bestätigt - auch für Miscanthus-Mischpellets - die Aussagen von GATTERNIG et al. (2010), FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008), BOSTRÖM et al. (2009), PETTERSON et al. (2009) und KHALIL et al. (2011), dass Kaolin die DT von Biomassen erhöht.

Laut BOSTRÖM et al. (2009) ist diese Wirkung auf die Alkali- bzw. Erdalkalibindung durch Kaolin während der Verbrennung zurückzuführen. Kaolin ist ein Zweischichttonmineral, welches primär aus Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) besteht (TRAN et al., 2005). Nach deren Erkenntnis verdampft der Erhitzung des Kaolinits auf 500 - 600°C Wasser, sodass ein meta-Kaolinit-Komplex ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) entsteht (1).

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O \quad (1)$$

Dieser meta-Kaolinit-Komplex kann beispielsweise, bei SiO_2 Mangel mit KCl und H_20 zu Kalcilit ($2KAlSiO_4$), (2),

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2KCl + H_2O \rightarrow 2KAlSiO_4 + 2HCl \quad (2)$$

oder mit SiO_2, KCl und H_2O zu Leucit ($2KAlSi_2O_6$) (3) reagieren.

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2SiO_2 + 2KCl + H_2O \rightarrow 2KAlSi_2O_6 + 2HCl \quad (3)$$

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

Da die Mischpellets sowohl hohe K- als auch Si- Gehalte aufweisen (siehe Tabelle 26), kann vermutet werden, dass das Kaolin bei der Verbrennung primär zu Leucit reagiert (Gleichung 1 + 3). Da die Aschen aber nicht nähergehend untersucht wurden, konnte diese Annahme nicht verifiziert werden.

BOSTRÖM et al. (2009) und FERNANDEZ-LLORENTE et al. (2008) weisen darauf hin, dass die in Gleichung 2 und 3 dargestellten Reaktionen anstatt 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 gehabt 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 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 in dem Brennraum zunehmen. ZENG (2010) stellte bei der Verbrennung von Miscanthus fest, dass die Beimischung von 1 M.-% 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 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 durch das Teilprojekt 2 untersucht.

<u>Zusammenfassung und Bedeutung für die Entwicklung der Mischpellets</u>

Es kann festgehalten werden, dass Kaolin ein geeignetes Additiv zur Erhöhung der DT von kalium- und siliziumreichen Biomassen ist. Zudem wurde alternative Reaktionen von Kaolin mit Calcium und anderen Kali-Verbindungen erörtert. Aus diesen Ausführungen ging hervor, dass Kaolin ein komplex wirkendes Additiv ist, dessen Wirkung auf die Verbrennung von Biomassen noch weiter untersucht werden sollte.

Da sich zeigte, dass ein Zuschlag von 0,25 M.-% Kaolin die DT der Mischpellets auf über 1.100°C erhöhte wurde während des in Kapitel 4.7 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.-% prozentige Kaolinbeimischung eine theoretische Aschegehalterhöhung auf 1,75 M.-% zur Folge hatte.

Um die Versuchsergebnisse für die Praxis bestätigen zu können, muss auf die Verbrennungsversuche des Teilprojektes 2 gewartet werden.

6.6 Praxisversuch der Pelletierung bei Amandus Kahl

6.6.1 Vorversuch zur Identifikation geeigneter Maschineneinstellungen

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 der Pelletierung mit einer 6 mm Lochmatrize und einer Presskanallänge von 42 mm ergab, dass die visuelle Pelletquallität bei steigender Durchsatzerhöhung (bis 400 kg h^{-1}) zunahm. Dieses Ergebnis steht erst einmal im Widerspruch zu den erörterten Ergebnissen aus Kapitel 6.4.3, in dem sich zeigte, dass eine Durchsatzerhöhung zu einer Verbesserung der Pelletqualität führte. Bei näherer Betrachtung wird jedoch ersichtlich, dass der Wassergehalt der Biomasse-Gemische, im Gegensatz zu den in Kapitel 4.4 beschriebenen Versuchen (14 M.-% H_2O), in dem Praxisversuch geringer war (10 – 11 M.-%. H_2O). Somit hatten in dem Praxisversuch die Biomassegemische vermutlich aufgrund eines veränderten Ligninerweichungsverhaltens – durch die Änderung des Wassergehaltes bedingt – andere Pelletierungseigenschaften. Somit bestätigen sich die Erkenntnisse aus Kapitel 3.2.2 und 6.3, dass die Pelletqualität multifaktoriellen Einflüssen und deren Wechselwirkungen unterliegt.

Dennoch können die Ergebnisse aus Tabelle 22, vermutlich durch den Anstieg der Matrizentemperatur erklärt werden. Weiterhin ist aus dieser Tabelle zu entnehmen, dass die Temperatur der Pellets mit einer Durchsatzerhöhung anstieg. Daraus resultiert, 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 4.1.2).

Parallel zu der Verbesserung der visuellen Pelletquallität sank der spezifische Energiebedarf mit steigender Durchsatzmenge bis zu einem Leistungsbedarf, der 85 % der maximalen Antriebsleistung entspricht. Ab einem Leistungsbedarf von 90% der maximalen Antriebsleistung beginnt der spezifische Energiebedarf wieder zu steigen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 6.3.3.

In der Summe bestätigte der Praxisversuch an einer größeren Pelletpresse (Typ 33/390) die Erkenntnisse aus den Laborversuchen (Typ 14-175) und die Aussagen von BUSCHHART (2012), das die optimale Betriebsleistung von Pelletpressen bei 80 - 90% der maximalen Antriebleistung liegen sollte. Diese Betriebsleistung wird neben der Biomasseart, -beschaffenheit und Matrizenwahl von der Durchsatzmenge beeinflusst.

Miscanthus x giganteus-Fichten-Gemisch

In Tabelle 22 bestätigt sich ebenfalls die Erkenntnis aus Kapitel 6.3.3, dass die Matrizenwahl auf die Biomasseart abgestimmt werden muss. So geht aus den Versuchsnummern 6 und 7 hervor, dass bspw. 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 Reibungswiederstand zwischen Matrize und Material größer war, als die Kraft die durch den Koller auf das Material wirkte. Somit konnte nach den Ausführungen von HOLM et. al (2006) das Material nicht durch die Löcher der Matrize gepresst werden.

Zusammenfassung

Grundsätzlich bestätigte der Vorversuch die Erkenntnisse aus dem Kapitel 6.3 und zeigte damit, dass die in den Laborversuchen identifizierten Mechanismen auch auf größere Pelletpressen übertragbar sind. Insbesondere wurde in dem Praxisversuch dargestellt, dass die Betriebsleistung der Pelletpresse 80 – 90% der maximalen Antriebsleistung aufweisen sollte. Des Weiteren ist zu entnehmen, dass die Matrizenwahl auf die chemische und physikalische Zusammensetzung des Biomassegemisches abgestimmt werden sollte. Aus diesem Grund kann aus dem Projekt „C4 Kompakt“ keine allgemeingültige Empfehlung für Maschineneinstellungen während der Miscanthus-Mischpelletproduktion gegeben werden.

6.6.2 Hauptversuch

In dem Hauptversuch konnte durch die in den Vorversuchen ermittelten Maschineneinstellungen (siehe Tabelle 22 Nr.4 und Nr.8) ein stabiler Pelletierungsprozess hergestellt werden. Dabei zeigte sich, dass die Pelletierung der Miscanthus-Mischung mit Paulownia und ohne Kaolin am wenigsten Energie benötigte. Die beiden Varianten mit Kaolin hatten einen mittleren spezifischen Energiebedarf und die Variante Fichte ohne Kaolin hatte den signifikant höchsten Energiebedarf.

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 Fichtenholz - geringen Wert des Elastizitätsmoduls von Paulowniaholz (AKYILDIZ und KOL, 2010) 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 Paulowniaholz enthalten sind (SI et al., 2011) als Schmiermittel zwischen Material und Matrize 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); STELTE et al. (2011a) und KALIYAN und MOREY (2009), 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. Dem gegenüber hatte bei dem Miscanthus-Fichtengemisch die Variante ohne Kaolin den höheren spezifischen Energiebedarf, sodass auf den ersten Blick ein gegensätzliches Wirkverhältnis erkennbar ist. Mit Einbeziehung der Tabelle 8 wird aber ersichtlich, dass der Wassergehalt der Miscanthus-Fichten-Mischung mit Kaolin größer war, als bei der Variante ohne Kaolin. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Verringerung des spezifischen Energiebedarfes bei der Variante mit Kaolin 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 zu einen auf eine möglich Abrassivität von Kaolin oder zum anderen auf eine Vergrößerung der Reibungsfläche zurückzuführen sein.
Da 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 abbrasiv einzuschätzen. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass primär die Reibungsflächenerhöhung durch die Kaolinpartikel den Energiebedarf beeinflussen.
Vermutlich haften die Kaolinpartikel an der Oberfläche der Biomassepartikel an und erhöhen somit die gesamte Reibungsfläche zwischen Material und Matrize. Diese Vergrößerung der Reibungsoberfläche führt zu einer Erhöhung des Reibungskoeffizienten, sodass der Kraftaufwand für den Pressvorgang ansteigt. Ein Indiz für diese höhere Reibung während der Pelletierung der Kaolinvariante könnte insbesonders die Temperaturerhöhung der Miscanthus-Paulownia-Pellets mit Kaolin sein.

Der Vergleich der 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 wird dieReibungskoeffizient erhöhende Wirkung des Kaolins durch die Schmiermittelwirkung des Wassers eingeschränkt.

Einfluss der Biomasseart auf die physikalische Pelletqualität

Die in Abbildung 49 (Kapitel 5.6.3) dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass mit Ausnahme der Abriebfestigkeit der Variante Miscanthus und Fichte mit Kaolin die Pellets der Miscanthus-Fichten-Gemische eine bessere Pelletquallität als die Miscanthus-Paulownia-Gemische aufwiesen. Dies ist wahrscheinlich auf einen höheren Reibungskoeffizient der Miscanthus Fichtenpellets zurückzuführen. In Kapitel 6.2.4.2 (Zerkleinerung von Holz mittels Kollermühle) wurde bereits erörtert, woher dieser höhere Reibungskoeffizient resultiert. 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 hatten, die schlechteste physikalischen Eigenschaften aufweisen. Die Kaolinzugabe zu dem Gemisch führte zu einer besseren Pelletqualität. Dieser Anstieg ist wahrscheinlich auf die Temperaturerhöhung während des Pressvorgangs zurückzuführen. In Kapitel 6.3 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 Wiederstand 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 hatten 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 verringerte sich die Abriebfestigkeit und Schüttdichte der Variante mit Kaolin.

Diese Verringerung der Qualität ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. Die Abriebfestigkeit kann zum einen vermutlich auf die geringere Ligninerweichung erklärt werden und zum anderen ist davon auszugehen, dass die Kaolinpartikel zwischen den Biomassepartikeln hydrophob gewirkt haben.

Durch diese hydrophobische Wirkung entstanden wahrscheinlich weniger Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Partikeln, sodass die Bindungskräfte in den Pellets geringer waren.

Des Weiteren 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 in dem Massedurchsatz der beiden Miscanthus-Fichten-Varianten, 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.

Zusammenfassung

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-Fichtenpellets aber eine bessere physikalische Qualität, als die Miscanthus-Paulownia-Pellets auf. Dennoch ist aufgrund der Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.3 und 6.3 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 insbesonders die physikalische Größe des Reibungskoeffizienten, welche den spezifischen Energiebedarf und die physikalische Pelletquallität 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 entgegen gewirkt 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 im Rahmen des Projektes dieses Phänomen nicht näher untersucht werden konnte, sollten zukünftige Forschungsarbeiten diese Fragestellung näher untersuchen, da in Kapitel 6.5 aufgezeigt wurde, dass eine Kaolinbeimischung die Brennstoffquallität von Pellets verbessern kann.

Generell bestätigte der Hauptversuch die bereits in den vorherigen Kapiteln gewonnen Erkenntnisse, dass eine Vielzahl von Faktoren die Pelletierung von Biomassen beeinflussen. Somit lässt sich festhalten, dass jeder Pelletierungsprozess an die Biomassegemische angepasst werden muss, um eine optimale Qualität zu garantieren.

Auch wenn in dem Hauptversuch nicht alle Varianten die Anforderungen der Pelletnorm einhalten konnten, 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.

6.7 Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit der in Kapitel 4.8 geplanten Miscanthus-Mischpelletproduktion ergab, dass die Unternehmung einen jährlichen Verlust von 238.127 € erwirtschaften würde. Dabei beträgt die interne Rendite -12,9%. In der Summe muss somit festgehalten werden, dass die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion unter den getroffenen Annahmen unrentabel ist.

Allgemein wurden im deutschsprachigen Raum so gut wie keine vergleichbaren Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion durchgeführt. Die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsanalysen, die außerhalb des deutschsprachigen Raumes durchgeführt wurden - wie z. B. von PIRRAGLIA et al. (2010) oder MANI et al. (2006b) -, 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 liefert 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.

Des Weiteren führten THEK und OBERNBERGER (2004) eine umfangreiche Berechnung der Produktionskosten für Holzpellets in Österreich durch. Auch die ausführliche Analyse dieser Ergebnisse ist wenig hilfreich, da diese Untersuchungen auf einem Preisniveau vor 2004 basieren.

Aufgrund des Defizites an Vergleichsdaten wurde im Rahmen des Projektes 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 konnte in der vorliegenden Arbeit die eigenen Kennwerte nicht mit anderen Angaben verglichen werden.

6.7.1 Kosten als Schlüsselfaktoren der Pelletproduktion

Da bereit festgestellt wurde, dass die Mischpelletproduktion des Planszenarios unrentabel ist, soll in dem folgenden Abschnitt anhand von Schlüsselfaktoren aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen eine Produktion von Miscanthus-Paulownia-Mischpellets rentabel sein könnte. Anhand der Abbildung 52
(Kapitel 5.7.2) lassen sich kostenseitige Schlüsselfaktoren identifizieren. Dabei ist der Rohstoffeinkauf der bedeutendste Kostenfaktor. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006b).

Rohstoffkosten

Wie bereits in Kapitel 5.7.2 dargestellt wurde müssten die Rohstoffkosten um 25% von 85 (Planszenario) auf 63,5 € t^{-1} sinken, damit die Gewinnschwelle erreicht würde.
Aus Tabelle 13 (Kapitel 4.8) geht hervor, dass sich die Rohstoffkosten zum einen aus den Produktionskosten und den 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 den gesamten Kostenposten reduzieren. Auch DI GIACOMO und TAGLIERI (2009) bemaßen dem Transportweg einen bedeutenden Einfluss auf den Schlüsselfaktor Rohstoffkosten bei.
In Kapitel 4.8 wurde angenommen, dass der bei einem Transportweg von 30 km Transportkosten von 20 € t^{-1} entstehen. Würden 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 € t^{-1} sinken würden. Damit sowohl 5.000 t Miscanthus und als auch 5.000 t Paulownia aus diesem Umkreis von 15 km bezogen werden können, müssten rund 300 ha Miscanthus (Ertrag von 15 t ha^{-1} TM) und 400 ha Paulownia (Ertrag 12 t ha^{-1}) in diesem Bereich angebaut werden.
Es kann festgehalten werden, dass die Rohstoffkosten durch eine Verringerung der Entfernung von Feld zu Pelletwerk reduziert werden können. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese Verringerung der Strecke von Feld zu Pelletwerk zur Folge hat, dass es schwieriger wird die entsprechend benötigte Anbaufläche zu erhalten.

Zusätzlich dazu könnten möglicherweise die Transportkosten durch eine Erhöhung der Schüttdichte des Miscanthus-Erntegutes gesenkt werden. Da Miscanthus Erntegut ohne Vorkomprimierung mit von 140 kg m-3 eine relativ geringe Schüttdichte hat (HAYER 2010), wird oft das maximale Ladegewicht von Transportfahrzeugen ausgelastet. Eine Vorkomprimierung hätte zur Folge, dass die bei gleichem Ladevolumen die Transportmasse zunimmt.

Eine solche Vorkomprimierung könnte beispielsweise durch eine Erntekette nach dem „Luxemburger Modell“ erreicht werden. Bei diesem Ernteverfahren (siehe Abb. 65) wird Miscanthus in eine Quaderballenpresse gehäckselt, welche den Miscanthus vorkomprimiert. Nach NEUBARTH und KALTSCHMITT (2000) kann durch eine Quaderballenpresse die Schüttdichte um ca 100% erhöht werden. Somit könnten die Transportkosten um 50% durch eine Vorkomprimierung reduziert werden.

Abbildung 65: Miscanthus-Ernteverfahren „Luxemburger Modell“ (Quelle: ANKEN et al. 2012)

Falls vorkomprimierter Miscanthus in der Mischpelletproduktion eingesetzt würde müsste dem Produktionsprozess als ersten Prozessschritt eine Ballenauflösung beigefügt werden.

Personalkosten

Gefolgt von den Rohstoffkosten benennen THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006b) die Personalkosten als zweit höchste Kostenposition. 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 geändert werden können, ist in Bezug auf die Gesamtkostenberechnung keine Kostenminimierung möglich.

Energiekosten

Als dritt größten Schlüsselfaktor beschreiben THEK und OBERNBERGER (2004) und MANI et al. (2006b) die Energiekosten. In deren Szenarien verursachen vor allem Trocknungskosten (thermische Energie) hohe Energiekosten, die 30 bis 40% der Gesamtkosten verursachten. Dabei betrug neben den Stromkosten der Anteil der Kosten für Wärme knapp 70% der Energiekosten.

Im Gegensatz zu diesen klassischen Produktionsszenarien, die primär feuchte Sägespäne (40 M.-% H_2O) als Rohstoff einsetzen hatten die Kosten für thermische Energie (5%) in dem eigenen Szenario eine untergeordnete Rolle, da die Miscanthus mit einem Trockenmassegehalt von 85 M.-% (Erntezeitpunkt April) angeliefert wurde. Lediglich Paulownia müsste mit einem erntefrischen Wassergehalt von 50 M.-% (MEIER und VETTER, 2004) auf 10 M.-% (H_2O) 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 bündelt und vor dem Häckseln ein halbes Jahr trocknen lässt.

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, war der Anteil für Strom mit 8% der Gesamtkosten höher. Bezieht man die Strompreiseentwicklung der letzten 10 Jahre - mit einer Steigerung um 40% (ANONYMUS 4 2013) – hinzu, so wird deutlich, dass insbesondere die Kosten für elektrische Energie ein Schlüsselfaktor der Pelletproduktion geworden sind. Sowohl mittel- und 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 6.2 aufgezeigt wurde, können neuartige Zerkleinerungsverfahren den Stromverbrauch der Pelletproduktion reduzieren. Aus dem Kapitel 6.2 geht weiterhin hervor, dass insbesonders die Substitution der Hammermühle durch die Kollermühle, sowohl in dem Prozessschritt der Zerkleinerung, als auch bei der Pelletierung Energie einsparen kann. Allerdings konnte im Rahmen des Projektes diese Einsparungspotential nicht näher quantifiziert werden.

Laut LEUER (2012) sind die Anschaffungskosten für eine Kollermühle nur geringfügig höher als die einer Hammermühle. Aus ökomischen Gründen ist daher zu empfehlen, dass ein potentieller Mischpelletproduzent anstatt einer Hammermühle eine Kollermühle einsetzt.

Weitere Produktionskosten

Aus Abbildung 53 geht hervor, 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 zu geschrieben, da diese Kosten kaum beeinflusst werden können. Insbesonders 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. (2006b) die Erhöhung der Produktionskapazität eines Pelletwerkes dar. So zeigten 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 zu Werk erhöht. Wie bereits zuvor beschrieben haben diese Transportkosten eine Schlüsselfunktion für die Gesamtkosten der Mischpelletproduktion. Da vermutlich eine Erweiterung der Produktionskapazität trotz sinkender Technikkosten aufgrund von höheren Gesamtkosten führen sollte, diese Option nicht in Betracht gezogen werden. Ebenso sollte die jährliche Produktionsmenge auch nicht niedriger als 10.000 t sein, da nach MANI et. al (2006b) bei sinkenden Produktionskapazitäten die Gesamtkosten exponentiell ansteigen.

Somit zeigt sich, dass die bei der Planung einer Mischpelletproduktion eine Abwägung zwischen Produktionskapazitäten und Transportwegen getroffen werden müssen. Diese Entscheidung sollte später in der Praxis anhand von örtlichen Gegebenheiten und Rohstoff- bzw. Flächenverfügbarkeiten getroffen werden.

Zusammenfassung

Am Beispiel des Planszenarios zeigte 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 Paulowniaerntegutes 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 Paulowniaholzes nicht nähergehend quantifiziert werden.

6.7.2 Erlös als Schlüsselfaktor der Pelletproduktion

In dem vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass in dem Planszenario die Kosten der Mischpelletproduktion möglicherweise auf 174 € t^{-1} minimiert werden könnten. Selbst in diesem optimalen Kostenszenario würde der Verlust je produzierter Tonne 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 der einer Minimierung der Kosten kann der Gewinn durch eine Steigerung des Erlöses maximiert werden (ROLLWAGE, 1999). Somit müsst der Erlös um mindestens 13 € t^{-1} erhöht werden, damit die Gewinnschwelle überschritten würde. Die Abbildungen 56 und 57 in Kapitel 5.7.2 zeigen dazu auf, dass zum einen die Erhöhung des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets und zum anderen ein höheres Preisniveau der Mischpellets den Erlös maximieren können.

Marktpreis EN_{plusA1}-Pellets

In dem Planszenario wurde ein EN_{plusA1}-Pelletpreis von 230 € t^{-1} angenommen. ANONYMUS 2 (2013) zeigte auf, dass dieser Preis je nach Region und Abnahmemenge zwischen 220 und 260 € t^{-1} schwankte. Insbesonders der Verkauf von Mengen (bis 5 t) erzielten dabei höhere Erlöse (durchschnittlich 240 € t^{-1}). Somit könnte eine Strategie zur Erlösmaximierung sein, einen möglichst großen Kundenstamm an Kleinabnehmern zu gewinnen.

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 wurden 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) wiesen darauf hin, dass eine verringerte Ausschöpfung der Produktionskapazität zu einem sinkenden Gewinn führen, da in einem solchen Fall die kapitalgebundenen Kosten einen höheren Kostenanteil bei geringeren Erlösen haben. Daraus resultiert vermutlich, dass die Pelletproduzenten versuchen ihre Kapazitäten voll auszuschöpfen, was wiederum in einer erhöhten Überschussmenge resultiert, sodass der Marktpreis weiter sinkt.

Dieser Wirkbeziehung 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 werde, dass die Nachfrage nach Qualitätspellets zunimmt. In dem Fall, dass keine weiteren Produktionskapazitäten in Deutschland geschaffen werden, ist davon auszugehen, dass auch der Marktpreis von Qualitätspellets zunimmt.

In diesem Szenario 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 zu dem Marktpreis des Planszenarios (230 € t^{-1}) um rund 9% auf 250 € t^{-1} steigen (siehe Abb. 66).

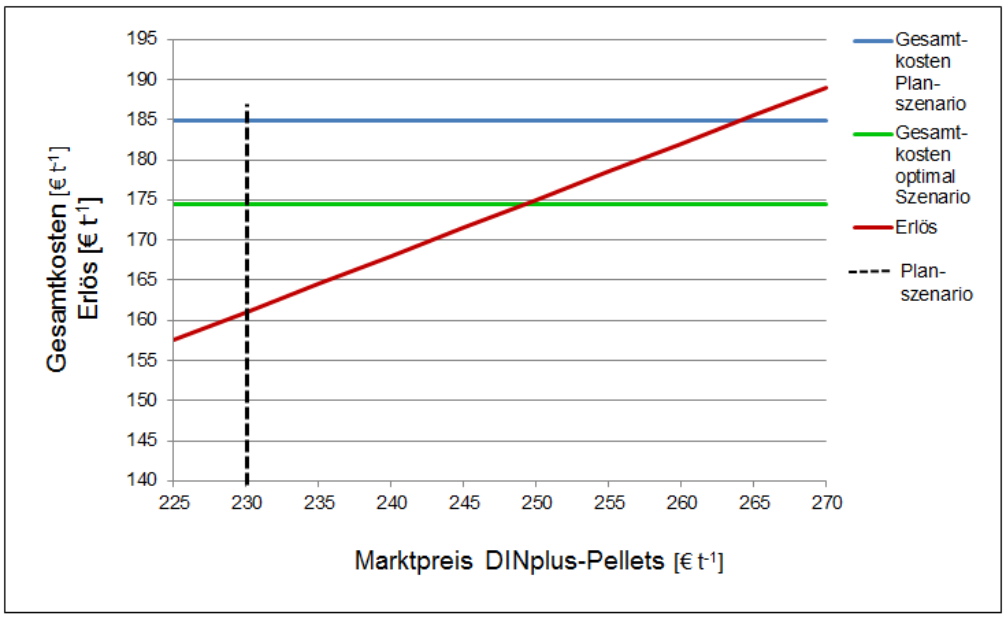

Abbildung 66: Kritischer Wert (Gewinnschwelle) des Marktpreises von EN_{plusA1}-Pellets für die Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion bei unterschiedlichen Kostenszenarien

Obwohl in diesem Szenario die Gewinnschwelle erreicht würde, wäre laut ANONYMUS 3 (2013) die Unternehmung immer noch nicht zu empfehlen, da die interne Rendite zu gering wäre. Damit die Mischpelletproduktion ökonomisch sinnvoll wird müsste die interne Rendite über 5% liegen, da der kalkulatorische Zinssatz 5% beträgt. Daraus resultiert, dass der Marktpreis der EN_{plus}-Pellets um insgesamt 14% auf 262 € t^{-1} steigen müsste, damit die Unternehmung rentabel wird.

Dieser Ziel-Marktpreis, welcher die Rentabilität der Miscanthus-Paulownia-Mischpelletproduktion (bei optimalem Kostenszenario) gewährleisten würde, ist ein durchaus realistischer Preis für EN_{plus}-Pellets.

Dies zeigt sich insbesondere in den Angaben von ANONYMUS 2 (2013), der darstellte, dass dieser Marktpreis 2012 bereits in manchen Regionen Deutschlands vorlag.

Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets

Falls der in dem vorherigen Abschnitt erörteret Ziel-Marktpreis von EN_{plusA1}-Pellets nicht erreicht werden kann, könnte lediglich noch eine Erhöhung des Preisverhältnisses Mischpellets / EN_{plusA1}-Pellets den Erlös und somit auch den Gewinn der Unternehmung steigern.

In Abbildung 55 (Kapitel 5.7.2) wurde für das ursprüngliche Planszenario - mit Gesamtkosten von 184,8 € t^{-1} - aufgezeigt, dass sich diese Preisverhältnis auf 0,8 ansteigen müsste, damit die Gewinnschwelle erreicht wird.

Dagegen müsst 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 4.8 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.

6.7.3 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit

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 müsst der Marktpreises für EN_{plusA1}-Pellets weiter auf 262 € t^{-1} steigen, damit eine interne Rendite von 5% erreicht würde.

Generell zeigte sich, dass die Mischpelletproduktion 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 Miscanthushäcksel 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 Miscanthushäcksel 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 die Europäische Union (EU) im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) das aktuell diskutierte „Greening“ von der Landwirtschaft fordern würde.

Laut Anonymus 4 (2013) würde eine mögliche Einführung des „Greenings“ bedeutet, dass Landwirte bestimmte ökologische Leistungen erbringen müssten, damit sie weiterhin die vollen Direktzahlungen erhalten. Solche ökologischen Leistungen sind Maßnahmen, die in der Summe die Umweltverträglichkeit der Landwirtschaft verbessern. Da Miscanthus eine außerordentlich umweltverträgliche Kultur ist (JONES und WALSH, 2001; STOLZENBURG, 2010, und LIEBHARD, 2010), welche auch im Vergleich zu konventionellen Ackerkulturen einen sehr hohen Gewinn erbringen kann, wäre der Anbau von Miscanthus im Rahmen des „Greeinings“ durchaus denkbar.

Falls das „Greening“ tatsächlich von der EU gefordert würde, könnte sich die Anbaufläche von Miscanthus sehr schnell erhöhen, sodass das Angebot an Miscanthus deutlich ansteigen würde.

In einem solchen Fall könnte dann aus Miscanthus in Form von Mischpellets ein handelsfähiges und transportwürdiges Gut entstehen.

7 Zusammenfassung

Seit dem Jahr 2000, hat sich in nur 12 Jahren der Bestand von Pelletheizungen in Deutschland von 3.000 auf 280.000 erhöht. Daraus resultierte, dass der Bedarf an Holzpellets bis 2012 auf 1,7 Mio. Tonnen anstieg. Wurden 2000 bis 2005 vornehmlich nur Sägerestholz als Rohstoff für die Pelletproduktion verwendet, musste im Jahr 2012 bereits 30% des Rohstoffbedarfes durch Industrieholz gedeckt werden (ANONYMUS 1, 2013). Der Preis für Industrieholz, welches klassischerweise stofflich genutzt wird (Zellstoffe, Spanplatten und Paletten), stieg von 2005 bis 2012 um mehr als 80% auf knapp 80 € t^{-1} (TM) (ANONYMUS 5, 2013).

Aufgrund der wachsenden Nachfrage nach Holzpellets und des Preisdruckes durch den Rohstoffmarkt auf die Pelletproduzenten, wurde durch das Projekt „C4-Kompakt“ untersucht, ob es in der Pelletproduktion möglich ist Fichtenholz durch Miscanthus und andere landwirtschaftlich erzeugte nachwachsende Rohstoffe zu ersetzen.

Das Primärziel des Projektes war die Entwicklung einer standardisierten Rezeptur für Miscanthus-Qualitäts-Mischpellets die in KFA´s verbrannt werden sollen. Als Grundlage für die Qualitätsanforderungen dieser Mischpellets wurde die DIN_EN 14961-2(A2) gewählt, da die Pellets dieser Norm nach der 1. BImschV in Kleinfeuerungsanlagen verbrannt werden dürfen. Generell sollten 50% der Mischrezeptur aus Miscanthus bestehen, da dieser ökologisch werthaltige nachwachsende Rohstoff (JONES und WALSH, 2001; STOLZENBURG, 2010, und LIEBHARD, 2010) gegenüber anderen Kulturen bei minimalem Ressourceneinsatz (Pflanzenschutzmittel, Dünger, Bodenbearbeitung und Flächenbedarf) den höchsten Biomasseertrag aufweist.

Des Weiteren sollte die Prozesskette der Pelletproduktion aus ökonomischer Sicht verbessert werden. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Optimierung des Zerkleinerungs-prozesses.

Abschließend erfolgte anhand einer Vollkostenrechnung eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Miscanthus-Mischpelletproduktion, um Aussagen über den ökonomischen Erfolg einer solchen Unternehmung treffen zu können.

7.1 Entwicklung einer standardisierten Mischrezeptur für Miscanthus-Mischpellets

<u>Vorversuche</u>

In den Vorversuchen wurde aufgezeigt, dass der Aschegehalt von Miscanthus, welcher ein Indikator für die elementare Zusammensetzung ist und somit die verbrennungstechnische

Qualität bestimmt, von den Faktoren Erntezeitpunkt, Bestandesalter, Genotyp und Standort beeinflusst wird.

Dabei zeigte sich, dass vor allem das morphologische Merkmal Blatt- / Stängelverhältnis durch diese Faktoren bestimmt wird. Aus den Untersuchungen ergab sich die Empfehlung, dass der Miscanthus für die Mischpelletproduktion erst ab Ende März bis Anfang April geerntet werden sollte, da dann das Blatt- / Stängelverhältnis am geringsten ist.

Des Weiteren sollte, wenn möglich, der Miscanthus für die Mischpelletproduktion aus möglichst alten Beständen bezogen werden, da ältere Bestände einen geringeren Blattanteil aufweisen, als Jüngere. Zu den Faktoren Genotyp und Standort können keine Empfehlungen gegeben werden.

Neben der Selektion geeigneter *Miscanthus x giganteus*- Typen wurde in den Voruntersuchungen der Aschgehalt verschiedener holzartiger NawaRo´s untersucht. Diese Analyse ergab, dass - neben Waldholz (Fichte) - das Holz der aus China stammende Baumart *Paulownia tomentosa* mit 0,75 M.-% den geringsten Aschegehalt aufweist.

Derzeit werden in Deutschland versuchsweise 100 ha Paulownia angepflanzt und insgesamt ist Paulownia eine in Europa noch weitestgehend unerforschte Kurzumtriebsbaumart. Dennoch weisen erste Untersuchungen darauf hin, dass Paulownia in Deutschland beachtliche Erträge von 8 - 15 t (TM) ha^{-1} a^{-1} liefern kann. Aus diesem Grund wird zurzeit durch die BLE geprüft, ob Paulownia als KUP-Baumart zugelassen werden kann.

Trotz der noch vielen offenen Fragen, wurde Paulowniaholz aufgrund des geringen Aschegehaltes und des hohen Ertragspotentials als Mischungspartner festgelegt, wobei für eine theoretische Mischpelletproduktion auch Fichtenholz eingesetzt werden könnte. In einem weiteren Schritt wurden verschiedenen Biomassegemische pelletiert. Dabei zeigte sich, dass die Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia die beste physikalische Pelletquallität hatten.

Zusätzlich zu den beiden Hauptkomponenten wurde die Wirkung von Traubentrester als Presshilfsstoff untersucht. Hierbei zeigte sich, dass Traubentrester den spezifischen Energiebedarf des Pressvorganges bei gleichbleibend hoher physikalischer Pelletqualität verringert. Aus ökonomischer Sicht ist Traubentrester im Vergleich zu dem Handelsprodukt Stärke ein kostengünstigerer Presshilfsstoff, da für die Bereitstellung des Traubentresters lediglich Transport- und Aufarbeitungskosten entstehen.

In den Vorversuchen zeigte sich, dass ein Gemisch aus Miscanthus (50 M.-%), Paulownia (50 M.-%) und einem Tresterzuschlag von 1 M.-% - bezogen auf die Gesamtmasse des Miscanthus- bzw. Paulowniaanteils -, aufgrund des relativ geringen Aschegehaltes und der guten Pelletierfähigkeit sehr gut für die Mischpelletproduktion geeignet ist. Dieses erste Ergebnis wurde durch die Analyse der verbrennungsrelevanten Stoffeigenschaften und durch Pelletierungsversuche überprüft.

Verbrennungstechnische Eigenschaften

Um die Eignung der Rohstoffe Miscanthus und Paulownia für die Verbrennung in KFA´s zu überprüfen, wurden zusätzlich zu dem Aschegehalt, der N-, S-, Cl-Gehalt, der Brennwert und die Ascheerweichungstemperatur der Reinstoffe und der Mischpellets aus beiden Biomassen analysiert. Als jeweilige Bezugsgröße wurden die Grenzwerte der DIN_EN 14961-2(A2) gewählt. Für Miscanthus bestätigten sich die Erkenntnisse aus den Aschegehalts-untersuchungen, dass die Gehalte an verbrennungsproblematischen Elementen je nach Erntejahr, Standort, Genotyp und Bestandesalter schwanken. Es konnte auch festgestellt werden, dass die Summe der Gehalte dieser Elemente sehr eng mit dem Aschegehalt korrelieren. Somit ist auch aus verbrennungstechnischer Sicht zu empfehlen, dass Miscanthus möglichst spät, wenn der Blattanteil des Erntegutes am geringsten ist, geerntet werden sollte.

Die Untersuchungen der Biomasse von Paulownia ergaben, dass Paulownia im Vergleich zu Miscanthus deutlich geringere Gehalte an N, S und Cl aufweist als Miscanthus. Die fortführende Erörterung der Ergebnisse lässt den Schluss zu, dass Biomasse aus älteren Paulowniabeständen vermutlich noch geringere Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalte aufweist, als die untersuchte Biomasse, die aus einem dreijährigen Bestand stammte.

Ebenso wie Paulownia könnte auch Fichte als Mischungspartner eingesetzt werden, da Fichtenholz etwas bessere Brennstoffeigenschaften hat als Paulowniaholz (N-, S-, Cl-Gehalt). Im Vergleich zu Fichte, die einen jährlichen Biomassezuwachs von bis zu 7 t ha^{-1} haben kann (ANONYMUS 6, 2013), weist Paulownia mit 12 – 15 t ha^{-1} (WENGHOEFER et al., 2012) einen deutlich höheren jährliche Ertragszuwachs auf. Aus diesem Grund ist insbesondere Paulownia - neben Miscanthus – ein geeignetes Substitut für Fichte.

Weiter wurde festgestellt, dass die Mischpellets allerdings aufgrund minimal zu hoher Chlor- und Schwefelgehalte die DIN_EN 14961-2(A2) nicht erfüllen. Des Weiteren hatten die Mischpellets mit 915°C eine zu niedrige DT, obwohl die Reinstoffe höhere Ascheerweichungstemperaturen hatten. In weiteren Versuchen konnte jedoch aufgezeigt werden, dass bereits eine Beimischung von nur 0,25 M.-% Kaolin die DT der Mischpellets über die von EN_{plusA2}- Pellets geforderten DT von 1.100°C erhöht.

In der Summe bleibt festzuhalten, dass Miscanthus-Paulownia-Mischpellets eine relativ hohe Brennstoffqualität aufweisen können. Jedoch muss die Mischrezeptur der Pellets regelmäßig an die verbrennungsrelevanten Eigenschaften der Mischungspartner angepasst werden, da insbesondere die Brennstoffqualität von Miscanthus jährlich schwanken kann. Vermutlich können Mischpellets mit mindestens 50 M.-% *Miscanthus x giganteus* aufgrund minimal zu hoher S-, und Cl- Gehalte nicht die Anforderungen der DIN_EN 14961 erfüllen, es sei denn dass für Miscanthus durch pflanzenbauliche und züchterische Maßnahmen geringere Werte erzielt werden können.

Somit dürfen bisher diese Pellets aufgrund rechtlicher Hemmnisse durch die 1. BImschV nicht in KFA´s verbrannt werden. Damit auch hochwertige Miscanthus-Mischpellets in KFA´s verbrannt werden dürfen bedarf es einer Aufnahme von Mischpellets (bspw. nach DIN_EN 14961-6) in die 1. BImschV.

Pelletierungsversuche

In mehreren Laborversuchen an einer Pelletpresse der Firma Amandus Kahl vom Typ 14-175 wurden Gemische von Miscanthus und Paulownia bzw. Miscanthus und Fichte pelletiert, um die Einflussfaktoren zu untersuchen, die auf den Pressvorgang wirken. Diese Versuche veranschaulichten, dass eine Vielzahl von Faktoren (Wassergehalt, Presskanalllänge, Durchsatz und Biomasse) die Qualität der Pelletierung beeinflusst, sodass keine generellen Empfehlungen für Maschineneinstellungen getroffen werden können.
In dem Praxisversuch bei Amandus Kahl konnte zusätzlich aufgezeigt werden, dass Mischpellets aus Miscanthus und Paulownia bzw. Fichte mit einem Zuschlag von Traubentrester und Kaolin die physikalischen Qualitätsanforderungen der DIN_EN 14961-2(A2) erfüllen können. Weiterhin war aus dem Praxisversuch zu entnehmen, dass die Pelletierung von Miscanthus und Paulownia knapp 15% weniger Energie benötigt als die von Miscanthus und Fichte. Auch wenn diese Werte nicht direkt auf eine großtechnische Produktion übertragbar sind, so zeigt sich dennoch, dass durch den Einsatz von Paulownia während des Pelletierungsvorganges Energie eingespart werden kann.
Allgemein gilt für die Pelletierung von Biomassen, dass die Gemische einen Feuchtegehalt von 10 bis 14 M.-% aufweisen sollten. Des Weiteren müssen Maschineneinstellungen an das jeweilige Biomassegemisch angepasst werden, um die Qualität der Pelletierung zu gewährleisten.

Beurteilung des Projekterfolges

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die Pelletierung von Miscanthus-Mischpellets problemlos möglich. Dagegen erfüllen Mischpellets mit einem Miscanthusanteil von 50 M.-% Miscanthus nicht die verbrennungstechnisch relevanten Anforderungen der DIN_EN 14961-2(A2), die nach der 1. BImschV mindestens von Pellets erfüllt werden müssen, damit diese in KFA`s verbrannt werden dürfen. Auch Mischpellets mit einem reduzierten Miscanthusanteils von unter 50 M.-% würden vermutlich nicht diese Anforderungen erfüllen. Somit muss festgestellt werden, dass unter Berücksichtigung derzeitiger rechtlichen Rahmenbedingungen das primäre Projektziel der Entwicklung einer Mischrezeptur von Miscanthus-Mischpellets für Kleinfeuerungsanlagen nicht erfüllt werden konnte.
Letztendlich bleibt allerdings festzuhalten, dass Miscanthus-Mischpellets - bei Aufnahme der DIN_EN 14961-6 in die 1. BImschV - als Regelbrennstoff produziert werden könnten.

7.2. Optimierung der Prozesskette der Pelletherstellung

Zerkleinerungsverfahren

Im Rahmen des Projektes wurden neben der Hammermühle drei neuartige Biomasse-Zerkleinerungsverfahren auf deren Eignung für den Pelletierungsprozess untersucht. Diese neuartigen Zerkleinerungsverfahren waren die Zerfaserung (Prototyp), Kollermühle und der Prallreaktor.

In einem ersten Schritt wurde, am Beispiel der Zerkleinerung von Miscanthus, der spezifische Energiebedarf des Prozessschrittes der Zerkleinerung ermittelt. Es zeigte sich, dass die Kollermühle im Vergleich zu den anderen Verfahren mit 24 bis 36 kWh t^{-1} signifikant am wenigsten Energie für die Zerkleinerung einer Tonne Miscanthus benötigte. Eine Wiederholung des Versuches ergab, dass der Energiebedarf der Zerkleinerung mittels Kollermühle durch den Trockenmassegehalt der Biomasse beeinflusst wird.

Anhand der Messergebnisse des spezifischen Energiebedarfes kann festgehalten werden, dass durch Einsatz der Kollermühle in dem gesamten Pelletierungsprozess Energie eingespart werden kann. Eine nähere Quantifizierung des Energieeinsparungspotentials kann jedoch nicht aus dem Projekt erfolgen. Aus diesem Grund sollten weitere Forschungsvorhaben die Kollermühle näher gehend untersuchen.

Nachdem der Zerkleinerungsprozess analysiert wurde, erfolgte in einem zweiten Schritt eine Prüfung der Pelletierfähigkeit der Zerkleinerungsprodukte. Im Rahmen dieser Versuche wurde zum einen der Energiebedarf des Prozessschrittes der Pelletierung und zum anderen die physikalische Pelletqualität der verschiedenen Varianten erfasst.

In Bezug auf den Energiebedarf des Pressvorgangs zeigte sich, dass das Zerkleinerungsprodukt aus der Kollermühle weniger Energie während des Pressvorgangs benötigt. Dagegen ergab die Analyse der Abriebfestigkeit und der Schüttdichte, dass die Zerkleinerung mittels Zerfaserung das bessere Zerkleinerungsprodukt liefert.

Durch die Diskussion der Ergebnisse konnte dargestellt werden, dass insbesonders die Partikelgeometrie, Korngrößenverteilung und Partikeloberfläche durch das Zerkleinerungs-verfahren beeinflusst wird, wobei diese Parameter unterschiedliche Wirkungen auf den spezifischen Energiebedarf des Pressvorgangs und die physikalische Pelletqualität haben.

Aus Sicht des Pelletierungsvorganges ist auch die Kollermühle für den Pelletierungsprozess zu empfehlen, da die Pelletierung des Zerkleinerungsproduktes aus der Kollermühle um bis zu 15% energieeffizienter ist, als die der anderen Zerkleinerungsverfahren.

In der Summe betrachtet, kann durch den Einsatz der Kollermühle der Pelletierungsprozess wirtschaftlich optimiert werden, wobei das Energieeinsparungspotential im Rahmen des Projektes nicht näher quantifiziert werden konnte. Somit konnte das zweite Arbeitsziel der Optimierung des Pelletierungsprozesses erreicht werden.

Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Mischpelletproduktion

Um die Wirtschaftlichkeit der Miscanthus-Mischpelletproduktion zu überprüfen wurde ein Planszenario erstellt. Für dieses Planszenario erfolgte anhand aktueller Marktpreise eine Gewinnberechnung. Diese ergab, dass die geplante Pelletproduktion von Miscanthus-Mischpellets aufgrund eines Verlustes aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll ist.

Eine weiterführende Sensitivanalyse zeigte, dass die Rentabilität der Unternehmung sehr stark von dem Transportweg der Rohstoffe von dem Feld zu dem Pelletwerk und dem Marktpreis für EN_{plusA1}-Pellets abhängig ist.

Es konnte dargestellt werden, dass eine Verringerung der Transportstrecke (max. 15 km) und ein Anstieg des Marktpreises (262 € t^{-1}), der sowohl kurz- als auch langfristig möglich ist, die Wirtschaftlichkeit der Pelletproduktion gewährleisten kann.

Des Weiteren kommt der Entwicklung der GAP der EU eine besondere Bedeutung zu, da durch die mögliche Einführung eines „Greenings“ in die Landwirtschaft die Produktion von Miscanthus-Mischpellets für die Landwirte attraktiv werden könnte.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit kann nicht abschließend beurteilt werden, ob die Pelletproduktion durch den Einsatz von Miscanthus optimiert werden kann, da die Produktionskosten und die Erlöse von sehr vielen Variablen beeinflusst werden. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Miscanthus-Mischpelletproduktion unter bestimmten Voraussetzungen für die Landwirte ökonomisch rentabel werden könnte.

7.3 Fazit

Aufgrund rechtlicher (1. BImschV) und ökonomischer (Marktpreis EN_{plusA1}-Pellets bzw. Miscanthus) Hemmnisse ist die Produktion von Miscanthus-Mischpellets derzeit nicht zu empfehlen. Würden diese Hemmnisse durch eine Novellierung der 1. BImschV und durch die Einführung des „Greenings“ abgebaut, könnte aus dem Rohstoff Miscanthus zusammen mit anderen holzartigen Biomassen (bspw. Paulownia) ein Qualitätspellet produziert werden, welches in KFA´s verbrannt werden könnte.

Sowohl *Miscanthus x giganteus* als auch Paulownia sind schnell nachwachsende Rohstoffe, die bei relativ geringem energetischen Input durch Kulturmaßnahmen einen hohen Biomasseertrag (Output) erzielen. Aus diesem Grund wären diese Kulturen bei Einführung des „Greenings“ geeignet ökologisch und ökonomisch nachhaltig einen qualitativ hochwertigen Brennstoff auf Ackerflächen zu produzieren.

Unter diesen Vorraussetzungen würden die Mischpellets den Brennstoffmarkt von Pellets ergänzen und könnten bei einer weiter ansteigenden Nachfrage nach Qualitätspellets ein Substitut für Holzpellets sein.

8.a Veröffentlichungen

- Kompaktierung von Miscanthus als Designerbrennstoff .
  Pude, R. (Hrsg.), 2010: *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.

- Perspektiven von Mischpellets aus landwirtschaftlich erzeugten Rohstoffen für die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen (FNR-Projekt „C4-Kompakt"). Pude, R. (Hrsg.), 2012: „20 Jahre Miscanthus". 7. Internationale Miscanthus-Tagung des MEG e.V. vom 07.-09.11.2012 in Rheinbach. Kurzfassung der Vorträge. Universität Bonn ILB-Press. ISBN 978-3-941766-14.

- *Paulownia tomentosa* – Ein invasiver Neophyt? Erkenntnisse aus fünf Jahren Paulowniaforschung des Forschungsbereiches für Nachwachsende Rohstoffe der Universität Bonn. Invasivitätsstudie für die Zulassung von Paulownia als förderfähige Kurumtriebsbaumart. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Bonn.

8.b Vorträge/Präsentationen

- Präsentation des Projektes
  Fachforum :innovation der Regionale 2010. Tagung in der Industrie- und Handelskammer zu Köln am 22.3.2010 in Köln.

- Verbundprojekt „C4-Kompakt" - Entwicklung einer optimierten Produktionskette für die Bereitstellung von Miscanthus-Mischpellets zur Nutzung in Biomassefeuerungsanlagen (KFA). Bioenergietagung auf Haus Düsse am 22. Februar 2012.

- Verbundprojekt „C4-Kompakt" - Probleme und Chancen des Einsatzes von Miscanthus- Mischpellets in Kleinfeuerungsanlagen (KFA).Tagung Wärmeenergie aus Wald und Flur am 27. März 2012 auf dem Campus Klein- Altendorf der Universität Bonn.

- Perspektiven der Miscanthus-Mischpelletproduktion
  für Kleinfeuerungsanlagen. Narotec-Sitzung am 30.05.2012 auf der Leppe Deponie.

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.

AKYILDIZ, M.H. und KOL, H. S. (2010): Some technological properties and uses of *Paulownia (Paulownia tomentosa Steud.)* wood. Journal of Environmental Biology, Volume 31. Seite 351-355.

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 Zerfaserung von stängel-, halm- und/oder blattartigen, nachwachsenden Rohstoffen. Europäisches Patentblatt 2005/44.

ANONYMUS (2012): Handbuch für die Zertifizierung von Holzpellets für Heizungszwecke. European pellet council. Stand Januar 2012.

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. (1987): The bonding mechanism in hardboard manufacture. Holzforschung, Volume 41. Seite 247-258.

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.

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- Bi obased 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.

.

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.

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, RUDEL, H.; WERNER, A.; VETTER, A.; GRAF, T. (2011): Miscanthus - 15 Jahre Thüringer Ergebnisse -, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

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.

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.

BÖHMER, H.-J.; HEGER, T. und TREPL, L. (2000): Fallstudie zu gebietsfremden Arten in Deutschland, Umweltbundesamt, Fachgebiet II, 1.3: 1-13.

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.

CADOCHE, 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 Bioenery, Volume 38. Seite 14-22.

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* × *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.

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* × *giganteus* Greef et Deu. in a mediterranean environment. European Journal of Agronomy. Seite163- 177.

DI GIACOMO, G. und TAGLIERI, L. (2009): Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets. Energy, Volume 34. Seite 724 – 731.

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.

FNR (2000): Leitfaden Bioenergie, Planung Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow.

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.

GARCIA, J. C.; ZAMUDIO, M.; PEREZ, A.; FERIA, M. J.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; LOPEZ, F. (2011): Soda-aq pulping of paulownia wood after hydrolysis treatment. BioResourses, Volume 6. Seite 971 – 986.

HALL, C.W. und DAVIS, D.C. (1979): Processing Equipment for Agricultural Products. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.

HASLER, P. und NUSSBAUMER, T. (2001): Herstellung von Holzpellets - Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets, ENET, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon.

HASLINGER, W.; FRIEDEL, G.; WOPIENKA, E.; EMHOFER, W. (2009): Neue Rohstoffsortimente für die Holzpelletsproduktion – Einfluss eines erhöhten Rindenanteils auf die Verbrennungseigenschaften. 9. Industrieforum Pellets. 6. – 7. Oktober 2009. Seite 64 – 69.

HIENDLMEIER, S. (2010): Der Brennstoff Strohpellets. Bericht 09/10 Carmen e.V.

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 pelleter 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 Bioengennering. 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.

IRVINE, G.M. (1985): The significance of the glass transition of lignin in thermomechanical pulping. Wood Science and Technology, Volume 19. Seite 139-149.

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.

JONES, M. B. und WALSH, M. (2001): Miscanthus for energy and fibre. James and James (Hrsg.). The Cromwell press. London. ISBN 1-902916-07-7.

JORGENSEN, 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.

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.

KALIYAN, N. und MOREY, R. V. (2009): Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy, Volume 33. Seite 337-359.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin.

KALTSCHMITT, M. und NEUBARTH, J. (2000): Erneuerbare Energien in Österreich. Springer Verlag. Wien. ISBN 3-211-83579-2

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 ans 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 & Research , Volume 30. Seite 672-680.

KILBANE, J. (1989): Desulfurization of coal: themicrobial solution. Trends in Biotechnology, Volume 7. Seite 97-101.

KRACEK, F.C. (1962): Melting and transformation of mineral and allied sustances. Geological Survey Bulletin, Volume 1144. Seite D1-D81.

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.

KRISTÖFEL, C. und WOPIENKA, E. (2012): Biomass report, IEE/09/758/SI2.558286 – EU- Projekt – MixBioPells.

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 KIRCHNER, 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.

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.

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.

MANI, S., TABIL, L.G.; SOKHANSANJ. S. (2002): Grinding performance and physical properties of selected biomass. Jahrestagungtagung der ASAE, St. Joseph MI. Paper No. 026175.

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.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ , S. (2006a): 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.

MANI, S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; TURHOLLOW, A. (2006b): Economics of producing fuel pellets from biomass. Applied Engineering in Agriculture, Volume 22. Seite 421-426.

MANLU,Y.; ALVIN, R.; LESTER, O. (2003): Review of biomass size reduction technology, 2003 ASAE Annual International Meeting.

MEIER, J. und VETTER, R. (2004): Erträge und Zusammensetzung von Kurzumtriebs-Gehölzen (Weide, Pappel, Blauglockenbaum). Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung Müllheim. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 35. Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2004. ISSN 0947-7314. Seite 87 - 92

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.

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.

MUMM, M. (2008): Kosten- und Leistungsrechnung: Internes Rechnungswesen für Industrie- und Handelsbetriebe. Springer Verlag. ISBN 978-3-7908-1959-5.

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.

NIELSEN, N. P.; GARDNER, D. J.; POULSEN, T.; FELBY, C. (2009): Importance of temperature, moisture content and species for the conversation 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 behaviour, 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.

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.

ÖHMAN, M.; NYSTRÖM, I.; GILBE, C. (2009): Slag Formation during combustion of biomass fuels. International conference on solid biofuels, 12-14th August 2009, Beijing.

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.

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.

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

PILZ, B. (2008): Praxiserfahrungen bei der Kompaktierung von halmgutartiger Biomasse. 1. Internationale Fachtagung – Stohenergie 2008. Jena.

PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D. (2010): Techno-economical analysis of wood pellet production for U.S. manufacturers. Bioresources, Volume 5. Seite 2374-2390.

POLLET, C; VERHEYEN, C.; HEBERT, J.; JOUREZ, B. (2000): Physical and mechanical properties of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood grown in Belgium. Canadian journal of forest research, Volume 42. Seite 831 – 840.

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.

PUDE, R.; FRANKEN, H.; DIEPENBROCK, W.; GREEF, J. M. (1997): Ursachen der Auswinterung von einjährigen *Miscanthus*-Beständen. Pflanzenbauwissenschaften. Seite 171- 176.

PUDE, R; TRESELER, C.-H.; TRETTIN, R.; NOGA, G. (2005): Suitability of *Miscanthus* Genotypes for Lightweight Concrete. Die Bodenkultur, Volume 56. Seite 61-69.

PUSHINSKIS, V.; PRIEDKALNS, G.; DOLACIS, J.; HROLS, J. (2002): Selected mechanical properties of Norway spruce wood in Latvia. Wood struccture and properties 2002. Kudela und Kurjatko (Hrsg.). Zvolen, Slovakia. ISBN 80967088-9-9. Seite 157-159.

RAMPEREZ, 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.

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.

RÖHRICHT, C. (2002): Acker- und pflanzenbauliche Untersuchungen zum Anbau von ein- und mehrjährigen EnergiepflanzenThüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 4-7. Jahrgang 2002.

ROHNE, G. W. (1984): Öl aus Weintraubenkernen mit hohem Vitamin-E-Gehalt. European journal of lipid science and technology. Volume 86. Seite 172–173.

ROLLWAGE, N. (1999): Kosten- und Leistungsrechnung: mit Übungsaufgaben und Lösungen. 5. Auflage- Köln: WRW-Verlag ISBN 3-927250-24-4.

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.

SALMEN, L. (1984): Viscoelastic properties of insitu lignin under water-saturated conditions. Journal of Material Science, Volume 19. Seite 3090 – 3096.

SCHMOLKE, S. und DEITERMANN, M. (2004): Industrielles Rechnungswesen. Winklers Verlag, Braunschweig.

SCHNEEBERGER, W. und PEYERL, H. (2011): Betriebswirtschaftslehre für Agrarökonomen. Facultas Verlags- und Buchhandels AG. ISBN 978-3-7089-0730-7

SCHOLTEN R.L. und MCELLHINEY R.R. (1985): The effects of prebreaking in hammer mill particle size reduction. ASAE Paper No. 85-3542.

SI, C.-L.; LU, Y.-Y.; QIN, P.-P.; SUN, R.-C.; NI, Y.-H. (2011): Phenolic extractives with chemotaxonomic significane 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.

SITZMANN, W. BUSCHHART, A.(2009): Neue Wege der Zerkleinerung zur optimierten Herstellung von Holzpellets. 9. Industrieforum Pellets.

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.

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 Roh stoff 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.

STRIETZEL, R. (2005): Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme. 1. Auflage. Verlag Neuer Merkur, München. ISBN 3-937346-14-7.

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.; IISA, 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.

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.

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.

WENGHOEFER, V.; PUDE, R.; GAESE, D.; RIEKER, C. (2012): Perspektiven von Mischpellets aus landwirtschaftlich erzeugten Rohstoffen für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen. 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.*

Sonstige Quellen:

ANKEN, T.; HATT, M.; SCHENK, C.; HERSENER, J.-L.; BÜHLER, R.; ISELI, V.; BÖSCH, R. (2012): Miscanthus-Kleinfeuerung. Nutzung des kostengünstigen Potentials bedingt angepasst Feuerungen. Schlussbericht. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. Bundesamt für Energie BFE. BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153700 / 102882.

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): Siebtechnikck 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): EnBw (Stromversorger). www.enbw.com Zugriff 02.01.2013.

ANONYMUS 2 (2012): Bundesverband Energie und Wasser. www.bdew.de Zugriff 19.12.2012.

ANONYMUS 3 (2012): Personalkostenrechner Handwerk-Magazin.http://www.handwerk-magazin.de/personalkostenrechner/150/2/32766/. Zugriff 15.12.2012.

ANONYMUS 4 (2012): Webseite Deutsches Pellet Institut (DEPI). www.depi.de Zugriff 02.03.2012.

ANONYMUS 5 (2012): Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_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 6 (2012): Daten und Fakten 2012. Jahrestagung des Bundesverbandes der Stärkeerzeuger.

ANONYMUS 7 (2012): Telefonische Auskunft Denis Prive GmbH.

ANONYMUS 8 (2012): http://german.alibaba.com/products/kaolin-clay-price.html Zugriff 10.12.2012.

ANONYMUS 1 (2013): Webseite Deutsches Pellet Institut (DEPI). www.depi.de/grafiken Zugriff 09.02.2013.

ANONYMUS 2 (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.

ANONYMUS 3 (2013): http://www.controllingportal.de/Fachinfo/Investitionsrechnung/Interne-Zinsfuss-Methode.html. Zugriff 09.02.2013.

ANONYMUS 4 (2013): Greening in der EU Agrarpolitik. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. http://www.bmelv.de/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Agrarpolitik/Greening.html. Zugriff am 19.02.2013.

ANONYMUS 5 (2013): Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff 11.02.2013.

ANONYMUS 6 (2013): 2. Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. http://www.bundeswaldinventur.de/enid/0,dedd0a305f7472636964092d09323130/4t.html. Zugriff 21.02.2013.

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.

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 (2012): mündliche Auskunft. Mitarbeiter der Firma Amandus Kahl Reinbek, Forschung und Entwicklung.

DEUTER, M. (2011): telefonische Auskunft. Miscanthus- Züchter aus Klein-Wanzleben.

FRANKE, C. (2008): Vorlesungsunterlagen „Energietechnik für Wirtschaftsingenieure“ des Sommersemesters 2008. http://www.gm.fh-koeln.de/~ chfranke/Investitionsrechnung%2006.08.pdf Zugriff 28.12.2012.

GAESE, D. (2011): mündliche Auskunft. Direktorin des Instituts für Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.

GATTERNIG, B.; HOHENWARTER, U.; KARL, J. (2010): Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen. 11. Symposium Energieinnovation. 10.-12.2.2010, Graz/Austria.

HAYER, R. (2010): Nachwachsender Rohstoff „Miscanthus“. Vortrag im Rahmen einer BLE Veranstaltung am 02.02.2010 in Föhren.

LANG, S. (2012): Verbrennung von Traubentresterpellets im Geltungsbereich der 1.BImschV – Stand, Chancen und Handlungsbedarf nach einem Jahr Demonstrationsbetrieb. Workshop, Umsetzung von Demonstrationsprojekten zur Nutzung alternativer Biomasse(misch)pellets, Neustadt/ Weinstraße 22. Februar 2012.

LENZ, V. (2012): mündliche Auskunft. Mitarbeiter des DBFZ in Leipzig.

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.

PUDE, R. (2007): Vorlesungsunterlagen Sommersemester 2007. Leiter des Forschungsbereiches für Nachwachsende Rohstoffe der Universität Bonn.

PUDE, R. (2012): mündliche Auskunft.

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 Diplomarbeit. Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn.

SCHÄFER, R. (2011): mündliche Auskunft. Inhaber der Firma Schäfer.

SCHNEIDER, A. (2011): Biobrennstoffdesign – Erweiterung der Pelletrohstoffbasis. World Sustainabel Days Wels 2010.

SCHOLTE-REH, F. (2012): mündliche Auskunft. Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Landmaschinentechnik der Fachhochschule Köln.

SCHWARZ, K.-U. und RAUTENBERG, M.: Gegenüberstellung von Holz und Miscanthus aus Kurzumtriebsolantagen, II. Sächsiches Miscanthus- Fachgespräch, Leipzig den, 29.09. 2011.

SITZMANN, W. (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.

SUSSYK, S. (2012): Einfluss der Blatt-Spross-Verhältnisse unterschiedlicher Miscanthus-Herkünfte auf die energetische Nutzung. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn.

TOEWS, T. (2010): Bestimmung der Erntekosten von Silomaisund deren Relevanz für dieWirtschaftlichkeit 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.

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.

WENGHOEFER, V. (2010): Wuchsleistung von *Paulownia tomentosa* im Vergleich zu Pappel- und Weidenklonen im ersten Kurzumtrieb. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Landwirtschaftliche Fakultät. Universität Bonn

WETTER, C. et al. (2010): „Optimierung der regionalen Bioalkoholherstellung aus biogenen Reststoffen – RE_2Alko“. Fachtagung Nachhaltige Biokraftstoffe 28.10 2010. http://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2012/2012-11-22-biokraftstoff-05.pdf Zugriff 16.03.2012.

WIRKNER, R. (2010): Standardisierungsaktivitäten im Bereich Miscanthus.1. Sächsisches Miscanthus-Fachgespräch, Leipzig, 04.Oktober 2010.

ZENG, T. (2010): Additivierung von Miscanthuspellets zur Verbesserung des Verbrennungsverhaltens. 1. Sächsisches Miscanthus-Fachgespräch. Leipzig, 04.Oktober 2010.

ZENG, T. (2012): Newsletter 02 – Januar 2012 MixBioPells Projekt http://www.mixbiopells.eu/fileadmin/user_upload/WP6/Newsletter/Newsletter_2/Newsletter_02_DE.pdf Zugriff 03.03.2012.

Normen und Richtlinien:

DIN 51724-1: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Schwefelgehaltes - Teil 1: Gesamtschwefelgehalt

DIN 51727: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Chlorgehaltes

DIN 52 185: Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser

DIN 52 186: Prüfung von Holz; Bestimmung der Biegefestigkeit

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 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

Tabelle A1: DIN 14961-6: Spezifikation von Pellets aus halmgutartiger Biomasse, Biomasse von Früchten sowie definierten und undefinierten Mischungen

	Eigenschaftsklasse, Bestimmungsverfahren	Einheit	A	B
Normativ	Herkunft und Quelle[a], EN 14961-1:2010, Tabelle 1		2 Halmgutartige Biomasse 3 Biomasse von Früchten 4 Definierte und undefinierte Mischungen	2 Halmgutartige Biomasse 3 Biomasse von Früchten 4 Definierte und undefinierte Mischungen
	Durchmesser, D[b] und Länge L[c] EN 16127 siehe Bild 1	mm	D06 bis D25, $D \pm 1$; $3{,}15 \leq L \leq 40$ (von D06 bis D10) $3{,}15 \leq L \leq 50$ (von D12 bis D25)	D06 bis D25, $D \pm 1$; $3{,}15 \leq L \leq 40$ (von D06 bis D10) $3{,}15 \leq L \leq 50$ (von D12 bis D25)
	Wassergehalt, M, EN 14774-1, EN 14774-2	Im Anlieferungszustand, m-%	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15
	Aschegehalt, A, EN 14775	m-% wasserfrei	A5.0 ≤ 5	A10 ≤ 10
	Mechanische Festigkeit, DU, EN 15210-1	Im Anlieferungszustand, m-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.0 ≥ 96,0
	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-%	F2.0 ≤ 2,0	F3.0 ≤ 3,0
	Additive[d]	m-% wasserfrei	Art und Menge sind anzugeben	Art und Menge sind anzugeben
	Heizwert im Anlieferungszustand, Q, EN 14918	MJ/kg or kWh/kg	Q14.1 ≥ 14,1 oder Q3.9 ≥ 3,9	Q13.2 ≥ 13,2 oder Q3.7 ≥ 3,7
	Schüttdichte, BD, EN 15103	Im Anlieferungszustand, kg/m³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Stickstoff, N, EN 15104	m-% wasserfrei	N1.5 ≤ 1,5	N2.0 ≤ 2,0
	Schwefel , S, EN 15289	m-% wasserfrei	S0.20 ≤ 0,20	S0.20 ≤ 0,20
	Chlor, Cl, EN 15289	m-% wasserfrei	Cl0.20 ≤ 0,20	Cl0.30 ≤ 0,30
Informativ	Arsen, As, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chrom, Cr, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 50	≤ 50
	Kupfer, Cu, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 20	≤ 20
	Blei, Pb, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10
	Quecksilber, Hg, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, Ni, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 10	≤ 10
	Zink, Zn, EN 15297	mg/kg wasserfrei	≤ 100	≤ 100
	Asche-Schmelzverhalten[e], prEN 15370	°C	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden

Tabelle A 2: Detailierte Maschineneinstellungen währen der ersten Zerkleinerungsversuchsreihe mit der Kollermühle, vorgenommen durch die Firma Amandus Kahl

Versuchsnr.	Koller-anzahl	Drehzahl [U min^{-1}]	D_{Loch} [mm]	Presskanal-verhältnis
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 A 3: Versuchsvarianten der Teilversuche des zweiten Zerkleinerungsversuches mittels Kollermühle aus dem Jahr 2012

Versuchsnr	Biomasse	Feuchte [M.-%]	Zugabe H_2O [M.-%]	Durchsatz [kg h^{-1}]	Versuchsmasse [kg]	Anzahl Wiederholungen
1	*M. x g.*	12,6	0	490	8,2	3
2	*M. x g.*	12,6	0	530	8,9	1
3	*M. x g.*	12,6	0	620	10,3	1
4	*M. x g.*	12,6	0	710	11,8	4
5	*M. x g.*	12,6	2	290	4,8	1
6	*M. x g.*	12,6	2	450	7,5	1
7	*M. x g.*	12,6	2	590	9,8	1
8	*M. x g.*	12,6	2	620	10,3	1
9	*P. t.*	9,2	0	420	10,6	1
10	*P. t.*	9,2	0	450	10,3	3
11	*P. t.*	9,2	2	510	12,4	1
12	*P. t.*	9,2	2	550	15,7	1
13	*P. t.*	9,2	3	550	14,1	2
14	*P. t.*	9,2	3	600	10,4	1
15	*P. t.*	9,2	3	650	33,4	1

Tabelle A 4: Maschineneinstellungen des Prallreaktors währende der 1. Versuchsreihe

Versuchsnr.	Materialart	Material-masse [kg]	Sieb		Prallfläche [cm²]	Drehzahl [Hz]	Versuchsdauer [min]
			D_{Loch} [mm]	Fläche [cm²]			
1	Robinie	1,5	5	400	192	20	0,17
2	Robinie	1,3	5	400	192	10	
3	Robinie	1,6	5	400	192	15	0,08
4	Robinie	18	5	400	192	15	
5	Holz Robi-nie	13,6	5	400	192	50	3

Tabelle A 5: Einstellungen der Pelletpresse unter welchen die Pellets während des Praxisversuches bei Amandus Kahl pelletiert wurden

Variante	Koller-anzahl	Drehzahl [U min^{-1}]	D_{Loch} [mm]	Presskanal-verhältnis	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 A 6: Anforderungen an EN_{plus}-Pellets nach EN_{plus}-Zertifizierung (Quelle: ANONYMUS 1, 2011)

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.-%

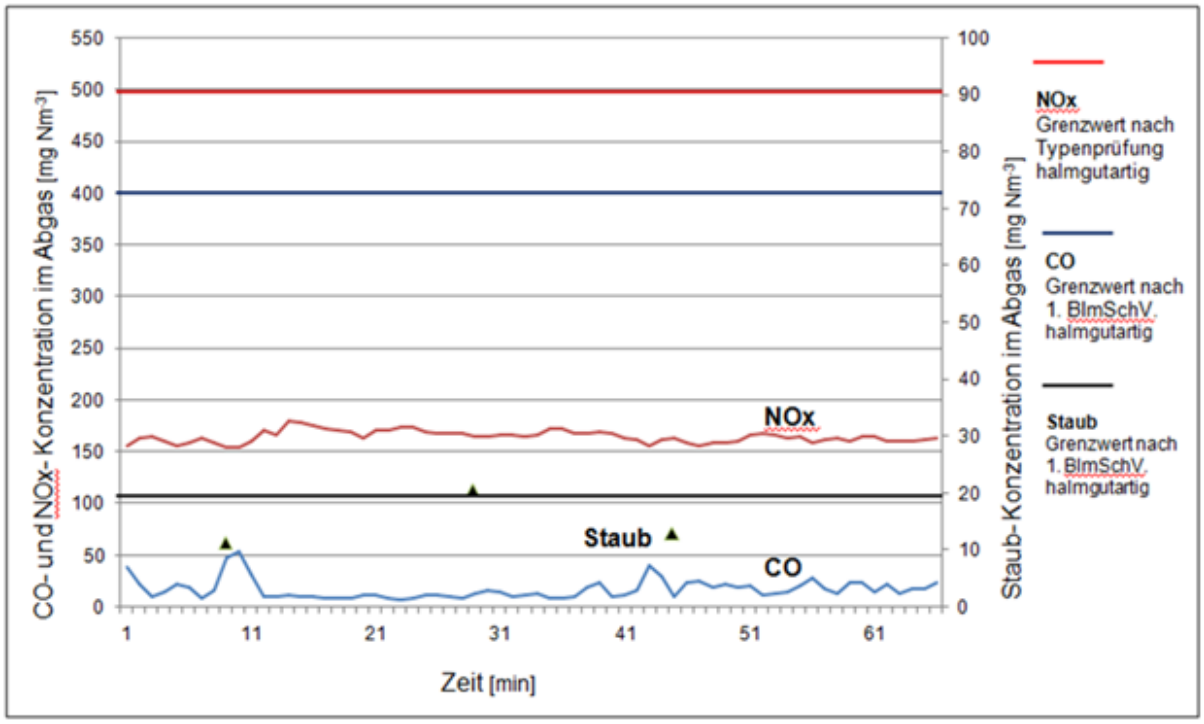

Abbildung A 1: Während der Verbrennung von Miscanthus-Mischpellets gemessenen CO-, NOx-, und Staubemmissionen in Relation zu den Grenwerten der 1.BImschV (2. Stufe) (Abschnitt 2 §5) und der Typenprüfung von Feuerungsanlagen für halmgutartige Brennstoffe