



verenum

*Verenum Dr. Thomas Nussbaumer
Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik*

Verenum
Langmauerstrasse 109
CH – 8006 Zürich
Telefon 044 377 70 70
Internet: www.verenum.ch

P+D-Projekt TP 8100146-2

Staubförmiger Biomassebrennstoff für den Thermoölprozess

Arbeitspaket 2

Potenzial staubförmiger Biomassebrennstoffe

Teil 1: Mengen und Brennstoffeigenschaften

Autoren

Léonore Hälg, Verenum, Zürich
Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

Teilprojektleitung

Beat Nussbaumer, Dr. Eicher+Pauli AG

Gesamtleitung

Coop Genossenschaft, Basel

Auftraggeber

Bundesamt für Energie, Bern

Zürich, 31. März 2015

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Zielsetzung	3
1.1. Wärmeversorgung im Coop-Projekt Schafisheim.....	3
1.2. Zielsetzung	3
2. Energie- und Stoffströme der Nahrungsmittelproduktion	4
2.1. Globale Produktion von Biomasse für Nahrungsmittel	4
2.2. Biomasseproduktion in der Schweiz.....	5
3. Staubförmige in der Schweiz anfallende Biomasse-Rückstände	7
3.1. Müllereinebenprodukte (MNP) aus Getreidemöhlen	7
3.1.1. Definition.....	7
3.1.2. Eigenschaften brennbarer Müllereinebenprodukte.....	7
3.1.3. Potenzial an Müllereinebenprodukten	8
3.2. Getreideabgang.....	9
3.2.1. Definition.....	9
3.2.2. Eigenschaften.....	9
3.2.3. Potenzial.....	9
3.3. Zucker.....	10
3.3.1. Zuckerproduktion.....	10
3.3.2. Nebenprodukte und Potenzial	10
3.4. Kakaoschalen.....	11
3.4.1. Schokoladeproduktion	11
3.4.2. Nebenprodukte und Potenzial	11
3.5. Kaffeeschalen.....	12
3.5.1. Kaffeeproduktion.....	12
3.5.2. Nebenprodukte und Potenzial	12
3.6. Reismöhlennebenprodukte.....	13
3.6.1. Reisproduktion.....	13
3.6.2. Nebenprodukte und Potenzial	13
3.7. Ölnebenprodukte	14
3.7.1. Ölproduktion	14
3.7.2. Nebenprodukte und Potenzial	14
3.8. Nussnebenprodukte	15
3.8.1. Nussverarbeitung.....	15
3.8.2. Nebenprodukte und Potenzial	15
3.9. Weitere potenzielle Brennstoffe.....	15
4. Brennstoffeigenschaften der Biomassesortimente	16
4.1. Datenquellen	16
4.2. Brennwert und Heizwert	16
4.3. Wassergehalt	16
4.4. Stickstoffgehalt	16
4.5. Schwefel-, Chlor- und Kaliumgehalt	17
4.6. Aschegehalt.....	17
4.7. Wärmeverhalten der Asche.....	18
5. Potenzial staubförmiger Biomasse als Brennstoff	20
6. Quellen	23
7. Beilagenliste	26

1. Ausgangslage und Zielsetzung

1.1. Wärmeversorgung im Coop-Projekt Schafisheim

Die Coop Genossenschaft ist das grösste Detailhandels- und Grosshandelsunternehmen der Schweiz. Um den Verbrauch fossiler Energieträger bei gleichzeitig steigendem Umsatz in den kommenden Jahrzehnten zu reduzieren, wird unter anderem in Schafisheim eine Grossbäckerei realisiert, deren Wärmeversorgung zu über 70% auf erneuerbaren Energien basiert. Dazu erfolgt die Wärmeversorgung der Backlinien mit Thermoöl, das durch eine zentrale Heizanlage auf 300°C erhitzt wird. Für die Wärmeerzeugung kommt eine bivalente Heizanlage mit einer Biomassefeuerung zum Einsatz, die zur Spitzenlastdeckung durch fossile Feuerungen ergänzt wird. Um intern anfallende Reststoffe zu nutzen und den damit gleichzeitig den Kreislauf der für die Backwaren benötigten Ressourcen zu schliessen, kommen als Biomassebrennstoff Getreiderückstände in Form von Müllereinebenenprodukten (MNP) zum Einsatz. Aus technischen Gründen und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit werden diese mit Waldhackschnitzeln gemischt, wobei der Energieanteil der Getreiderückstände maximal 50% der Biomasse und somit 35% der total zugeführten Energie betragen soll. Für den Betrieb des Biomassekessels wird im Auslegungsfall mit folgendem Brennstoffbedarf gerechnet: Bei einer Kesselleistung von 2,9 MW und einem Wirkungsgrad zur Thermoölerzeugung von 77,1% beträgt die als Heizwert zugeführte Leistung 3,76 MW. Bei Auslastung der Bäckerei wird für den Biomassekessel ein Betrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden angestrebt, wodurch eine zugeführte Leistung von 22,56 GWh pro Jahr resultiert. Für die Müllereinebenenprodukte resultiert bei einem Anteil von maximal 50% somit ein Bedarf von 11,28 GWh pro Jahr.

Während die Verbrennung von staubförmigen Brennstoffen zur Dampferzeugung erprobt ist, wird in Schafisheim erstmals staubförmiger Biomassebrennstoff in einem Thermoölprozess eingesetzt. Dies ist mit Herausforderungen bei der Brennstoffzuführung und dem Verbrennungsprozess verbunden. Eine wichtige Anforderung ist dabei das Erzielen einer kontinuierlichen Mischung zwischen feuchten Waldhackschnitzeln und trockenen Müllereinebenenprodukten zur Sicherung konstanter Bedingungen in Bezug auf den Heizwert sowie den Asche- und Stickstoffgehalt. Damit sollen ausgeprägte Schlackebildung, das Mitreissen von Staub sowie starke Schwankungen der Stickoxidemissionen vermieden werden. Bei der Planung der Anlage in Schafisheim wurden dazu die Brennstoffzuführung und die Feuerung entsprechend ausgelegt. Mit dem Betrieb der Anlage soll die Machbarkeit der Nutzung staubförmiger Biomassebrennstoffe zur Thermoölerhitzung damit gezeigt werden.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Studie ist eine Beurteilung der Potenziale staubförmiger Biomassebrennstoffe, die als Nebenprodukte der Nahrungsmittelkette in der Schweiz anfallen. Damit soll abgeschätzt werden, ob nebst der Anlage in Schafisheim weitere Anlagen zur Substitution fossiler Energien infrage kommen. Die Erhebung beschränkt sich dabei auf nicht-holzige Biomasse, da das Potenzial an Energieholz durch die Holzenergie-Statistik bereits erfasst und der Ausbau der Energieholznutzung durch bestehende Förderanstrengungen abgedeckt wird. Ebenfalls ausgeschlossen wird nass anfallende Biomasse wie Erntereste aus der Erzeugung von Feldgemüse und Hackfrüchten, die wegen des hohen Wassergehalts als Festbrennstoff kaum infrage kommt und zur Verwertung in Vergärungsanlagen geeignet ist. Die zu untersuchenden Brennstoffe beinhalten somit in erster Linie Nebenprodukte der Verarbeitung von landwirtschaftlichen Stoffen wie Müllereinebenenprodukte, Reismüllenebenenprodukte, Zuckerrübenschnitzel, Kaffee- und Kakaoschalen sowie Nebenprodukte der Ölproduktion und Nussverarbeitung.

2. Energie- und Stoffströme der Nahrungsmittelproduktion

2.1. Globale Produktion von Biomasse für Nahrungsmittel

Der weltweite Primärenergieverbrauch betrug im Jahr 2012 rund 559,4 EJ (155,4 PWh), wovon der Biomasseanteil etwa 10% ausmacht [1]. Mit einem weltweiten technischen Biomassepotenzial von 103,8 EJ pro Jahr wird sich dieser Wert in Zukunft voraussichtlich rund verdoppeln [2]. Diese Angaben umfassen vor allem die Nutzung von Holz, Halmgütern und Biotreibstoffen, während weitere landwirtschaftliche Nebenprodukte und Abfälle wie Getreidereste mit Ausnahme von Reisspelzen und Stroh vernachlässigt werden. Die energetische Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen stellt jedoch ein erhebliches Potenzial dar. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) gibt das globale Volumen der Lebensmittelabfälle in allen Stadien der Produktion und die Verbrauchs mit 27% der gesamten landwirtschaftlichen Produktion an [3]. Diese umfassen sowohl die essbaren (22%) als auch die ungenießbaren (5%) Abfälle.

Von den gesamten Abfällen fällt rund ein Viertel beim Getreide an, das für die vorliegende Studie besonders relevant ist. Bei einer weltweiten Getreideproduktion von rund 2,5 Gt im Jahr 2010 [4] entspricht dies einem Überschuss von 0,62 Gt pro Jahr, der teilweise das Potenzial zur energetischen Nutzung aufweist. Gustavsson et al. [5] weisen den Anteil an Überschüssen in den verschiedenen Prozessschritten von Getreide für verschiedene Weltregionen aus (Bild 1). Die für diese Studie relevanten Prozessschritte „Post-harvest“ und „Processing“, welche die Überschüsse der Lagerung, des Vertriebs und Verarbeitung von Getreide und anderen landwirtschaftlichen Produkte beschreiben, weisen dabei mit zusammengerechnet zwischen 7% und 15% vergleichbar kleine Anteile am Gesamtvolumen auf [5]. Dies entspricht einem Potenzial von 0,18 bis 0,38 Gt/a oder 2,6 bis 5,5 PJ/a (0,72 bis 1,5 TWh/a)¹.

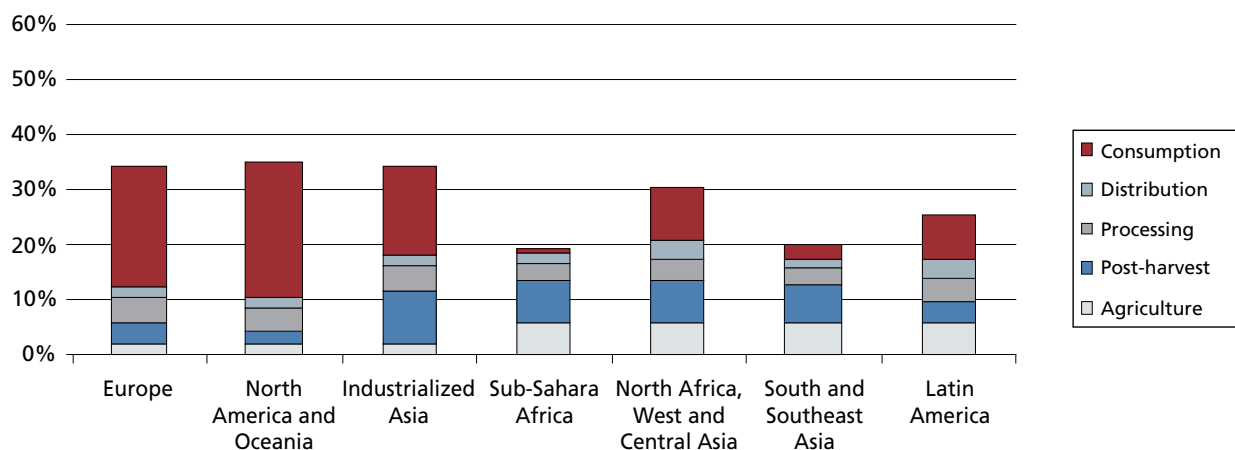


Bild 1 Anteil der Verluste am geernteten Getreide bei den verschiedenen Prozessschritten und in verschiedenen Weltregionen [5].

¹ Die Umrechnung erfolgt unter der Annahme, dass Getreiderückstände zu 87% aus Trockensubstanz mit einem Energieinhalt der Trockensubstanz von 4,72 GWh/t bestehen. Diese Zahlen werden von Baier & Baum 2008 für Getreide ausgewiesen [6].

Aus Bild 1 geht auch hervor, dass in Afrika und Südostasien grössere Verluste in der Verarbeitungskette auftreten als in Europa und USA, jedoch nur sehr wenig Nahrungsmittel auf Stufe der Konsumenten ungenutzt bleiben, während in Europa und USA der Hauptteil der Verluste bei den Konsumenten auftreten und die Verluste deshalb insgesamt rund ein Drittel der Produktion ausmachen.

Während beim Getreide die primären Abfälle beim Konsumenten anfallen, entstehen bei Ölsaaten die grössten Anteile an Reststoffen in der landwirtschaftlichen Produktion und je nach Weltregion entfallen 5% bis 20% auf die Produktionsschritte „Post-harvest“ und „Processing“ [5]. Bei einer Ölsaatenproduktion von rund 0,17 Gt im Jahr 2010 entspricht dies einem Potenzial von 0,009 bis 0,034 Gt/a oder ungefähr 0,13 bis 0,52 PJ/a (0,04 bis 0,14 TWh/a)².

2.2. Biomasseproduktion in der Schweiz

Der schweizerische Endenergieverbrauch betrug im Jahr 2013 896,0 PJ (248,9 TWh) [7]. Davon entfallen 34,9% auf Raumwärme, 11,7% auf Prozesswärme und 5,7% auf Warmwasser [8]. Die schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2013 weist für das Jahr 2013 eine steigende energetische Nutzung von Biomasse und erneuerbaren Abfällen aus [9]. Während Biomasse Holz und landwirtschaftliche Abfälle wie Gülle und Mist umfasst, umfassen die erneuerbaren Abfälle Altpapier und Karton, Papier- und Klärschlamm, Tiermehl und Tierfett sowie Zellstofflaugen und Tabakstaub. Weitere landwirtschaftliche Reststoffe wie Ernterückstände und Hofdünger werden in dieser Statistik nicht berücksichtigt, da sie nur marginal energetisch genutzt werden. Sie stellen jedoch die Hälfte des gesamten energetisch nutzbaren Potenzials von Biomasse dar [10].

Die in der vorliegenden Potenzialstudie behandelten erneuerbaren Abfälle und Reststoffe beinhalten neben Müllerei- und Reismühlennebenprodukten auch Zuckerrübenschnitzel, Kakao- und Kaffeeschalen und Nebenprodukte der Ölproduktion und Nussverarbeitung, welche in der obengenannten schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien nicht enthalten sind. Aufgrund der vorliegenden Zahlen wird davon ausgegangen, dass sie noch nicht oder kaum genutzt werden.

In Bild 2 sind die biogenen Güterflüsse in die und aus der Lebensmittelindustrie dargestellt. Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich einerseits auf den Güterfluss vom Pflanzenbau zur Lebensmittelindustrie und die dabei anfallenden Reststoffe, sowie andererseits auf die Güterflüsse, die aus der Lebensmittelindustrie nicht in den Warenkonsum gehen. Dabei wird abgeklärt, zu welchem Preis und in welchem Ausmass die vorliegenden Güterflüsse energetisch als Brennstoffe zur industriellen Verbrennung genutzt werden könnten.

² Die Umrechnung erfolgt unter der Annahme, dass Ölsaatabfälle zu 90% aus Trockensubstanz mit einem Energieinhalt der Trockensubstanz von 4,72 GWh/t bestehen. Diese Zahlen werden von Baier & Baum 2008 für Rapskuchen ausgewiesen [6].

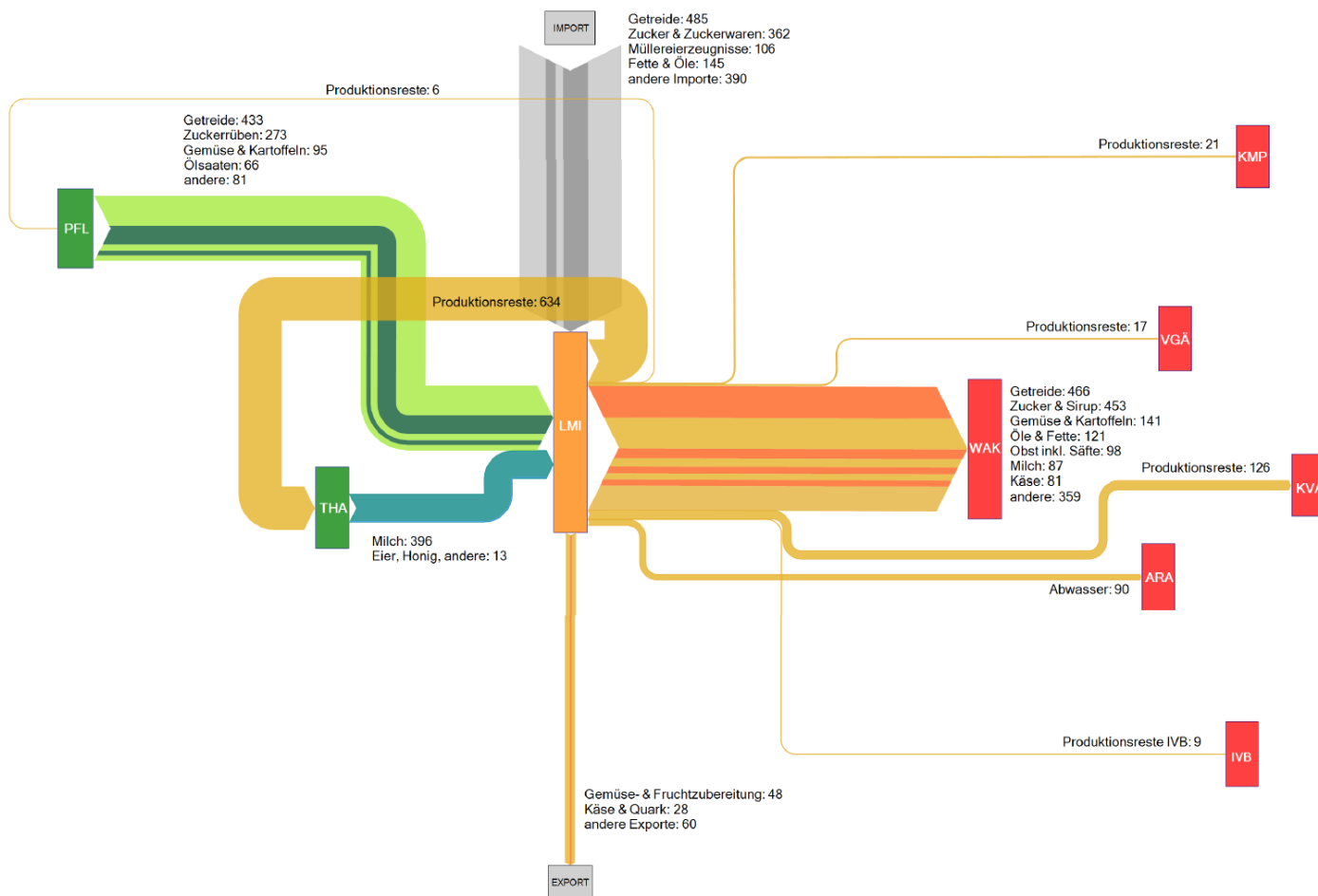


Bild 2 Biogene Input- und Outputströme für den Prozess Lebensmittelindustrie in 1000 Tonnen Trockensubstanz pro Jahr [6].

- PFL = Pflanzenbau
- THA = Tierhaltung
- LMI = Lebensmittelindustrie
- WAK = Warenkonsum
- KMP = Kompostierung
- VGÄ = Vergärung
- KVA = Kehrlichtverbrennungsanlage
- ARA = Abwasserreinigungsanlage
- IVB = Industrielle Verbrennung.

3. Staubförmige in der Schweiz anfallende Biomasse-Rückstände

3.1. Müllereinebenprodukte (MNP) aus Getreidemühlen

3.1.1. Definition

Müllereinebenprodukte (MNP) entstehen als Nebenprodukte des Mahlprozesses. Rohstoffe sind in erster Linie Getreide und Mais. Zur Nutzung als Brennstoff kommen vor allem MNP aus der Verarbeitung von Brotgetreide infrage, während aus der Verarbeitung von Futtergetreide keine brennbaren MNP anfallen, da die ganzen Getreidekörner inklusive Spelzen verfüttert werden können [11]. In der Schweiz werden jährlich rund 500'000 Tonnen Brotgetreide geerntet, wovon 95% Weizen sind [11]. Swissmill, die Getreidemühle von Coop mit 25% Marktanteil in der Schweiz, verarbeitet hauptsächlich Weichweizen (65–75 Vol.-%) und Hartweizen (20–30 Vol.-%) sowie Hafer und Mais [11].

3.1.2. Eigenschaften brennbarer Müllereinebenprodukte

Bei brennbaren MNP handelt es sich um nicht-proteinhaltige Reste wie Silostaub, Spelzen und Rohfasern, wobei Spelzen fast nur bei Schälgetreide wie Dinkel oder Hafer anfallen. Kleie, die ebenfalls als Reststoff anfällt, enthält viele Proteine und wird deshalb grossteils als Futtermittel weiterverkauft. Ein kleiner Teil wird bei der Pelletierung der staubförmigen, brennbaren MNP als Bindemittel zugeführt [11]. Eine Untersuchung der Pellets von Swissmill inklusive Heizwert- und Elementaranalyse wurde 2012 im Rahmen der Vorabklärungen zum Projekt durch die Firma Eicher & Pauli durchgeführt (Beilagen). Im Rahmen dieser Versuche wurden auch weitere Analysen durchgeführt. Aufgrund eines Vergleichs mit Waldhackschnitzeln werden die Verbrennungseigenschaften wie folgt beurteilt [13]:

- Brennwert und Heizwert sind im typischen Bereich von Biomasse und geringfügig unter den Werten von Holz.
- Die Dichte von MNP beträgt zwischen 250 und 350 kg/m³, was zur Förderung geeignet ist.
- Der Aschegehalt ist um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei naturbelassenem Holz und vergleichbar mit Altholz oder Rinde. Somit ist mit einem erhöhten Rohgasgehalt an mineralischem Staub sowie mit einer erhöhten Aschemenge zu rechnen.
- Der Stickstoffgehalt ist deutlich höher als bei naturbelassenem Holz, weshalb mit hohen NO_x-Emissionen gerechnet werden muss.
- Der Schwefelgehalt ist ebenfalls erhöht und vergleichbar zu Gras und Stroh.
- Der Chlorgehalt ist im Vergleich zu Holz erhöht, aber tiefer als bei Gras und Stroh.
- Die Korrosionsneigung dürfte höher sein als bei Holz aber geringer als bei Gras und Stroh. Das Korrosionspotenzial kann aber nicht sicher vorhergesagt werden, weil es darauf ankommt, in welcher Form die Elemente vorliegen. Ein hohes Schwefel/Chlor-Verhältnis ist aber vorteilhaft gegen Korrosion.
- Der Kaliumgehalt ist erhöht, was zu erhöhten Staubemissionen an Kaliumchlorid (KCl) sowie zu Verschlackung und Ablagerungen führt, jedoch Chlorwasserstoff (HCl) entgegenwirkt.
- Die Verschlackungstemperaturen sind kritisch. Diese sind viel tiefer als bei Holz und sogar tiefer als bei Stroh und Gras oder zumindest an der unteren Grenze wie bei Stroh und Gras.
- Schwermetalle scheinen nicht sonderlich kritisch zu sein.

Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Für eine emissionsarme energetische Nutzung ist eine Abgasentstickung notwendig. Für eine selektive katalytische Reduktion (SCR) wäre Deaktivierung ein Thema, für SNCR (selektive nicht-katalytische Reduktion) dagegen nicht. Bei SNCR ist dagegen die Temperatur kritisch, da diese bereits 100°C über dem Sinterbeginn und nur 100°C unter der Ascheerweichungstemperatur liegt. Es braucht also eine sehr akkurate Temperaturregelung vorzugsweise auf 850°C ±10°C.
- Die Korrosion ist eventuell erhöht, weshalb Massnahmen notwendig sind.
- Der Aschegehalt ist erhöht, aber mit Altholz oder Stroh vergleichbar. Jedoch ist mit erhöhten Unterhaltskosten zu rechnen.
- Ascheablagerungen im Kessel sind möglich und dazu Massnahmen notwendig.
- Das Ascheschmelzverhalten ist kritisch. Dieses ergibt sich für die Mischung nichtlinear aus den Schmelztemperaturen der zwei Misch-Brennstoffe. Dies kann vorteilhaft oder nachteilig sein (wegen Eutektika). Da MNP sehr tiefe Ascheerweichungstemperaturen aufweisen, wird durch Mischung mit Holz und eine Begrenzung des Anteils MNP auf 50 % (bezogen auf Heizwert) erwartet, dass die Mischung voraussichtlich unkritischer ist als reine MNP.

3.1.3. Potenzial an Müllereinebenprodukten

Zur Abschätzung des Potenzials an Müllereinebenprodukten liegen Daten vom Bauernverband [14] und von Swissmill vor [11]. Im Jahr 2013 wurden in der Schweiz 837'936 t Getreide geerntet, davon 490'011 t Brotgetreide und 347'925 t Futtergetreide [14]. Swissmill hat einen Marktanteil von 25% sowohl am schweizerischen Mehlmarkt als auch an der Menge des verarbeiteten Getreides in der Schweiz und produziert etwa 200'000 t Mehl pro Jahr, wobei die Hälfte des Getreides importiert wird [11]. Gesamthaft werden pro Jahr in der Schweiz also 800'000 t Mehl produziert, von denen 400'000 t aus einheimischer Produktion stammen. Diese Angaben stimmen ungefähr mit den Zahlen des schweizerischen Bauernverbandes überein [14].

Bei der Getreideverarbeitung fallen rund 25% des Inputs als Müllereinebenprodukte an. Bei einer Produktion von 800'000 t Mehl im Jahr entspricht dies 266'000 Tonnen pro Jahr. Der derzeit erzielbare Preis für diese Müllereinebenprodukte beläuft sich auf 20 bis 22 CHF pro 100 kg [11]. Bei einem Heizwert von rund 4,5 kWh/kg entsprechen die Müllereinebenprodukte einem Potenzial zur energetischen Nutzung von 1200 GWh pro Jahr bei Preisen von 4,4 bis 4,9 Rp./kWh. Dies entspricht ungefähr dem Marktpreis von Waldhackschnitzeln von im Mittel rund 4,4 Rp./kWh in der Schweiz³, während der Preis deutlich tiefer ist als der Detailhandelspreis von Heizöl⁴. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Stoffflüsse an Getreide und MNP in der Schweiz.

Tabelle 1 Stofffluss an Getreide in der Schweiz und Anfall brennbarer MNP nach Angaben von Swissmill [11].

Werte in 1000 t/a	Müllerei-Input			Müllerei-Output	
	Herkunft Schweiz	Import	Total	Produkt	Brennbare MNP
Brotgetreide	533	533	1066	800	266
Futtergetreide			1000	1000	0
Total			2066	1800	266

³ Mittelwert für Energieholz aus dem Wald im Jahr 2013: 4,4 Rp./kWh nach www.bfs.admin.ch 20.4.14.

⁴ Der Lieferpreis von Heizöl EL beträgt im März 2015 rund 7 Rp./kWh für Liefermengen über 10'000 Liter.

3.2. Getreideabgang

3.2.1. Definition

Die Futtermittelbuch-Verordnung definiert den Getreideabgang wie folgt: „Nebenprodukt, das bei der Getreidereinigung nach dem Entfernen der Fremdbestandteile anfällt“ [15]. Getreideabgang beinhaltet somit neben Fremdkörpern auch verdorbene Körner, Spelzen, Mutterkorn, Brandbutten sowie tote Insekten und Insektenteile. Getreideabgang fällt in Getreidesammelstellen an und darf nicht als Futtermittel verwendet werden [15].

Minderwertiges Getreide, das zum Beispiel von Pilzen befallen ist, wird heutzutage meist in Biogasanlagen weiterverarbeitet [16], [17]. Dabei dient es unter anderem als Co-Substrat mit Gülle bei der Methanproduktion [18]. Weiter wird Getreideabgang auch kompostiert oder verbrannt [19], [20]. Untersuchungen haben ergeben, dass sich Getreideabgang dank seinem tiefen Feuchtigkeitsgehalt als Zusatzbrennstoff mit feuchteren Brennstoffen wie Pferdemist eignet [21].

3.2.2. Eigenschaften

Getreideabgang ist zwar heterogen, es kann aber angenommen werden, dass er grossteils aus Getreidekörnern besteht, die ähnliche Eigenschaften wie Müllereinebenenprodukte und somit die erwähnten kritischen Verbrennungseigenschaften aufweist:

- Der Aschegehalt ist um Faktor 2 bis 3 höher als bei naturbelassenem Holz und vergleichbar mit Altholz oder Rinde. Dies kann zu Ascheablagerungen führen.
- Der Stickstoffgehalt ist hoch, weshalb mit hohen NO_x-Emissionen gerechnet werden muss.
- Wegen der erhöhten Chlor- und Schwefelgehalte ist eine erhöhte Korrosionsneigung möglich.
- Die Verschlackungstemperaturen sind deutlich tiefer als bei Holz.

3.2.3. Potenzial

Informationen von Experten von Getreidesammelstellen haben ergeben, dass 1% bis 2% des zu verarbeitenden Getreides als Getreideabgang anfallen, wobei nur ungefähr 0.25% verdorbenes Getreide ist [16], [19], [20]. Bei einer Getreideernte von 837'936 t im Jahr 2013 [14] entspricht dies einem Potenzial an brennbarer Biomasse von 8'400 bis 12'500 t/a, dessen Entsorgung kostenpflichtig ist zu einem Preis von 40 CHF/t [19]. Bei einem Heizwert von rund 4,5 kWh/kg entspricht der Getreideabgang somit einem Brennstoffpotenzial von 37,8 bis 56,3 GWh pro Jahr und einem potenziellen Verdienst durch Annahme zu dessen Entsorgung von 0,89 Rp./kWh. Dieses Potenzial ist ökonomisch interessant, da der Getreideabgang heutzutage nicht zur Futtermittelindustrie umgeleitet wird und seine Entsorgung kostenpflichtig ist.

3.3. Zucker

3.3.1. Zuckerproduktion

Zuckerrüben haben eine Zusammensetzung von 75% Wasser, 17% Zucker und Reststoffen. Die Rüben werden erst gewaschen und zerkleinert. Danach wird der Zucker im Gegenstromverfahren mit heissem Wasser extrahiert. Der Rohsaft wird mittels Zugabe von Kalk und Kohlensäure gereinigt und ein Grossteil des Wassers verdampft und am Ende schliesslich der Zucker auskristallisiert [22]. Zuckerrohr wird in der Schweiz nicht verarbeitet und wird darum in dieser Studie nicht weiter bearbeitet.

3.3.2. Nebenprodukte und Potenzial

Nebenprodukte der Zuckerproduktion sind Erde, Dicksaft, Melasse, Kalk sowie Press- und Trockenschnitzel. Während die Erde rezykliert, der Dicksaft und die Melasse in die Lebensmittelproduktion weiterverkauft und der Kalk als Düngemittel benutzt werden, werden die Press- und Trockenschnitzel heutzutage der Futtermittelproduktion zugeführt [23].

Die Schweizer Zucker AG mit einem Marktanteil von bis zu 100% hat zwei Zuckerwerke (Aarberg und Frauenfeld) ähnlicher Grösse, die zusammen rund 1,9 Millionen Tonnen Zuckerrüben im Jahr verarbeiten [24]. Nach [25] beträgt die jährliche Produktion im Mittel rund 260'000 t/a (zwischen 220'000 t/a und 300'000 t/a). Die Produktion erfolgt im Anschluss an die Ernte während einer Periode von rund drei Monaten im Jahr.

200'000 t/a oder 10,5% der Zuckerrüben werden zu Pressschnitzeln mit einem Wassergehalt von 72%. Diese werden zu rund 5 Franken pro 100 kg vor allem an die Futtermittelproduktion verkauft [23]. Aufgrund des hohen Wassergehalts ist eine thermische Nutzung ohne Trocknung ausgeschlossen oder eine Verwendung höchstens als Zugabe zu trockenem Brennstoff möglich. Dieses Potenzial wird aber als uninteressant beurteilt.

30'000 t/a oder 1,6% der Zuckerrüben werden zu Trockenschnitzeln mit einem Wassergehalt von 10% bis 12%. Diese werden pelletiert und zu rund 36 Franken pro 100 kg als Futtermittel verkauft [23]. Bei einem Heizwert von 4,5 kWh/kg entspricht dies einem energetischen Potenzial von 135 GWh pro Jahr mit potenziellen Brennstoffpreisen von 8 Rp./kWh. Eine energetische Verwendung ermöglicht eine Wertschöpfung von rund der Hälfte dieses Preises und ist damit ökonomisch uninteressant.

3.4. Kakaoschalen

3.4.1. Schokoladeproduktion

Die Kakaobohnen werden erst gereinigt und debakterisiert bevor sie geröstet, gemahlen und verflüssigt werden. Die flüssige Kakaomasse wird dann mit den jeweiligen Zutaten vermischt (Kakaobutter, Fett, Zucker, Milchpulver, etc.) und verwalzt. Bei der Conchierung wird sie dann erwärmt und verrührt und danach temperiert, geformt und abgekühlt [26].

3.4.2. Nebenprodukte und Potenzial

Neben Unreinheiten wie kleinen Steinen, Staub und Sand fallen Kakaoschalen als brennbare Reststoffe an. Kakaoschalen machen gewichtsmässig 10% bis 15% der gerösteten Kakaobohnen aus [27]. Ihr Wassergehalt beträgt weniger als 5% [28].

Chocolat Halba produziert 12'500 Tonnen Schokolade pro Jahr, was ungefähr 7% der gesamten Menge der schweizerischen Schokoladeindustrie entspricht. Dabei fallen rund 280 t/a Kakaoschalen an. Auf die Schweiz hochgerechnet resultiert damit ein Wert von ungefähr 4'000 Tonnen Kakaoschalen pro Jahr [28]. Die Kakaoschalen werden heutzutage als Tierfutter für 15 bis 25 Franken pro 100 kg oder zur Kakaoaromaerzeugung für 25 bis 65 Franken pro 100 kg verkauft. Anteilsmässig variieren die Mengen stark, da sie von der Nachfrage der Aromaproduzenten abhängt, welche im Jahr 2013 rund 90% der Kakaoschalen abgenommen haben.

Bei einem Heizwert von 4,5 kWh/kg entsprechen die Kakaoschalen einem energetischen Potenzial von 18 GWh pro Jahr bei potenziellen Brennstoffpreisen von 3,3 bis 5,3 Rp./kWh beziehungsweise von 5,3 bis 14,4 Rp./kWh. Eine energetische Verwertung der Kakaorückstände kommt deshalb nur für diejenigen Mengen infrage, welche die Nachfrage der Aromaproduzenten übersteigen.

3.5. Kaffeeschalen

3.5.1. Kaffeeproduktion

Nach der Ernte werden das Fleisch der Kaffeebohnen im Herkunftsland entfernt und die Kaffeebohnen getrocknet. Die Kaffeeröstung, die nötig ist, um geniessbaren Kaffee zu produzieren, findet dagegen oft in der Schweiz statt. Die Farbe der Bohnen ändert sich dabei von grün zu gelb bis braun. Die Röstung beeinflusst den Geschmack des Kaffees wesentlich. Je stärker die Röstung, desto dunkler werden die Bohnen und desto stärker wird der Geschmack [29].

3.5.2. Nebenprodukte und Potenzial

Bei der Kaffeeröstung fällt als Nebenprodukt das Silberhäutchen an. Dabei handelt es sich um eine faserige Schicht, welche die Kaffeebohnen in der Kaffeefrucht umhüllt und die bei der Röstung losgelöst wird. Eigenschaften der Silberhäutchen sind eine holzige Zusammensetzung mit einem Wassergehalt von 12% bis 13%. Kaffeebohnen bestehen zu ungefähr 0.5% bis 0.7% aus diesen Silberhäutchen [30]. Die anfallenden Silberhäutchen werden pelletiert, brikettiert oder lose gesammelt. Die UCC Coffee gibt ihre Pellets kostenfrei an interessierte Bauern ab, die sie dem Tierfutter beimischen. Teilweise werden sie auch der Kehrichtverbrennung zugeführt [30].

UCC Coffee produziert 7'500 t Kaffee pro Jahr. Dabei fallen je nach Kaffeesorste 30 bis 40 Tonnen Reststoffe an. Der Marktanteil von UCC Coffee wird berechnet anhand der Importstatistik und beläuft sich bei einem totalen Importvolumen von 79'000 t Rohkaffee pro Jahr auf knapp 10% Anteil am schweizerischen Kaffeemarkt [30]. Auf die Schweiz hochgerechnet resultiert ein Potenzial an brennbaren Kaffeerückständen von 300 bis 400 t pro Jahr, was bei einem Heizwert von 4,5 kWh/kg einem energetischen Potenzial von 1,35 bis 1,80 GWh pro Jahr entspricht. Da die Abgabe kostenfrei oder eine Entsorgung in der Kehrichtverbrennung erfolgt, ist die energetische Nutzung von Kaffeenebenprodukten ökonomisch interessant.

3.6. Reismühlennebenprodukte

3.6.1. Reisproduktion

Der Rohreis, der durch Dreschen und Trocknen der Reiskörner anfällt, wird in einem ersten Mahlprozess der Spelzen entledigt. Dieser Produktionsschritt zu Halbrohreis, auch Vollreis genannt, wird normalerweise im Anbaugebiet vorgenommen, um das Transportvolumen zu verkleinern. Die Reisspelzen werden dabei direkt energetisch genutzt. Das Potenzial zur energetischen Nutzung der Reisspelzen in der Schweiz ist deshalb mit Ausnahme des im Inland produzierten Reises nicht gegeben. Weissreis wird schlussendlich durch Weiterverarbeitung des Vollreises hergestellt. Dieser Produktionsschritt wird meist in der Schweiz vorgenommen und dabei das nährstoffreiche Silberhäutchen weggeschliffen [31].

3.6.2. Nebenprodukte und Potenzial

In der Reisproduktion fallen als Reststoffe Pula und Bruchreis an. Pula ist die Bezeichnung für den Schleifstaub des Silberhäutchens, der als Reiskleie für einen Preis von 35 Franken pro 100 kg der Tierfutterproduktion zugeführt wird. Es hat einen Wassergehalt von 14%. Auch der Bruchreis wird für 39 Franken pro 100 kg der Tierfutterproduktion zugeführt [32].

Die Reismühle Brunnen, eine Division von Coop, produziert jährlich 12'000 t Reis, wobei ungefähr 180 t Pula und 800 t Bruchreis anfallen [32]. Bei einem Anteil von 25% am schweizerischen Reismarkt ergibt dies ein Gesamtpotenzial für die Schweiz von 720 t Pula und 3200 t Bruchreis. Die Reismühle Brunnen bezieht 0.2% ihres Rohstoffes aus der Schweiz. Der Reisanbau in der Schweiz wird nur im Tessin betrieben und liefert rund 208 t verkaufbaren Reis [33]. Da dieser Wert sehr klein ist, wird das Potenzial der Reisspelzen aus der schweizerischen Produktion in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Zahlen zum in der Schweiz verarbeiteten Reis entsprechen bei einem Heizwert von 4,5 kWh/kg einem energetischen Potenzial von 3,24 GWh pro Jahr für Pula und 14,4 GWh pro Jahr für Bruchreis bei potenziellen Brennstoffpreisen von 7,8 Rp./kWh und 8,7 Rp./kWh. Diese Preise sind deutlich höher als für Energieholz, weshalb Reismühlennebenprodukte als Brennstoff nur bedingt infrage kommen.

3.7. Ölnebenprodukte

3.7.1. Ölproduktion

Speiseöl wird in der Schweiz aus verschiedenen Rohstoffen gepresst, nämlich aus Raps, Sonnenblumen, Soja, Leinen, Kürbis und in kleinen Mengen auch aus Hanf. Dabei resultieren grosse Mengen an Press- und Filterkuchen. Dagegen wird die Ölgewinnung durch Extraktion der Rapssaat in der Schweiz nicht angewendet, wodurch auch kein Rapsextraktionsschrot anfällt [34].

3.7.2. Nebenprodukte und Potenzial

In der Ölproduktion werden rund zwei Drittel des Gewichts der Rohstoffe als Nebenprodukte abgesetzt [35]. Diese sind Press- und Filterkuchen. Die Bruttoproduktion von Ölsaaten in der Schweiz im Jahr 2013 umfasste folgenden Mengen [14]:

Raps	72'510 t
Sonnenblumen	8571 t
Soja	3553 t
Öllein	464 t
Ölhanf	29 t
Ölkürbis	5 t
Total	85'132 t

Mit der Annahme, dass bei allen Ölsaaten zwei Drittel als Nebenprodukte anfallen, entspricht dies einem Brennstoffpotenzial von rund 55'000 t/a und bei einem Heizwert von 6 kWh/kg einem energetischen Potenzial von 330 GWh pro Jahr. Rapskuchen werden für rund 45 Franken pro 100 kg als Tierfutter verkauft [35]. Bei einem Energiegehalt von 6 kWh/kg entspricht dies einem Preis von 7,5 Rp./kWh. Da der Preis deutlich höher ist als von Energieholz kommen Ölproduktionsreststoffe nur bedingt zur direkten energetischen Nutzung infrage.

3.8. Nussnebenprodukte

3.8.1. Nussverarbeitung

Die landwirtschaftliche Produktion von Nüssen spielt in der Schweiz eine untergeordnete Rolle. Über 98% der in der Schweiz verkauften Nüsse und Nusskerne stammen aus dem Ausland [36]. Die Nüsse kommen meist in gereinigter Form zur Weiterverarbeitung in der Schweiz an, weshalb nur wenig Nebenprodukte anfallen [37].

3.8.2. Nebenprodukte und Potenzial

Die Nebenprodukte der Nussverarbeitung sind nicht sortenreine Stäube und Fasern. Die anfallenden Mengen sind gering mit weniger als einem halben Promille der verarbeiteten Nussmenge [38]. Noch verwertbare Produktereste werden kostenlos an die Futtermittelindustrie abgegeben. Mit einem Importvolumen von rund 2800 Tonnen im Jahr 2012 [36] fallen maximal 1 bis 2 Tonnen Nebenprodukte an. Bei einem Heizwert von 4,5 kWh/kg entsprechen diese einem Potenzial von 4,5 bis 9,0 MWh pro Jahr. Nussnebenprodukte wären dank der kostenlosen Abgabe zwar interessant, jedoch sind die Mengen sehr klein und das Potenzial deshalb uninteressant.

3.9. Weitere potenzielle Brennstoffe

Pferdemist und Hühnerfedern stellen weitere potenzielle Biomassebrennstoffe dar, werden in diesem Bericht jedoch nicht weiter behandelt, da sie nicht in der direkten landwirtschaftlichen Lebensmittelproduktion anfallen. Pferdemist ist ausserdem aufgrund seiner Feuchtigkeit nur zusammen mit anderen Brennstoffen nutzbar. Frühere Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass der in der Schweiz anfallende Pferdemist ein Energiepotenzial von rund 100 bis 150 GWh pro Jahr aufweist [21]. Hühnerfedern werden heutzutage exportiert und als Düngerzusatz verwendet. Versuche zeigen jedoch, dass die Pelletierung und Verbrennung von Hühnerfedern möglich ist und dass in der Schweiz ein Potenzial von rund 300 GWh pro Jahr besteht [39].

Brauereirückstände beinhalten Treber und Überschusshefe sowie Alkohol aus der Entalkoholisierung [40]. Pro Liter Bier fallen 0,25 kg Treber und Überschusshefe an [41], was bei einer schweizerischen Produktion von 3,43 Millionen Hektoliter Bier im Jahr 2014 einer Menge von 85'000 Tonnen pro Jahr entspricht [42]. Das Potenzial zur energetischen Nutzung von Treber und Überschusshefe ist aber nicht gegeben, da sie wegen ihres hohen Wassergehalts einen negativen Heizwert aufweisen [40]. Der überschüssige Alkohol wird heute schon energetisch genutzt, weshalb auch dafür kein weiteres Potenzial besteht.

4. Brennstoffeigenschaften der Biomassesortimente

4.1. Datenquellen

Es wurde eine Literaturrecherche zu den Eigenschaften der infrage kommenden staubförmigen Biomassebrennstoffe ausgeführt und die Ergebnisse in einer Excel-Tabelle zusammengestellt. Die Excel-Datei ist aus 3 Blättern aufgebaut mit einer Zusammenfassung der Daten für verschiedene übergeordnete Brennstofftypen. Diese Zusammenfassung ist im vorliegenden Bericht als Tabelle 2 dargestellt und mit einer Übersicht der verwendeten Quellen ergänzt.

Die Literaturdaten umfassen Angaben der BioBib der TU Wien [52] sowie Messdaten aus verschiedenen Publikationen. Für die Zuckerrübenschnitzel sind auch Daten der Schweizer Zucker AG vorhanden. Zu MNP von Swissmill liegen aus den Jahren 2011 und 2012 Analysen vor, die im Rahmen des vorliegenden Projekts von MNP der Swissmill durchgeführt wurden.

4.2. Brennwert und Heizwert

Die Brenn- und Heizwerte der untersuchten Nebenprodukte sind vergleichbar mit den Werten für Holz, Gras und Stroh mit Ausnahme von ÖlfILTERKUCHEN und Brauereirückständen, deren Werte leicht erhöht sind. Dies kann auf den Öl- beziehungsweise den Alkoholgehalt der beiden Nebenprodukte zurückgeführt werden, welche einen positiven Einfluss auf die Brenn- und Heizwerte haben.

4.3. Wassergehalt

Der Wassergehalt des Brennstoffs ist wichtig, da der Heizwert mit zunehmendem Wassergehalt linear abnimmt [36]. Der Wassergehalt der untersuchten Nebenprodukte entspricht in den meisten Fällen etwa demjenigen von Holz oder liegt tiefer als von Energieholz aus dem Wald. Eine Ausnahme bilden die Pressschnitzel der Zuckerproduktion. Um diese zu verbrennen, müssten sie erst getrocknet werden, was nicht nur aufwändiger ist sondern auch ihren Nutzwert mindert.

4.4. Stickstoffgehalt

Bei der Biomasseverbrennung entstehen schädliche Stickoxide (NO und NO_2) vor allem aus dem im Brennstoff chemisch gebundenen Stickstoff in oxidierender Atmosphäre, während in reduzierender Atmosphäre, das heisst bei Sauerstoffmangel, die Bildung von molekularem Stickstoff gefördert wird [44]. Die untersuchten Nebenprodukte weisen alle erhöhte Stickstoffgehalte auf im Vergleich zu Holz. Darum muss bei deren Verbrennung mit ebenfalls erhöhten Stickstoffoxidemissionen gerechnet werden. Je nach Anlagengrösse, Emissionsgrenzwerten und Feuerungstechnik ist zur Einhaltung der Stickoxidgrenzwerte deshalb eine zusätzliche Entstickung der Abgase notwendig.

4.5. Schwefel-, Chlor- und Kaliumgehalt

Brennstoffschwefel und Chlor können bei der Verbrennung die korrosiven Schwefeloxide (SO_2 bzw. SO_3) und Chlorwasserstoff (HCl) bilden, was zu Beschädigungen der Anlage führen kann [45]. Die untersuchten Brennstoffe weisen bis zu viermal höhere Schwefelwerte als Holz und auch leicht erhöhte Chlorwerte auf. Die Korrosionsneigung dürfte höher sein als bei Holz. Jedoch kann das Korrosionspotenzial nicht sicher vorhergesagt werden, da es darauf ankommt, in welcher Form die Elemente vorliegen. Ein hohes Schwefel/Chlor-Verhältnis ist aber vorteilhaft gegen Korrosion.

Für einige Nebenprodukte liegen Messwerte zum Kaliumgehalt vor, der Brennstoffchlor als Kaliumchlorid (KCl) binden und die Bildung von Chlorwasserstoff reduzieren kann. Dies kann die Korrosion ebenfalls beeinflussen und es führt daneben zu verstärkter Verschlackung.

4.6. Aschegehalt

Der Aschegehalt von allen untersuchten Nebenprodukten ist um ein Vielfaches höher im Vergleich zu Holz und oft vergleichbar mit Gras und Stroh. Dies hat höhere Unterhaltskosten zur Folge. Da jedoch die Schwermetallwerte der Nebenprodukte mit denen von Holz zu vergleichen sind, ist die anfallende Asche für die Deponierung nicht höher oder weniger stark belastet als Holzasche.

4.7. Wärmeverhalten der Asche

Das Wärmeverhalten der Asche ist von Bedeutung, da die Verschlackung der Asche negative Auswirkungen auf die Verbrennung und den Anlagenbetrieb hat und unter anderem Ascheablagerungen in der Brennkammer und im Kessel verursacht [46]. Das Ascheschmelzverhalten wird anhand von vier Temperaturen beschrieben, deren Bestimmung auf der Norm DIN 51730 basiert [47] (Bild 3):

- (1) Erweichungstemperatur: Bei dieser Temperatur verändert sich die Oberfläche des untersuchten Ascheprobekörpers, d.h. die Kanten werden rund und die Partikel beginnen die mit Gas gefüllten Zwischenräume auszufüllen.
- (2) Sphärischtemperatur: Bei dieser Temperatur nimmt der Probekörper eine kugelhähnliche Form an und ist so hoch wie seine Grundlinie.
- (3) Halbkugeltemperatur: Bei dieser Temperatur nimmt der Probekörper eine halbkugelhähnliche Form an und ist noch ungefähr halb so hoch wie seine Grundlinie.
- (4) Fliesstemperatur: Bei dieser Temperatur ist der Probekörper so weit auseinander geflossen, dass die Höhe auf einen Drittel der Höhe bei Halbkugeltemperatur schrumpft.

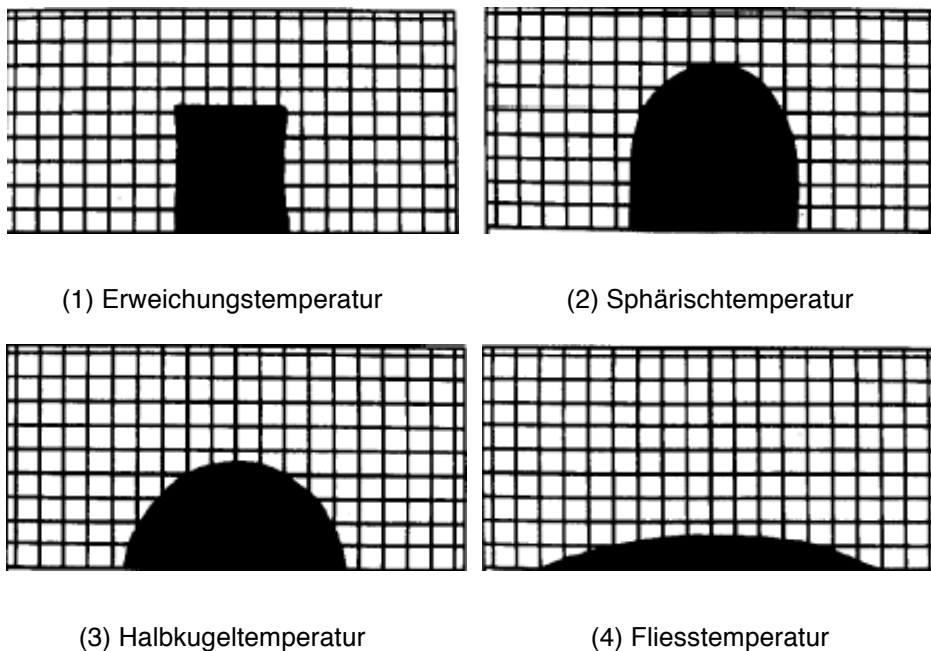


Bild 3 Schmelzphasen einer Steinkohlenasche [47].

Generell zeigt sich, dass alle untersuchten Biomassebrennstoffe mit Ausnahme der Brauereirückstände tiefere Verschlackungstemperaturen als Holz aufweisen. Dies führt dazu, dass in der Brennkammer tiefere Temperaturen erforderlich werden, um Verschlackung zu vermeiden. Eine Verbrennung der Biomassebrennstoffe zusammen mit holzigem Brennstoff kann zur Reduktion der Verschlackungsproblematik voraussichtlich vorteilhaft sein.

Tabelle 2 Energieinhalt, Brennstoffeigenschaften und Zusammensetzung der untersuchten Biomassesortimente im Vergleich zu Holz.
 SIT = Sintertemperatur, SOT = Erweichungstemperatur (Softening temperature), HAT = Halbkugeltemperatur, FT = Fliesstemperatur.

^aDas Wärmeverhalten der Asche wird von der BioBib-Datenbank der TU Wien übernommen, die auf DIN 51730:1978 basiert. Im Gegensatz zur DIN 51730:2007 wird in der BioBib keine Sphärischtemperatur angegeben, dagegen jedoch die Sintertemperatur. Diese beschreibt den Punkt, an dem einzelne Aschepartikel zusammenkleben und so die Dimensionen des Körpers bereits verändern, während die Charakteristika der Erweichungstemperatur jedoch noch nicht erfüllt sind.

Eigenschaft	Energieinhalt		Wassergehalt	Zusammensetzung							Asche	Wärmeverhalten der Asche ^a				Quellen	
	[MJ/kg]		Gew-%	Gew-%							Gew-%	[°C]					
	Brennwert	Heizwert	w	C	H	N	S	Cl	O	K	a	SIT	SOT	HAT	FT		
Holz	17.5-19.5		10-60	50	6.0	0.05-0.5	0.01-0.1	<0.001	44.0	0.1-0.2	0.1-1	1180	1470			[48]	
Gras	17		5-20			2.0	0.20	0.50		0.2	6-12	870	970			[48]	
Stroh	17.5		5-20			0.5	0.15	0.40		0.1	4-8	830	940			[48]	
MNP (Pellets/Staub)	19	17.7	10-14	46	6.5	2.5	0.15	0.06	44.8	0.57	5	700-800	720-950	770-1150	900-1200	[49], [50], [51]	
Getreide (ganze Pflanze)	17.5-19	15.5-17.5		45	6.8	1.5	0.10		46.4		4					[52]	
Zuckerrüben-Rückstände	16-19	15.5-17.5	Trocken-schnitzel	8-13	45	5.9	1.8	0.13	0.1	47.6	0.7-1.2	6.5	1000	1200	1600	1670	[52], [23]
			Press-schnitzel	71-73								8.5					
Raps (Oelfilterkuchen)	22-25	20.5-23.5	10	50	7.0	4.5	0.40	0.03	38.1	0.8-1.2	6	1000	1120	1140	1140	[6], [52], [53], [54]	
Kaffeebohnen (Schalen)	17.5-19	15.5-17.5	3	47	5.5	2.0	0.40		45.1		3					[6], [55], [56], [57], [58]	
Kakaobohnen (Schalen)	17.5-19	15.5-17.5	6	43	5.8	2.3	0.30	0.1	48.5		10					[6], [59], [60], [61], [62]	
Reis (Kleie)	19		12							1.4-2.4	10					[63], [64], [65]	
Reis (Bruchreis)	17.5			38	4.8	0.2	0.31		56.9		23.4					[52]	
Nüsse (Schalen)			7.5	51	6.5	1.3	0.03	0.1	41.0		2.5					[60]	

5. Potenzial staubförmiger Biomasse als Brennstoff

Tabelle 3 fasst die jährlich anfallenden und zur energetischen Nutzung infrage kommenden Mengen an staubförmigen Nebenprodukten der Biomasse-Verarbeitung zusammen. Zusätzlich werden die Anteile am Endenergieverbrauch und am Wärmeverbrauch der Schweiz ausgewiesen und über die heute erzielten Preise bzw. dem heute zu bezahlenden Entsorgungspreis das Wertschöpfungspotenzial ausgewiesen. Die Erhebung zeigt folgende Resultate:

- Unter den untersuchten staubförmigen Biomassebrennstoffen machen die Müllereinebenprodukte mit rund 69% den Hauptanteil des Energiepotenzials aus. Einen relevanten Beitrag erzielen im Weiteren Ölnebenprodukte mit knapp 19% und Zuckerrübenschnitzel mit 7,7% Anteil am Potenzial, während die restlichen Sortimente weniger als 5% ausmachen.
- Für als Tierfutter verwertbare Müllereinebenprodukte (MNP) werden heute Preise zwischen 4,4 bis 4,9 Rp./kWh erzielt. Dieser Preis entspricht ungefähr demjenigen von Waldhackschnitzeln und er ist über 30% niedriger als der Detailhandelspreis für Heizöl. Eine energetische Nutzung von Müllereinebenprodukten kommt deshalb aus ökonomischer Sicht infrage und ist besonders attraktiv für Sortimente, die als Tierfutter nicht oder mit wenig Nutzen verwertbar sind.
- Demgegenüber erzielen Zuckerrübenschnitzel und Ölnebenprodukte Preise, die deutlich über denjenigen von Energieholz aus dem Wald und auf derzeit vergleichbarem Niveau wie Heizöl sind, weshalb eine energetische Verwertung nicht infrage kommt.
- Getreideabgang, der einen Energieanteil von 2,7% der untersuchten Sortimente aufweist, verursacht heute relevante Entsorgungskosten, weshalb eine energetische Nutzung attraktiv wäre.
- Bei Kakaoschalen mit einem Anteil von 1,0% an den untersuchten Biomassesortimenten wird für die als Aromastoff verwertbaren Mengen ein deutlich höherer Preis als für Brennstoff erzielt. Die darüber hinausgehende Menge kommt für eine energetische Nutzung infrage, ist aber gering und von der Nachfrage nach Aromastoffen abhängig.
- Die energetische Verwertung von Kaffee- und Nussresten kann ökonomisch ebenfalls attraktiv sein, da diese derzeit kostenlos abgegeben werden. Die verfügbaren Mengen sind aber mit weniger als 0.1% Anteil am Potenzial gering.
- Das Potenzial an Nebenprodukten aus Reismühlen macht 1% der untersuchten Sortimente aus. Da für diese Nebenprodukte heute Preise von über 7 Rp./kWh erzielt werden, sind sie für eine energetische Nutzung uninteressant.
- Die als Energieträger ökonomisch infrage kommenden Sortimente entsprechen einem Wertschöpfungspotenzial von insgesamt rund 56 Mio. Franken pro Jahr.
- Eine Nutzung sämtlicher Biomassebrennstoffe würde rund 0,70% des heutigen Gesamtenergie- oder 1,34% des Wärmeverbrauchs der Schweiz decken. Die günstiger als Heizöl verfügbaren Sortimente entsprechen 0,50% des Gesamtenergie- und 0,96% des Wärmeverbrauchs.

Die Potenzialabschätzung zeigt, dass zur Versorgung der Thermoölzentrale in Schafisheim rund 1% des Anfalls an Müllereinebenprodukten der Schweiz oder rund 4% der Swissmill benötigt werden. Somit besteht grundsätzlich die Möglichkeit, eine grosse Zahl ähnlicher Anlagen zur Substitution fossiler Energieträger für hochwertige Prozesswärmeerzeugung zu realisieren.

Für die Biomassesortimente, für welche heute keine Verwertungsmöglichkeiten bestehen, ist eine entsprechende Nutzung sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll, während eine energetische Verwertung hochwertiger Sortimente wie Ölnebenprodukte und Zuckerrübenschnitzel nicht sinnvoll ist. Für Müllereinebenprodukte, welche den Hauptteil ausmachen und kostenmässig mit Energieholz vergleichbar sind, kann die Etablierung einer energetischen Verwertung in einem Umfang sinnvoll sein, der sich auf Teilmengen niedriger Qualität beschränkt und die Nutzung als Futtermittel ergänzt.

Tabelle 3 Mengenstrom an Biomasse zur potenziellen Nutzung als staubförmiger Brennstoff in der Schweiz und daraus resultierende Energieströme sowie deren Anteil am Gesamtenergie- und am Wärmeverbrauch. Zusätzlich ist der Preis pro kWh Heizwert angegeben, der durch den Verkauf der Biomassesortimente heute erzielt wird. Da die Entsorgung des Getreideabgangs kostenpflichtig ist, wird ein negativer Preis ausgewiesen. .

Werte in Klammern bezeichnen Sortimente, die für eine energetische Verwertung ökonomisch uninteressant sind, da die heute erzielten Preise deutlich höher als 5 Rp./kWh und damit deutlich höher als die Preise von Waldhackschnitzeln sind. Das „Total als Energieträger“ enthält die ökonomisch interessanten Sortimente ohne Werte in Klammern. ^aDer Gesamtenergieverbrauch (GEV) der Schweiz als Endenergie betrug im Jahr 2013 248,9 TWh [7]. ^bDer Gesamtwärmeverbrauch betrug 52,3% des GEV oder 130,2 TWh [8], wovon 86,9 TWh für Raumwärme, 29,1 TWh für Prozesswärme und 14,2 TWh für Warmwasser.

Sortiment	Mengen			Endenergie			Potenzial	Anteil		Preis		Wert gerundet
	1000 t/a			GWh/a				GEV ^a	Wärme ^b	Rp./kWh	Fr./t	
	Min	Median	Max	Min	Median	Max	%	%	%			
MNP		266			1200.0		68.6 %	0.48 %	0.92 %	4.4 – 4.9	200 – 220	55'800'000
– Bedarf Schafisheim					11.2							
– ungenutztes Potenzial					1188.8							
Getreideabgang	8.4	10.5	12.5	37.8	47.1	56.3	2.7 %	0.02 %	0.04 %	–0.89 ^c	–40 ^c	–420'000
Zuckerrübenschnitzel (Trockenschnitzel)		30			(135.0)		7.7 %	0.05 %	0.10 %	8	360	(10'800'000)
Kakaoschalen – Futtermittel – Aroma		4			(18.0)		1.0 %	0.01 %	0.01 %	3.3 – 5.3 5.3 – 14.4	150 – 250 250 – 650	600'000– (2'600'000) ^d
Kaffeereste	0.3	0.35	0.4	1.35	1.58	1.80	0.1 %	-	-	0	0	0
Reismühlennebenprodukte												
– Pula		0.72			(3.24)		0.2 %	-	-	7.8	350	(250'000)
– Bruchreis		3.2			(14.4)		0.8 %	0.01 %	0.01 %	8.7	390	(1'250'000)
Ölnebenprodukte		55			(330.0)		18.9 %	0.13 %	0.25 %	7.5	450	(25'000'000)
Nussreste	0.001	0.0015	0.002	0.0045	0.0068	0.0090	0.0 %	-	-	0	0	0
Total als Energieträger		281			1267			0.50 %	0.96 %	–	–	56'000'000
Total alle Sortimente		(370)			(1750)		100 %	0.70 %	1.34 %	–	–	(93'000'000)

6. Quellen

- [1] International Energy Agency (IEA): *World Energy Outlook 2014*, Paris 2014
- [2] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg 2009
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): *Food wastage footprint – Impacts on natural resource*, Rome 2013
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): *Statistical Yearbook: World food and agriculture*, Rome 2012
- [5] Gustavsson, J.; Cederberg, C.; Sonesson, U.; van Otterdijk, R.; Meybeck, A.: *Global food losses and food waste, Study conducted for the International Congress „Save Food!“ at Interpack2011*, Düsseldorf, FAO, Rom 2011
- [6] Baier, U.; Baum, S.: *Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse, Umwelt-Wissen Nr. 0831*, Bundesamt für Umwelt, Bern 2008
- [7] Bundesamt für Energie: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2013*, Bern Juli 2014
- [8] Kemmler, A.; Piégsa, A.; Ley, A.; Wüthrich, P.; Keller, M.; Jakob, M.; Catenazzi, G.: *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2013 nach Verwendungszwecken*, Bundesamt für Energie, Bern September 2014
- [9] Kaufmann, U.: *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien – Ausgabe 2013*, Bundesamt für Energie, Bern September 2014
- [10] Hersener, J.; Meier, U.: *Energetisch nutzbares Biomassepotential in der Schweiz sowie Stand der Nutzung in ausgewählten EU-Staaten und den USA*, Bundesamt für Energie, Bern 1999
- [11] Gespräch mit Herrn Staehelin und Herrn Eigenmann von Swissmill, 18.9.2014
- [12] Bundesamt für Statistik: Getreideproduktion, Entwicklung
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/07/03/blank/data/01/04.html> (05.03.2015)
- [13] T. Nussbaumer in: D. Wagner, Eicher & Pauli: *Brennstoffkonzept*, 15.2.12
- [14] Schweizerischer Bauernverband Statistik
http://www.sbv-usp.ch/fileadmin/sbvuspch/06_Statistik/Pflanzenbau/se_2013_0217.pdf
(30.10.2014)
- [15] Brief von Agroscope an die Getreidesammelstellen der Schweiz, Posieux 17. Juni 2005
<http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?lang=de&aid=10232&pid=18742> (09.02.2015)
- [16] Telefongespräch mit Herrn Lütolf von Lütolf AG, St. Margrethen, 09.02.2015
- [17] Telefongespräch mit Jean-Louis Hersener vom Ingenieurbüro HERSENER, 02.02.2015
- [18] Bolli, S.; Gazzarin, C.: *Auslastung ist der Erfolgsfaktor*, *Ufa-Revue* 5, 12-13 (2010)
- [19] Telefongespräch mit Herrn Lüscher von Lüscher Neumühle, Hallau, 09.02.2015
- [20] Telefongespräch mit Frau Studer von Hans Nebiker AG, Sissach, 09.02.2015
- [21] Bühler, R.; Hersener, J.; Jenni, A.: *Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen, Verbrennungsversuche Frühjahr 2005*, Bundesamt für Energie, Bern Dezember 2005

- [22] <http://www.zucker.ch/schweizer-zucker/herstellung/> (27.10.2014)
- [23] Email mit Frau Metthez der Schweizer Zucker AG, September 2014
- [24] www.zucker.ch/unternehmen/standorte/
- [25] Zucker Statistik 04.03.14
- [26] <http://www.theobroma-cacao.de/wissen/herstellung/schokoladeherstellung/> (19.9.2014)
- [27] Rudolf Heiss (Hrsg.): *Lebensmitteltechnologie – Biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung*, Springer Berlin Heidelberg, 4. Auflage, 1991, Seite 345
- [28] Email mit Herrn Menoud von Chocolats Halba, September 2014
- [29] https://www.nescafe.ch/roestung_de_ch.axcms (27.10.2014)
- [30] Telefongespräch mit Herrn Schwab von UCC Coffee, 24.10.2014
- [31] <http://www.reismuehle.ch/de/reiskunde/verarbeitung/?oid=1477&lang=de> (27.10.2014)
- [32] Email mit Herrn Gerhard Marty von der Reismühle Brunnen, Oktober 2014
- [33] Landwirtschaftlicher Informationsdienst LID: *Die nördlichsten Reisfelder der Welt*
<http://www.lid.ch/de/medien/mediendienst/artikel/infoarticle/17230/> (30.10.2014)
- [34] http://www.feed-alp.admin.ch/fmkatalog/katalog/de/html/unit_155.html (10.7.2014)
- [35] Email mit Herrn Peter Ulrich von der Ölmühle Briseck GmbH, Oktober 2014
- [36] Gubler, C.: Nussanbau – Ein interessanter zukünftiger (Bio)-Betriebszweig?, *2. Jahrestagung der IG Agroforst*, Agroscope, Hörhausen, 19. Juni 2013
- [37] Telefon mit Herrn Pelucchi von Sunray, 26.02.2015
- [38] Email mit Herrn Lorenzo Pelucchi von Sunray, März 2015
- [39] Keel, A.: Neue Rohstoffe, neue Chancen effizient ergreifen, *6. Tagung Holzenergie*, Berner Fachhochschule, Biel 16. Februar 2011
- [40] Email mit Herrn Thomas Janssen der Feldschlösschen Supply Company AG, März 2015
- [41] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg 2009, Seite 163
- [42] <http://www.bier.ch/deu/kennzahlen-wussten-sie.php> (23.03.2015)
- [43] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg 2009, Seite 357
- [44] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg 2009, Seite 417 ff.
- [45] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, S. 427 ff.
- [46] Skrifvars, B.; Hupa, M.; Hiltunen, M.: Sintering of Ash during Fluidized Bed Combustion, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 31, 1992, 1026-1030
- [47] DIN 51730:2007-09: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens
- [48] Nussbaumer, T.: *Erneuerbare Energien – Bioenergie*, Vorlesungsskript, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 2014, 8. Auflage, ISBN 3-908705-17-7

- [49] OFI Technologie & Innovation GmbH Österreich: Bestimmung von Brennstoff-Parametern von Getreidpellets- und Ascheproben, *Prüfbericht Nr.: 406.997-12*, im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, 22. August 2012
- [50] KCO Cogeneration und Bioenergie GmbH (ein Unternehmen der Kohlbach-Gruppe): *Verbrennungsversuch K8 1200 kW NWL – Müllereinachprodukte (MNP) in Mischung mit Hackgut G50, Phase 2*, im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, Wolfsberg Dezember 2012
- [51] Eurofins Umwelt Ost GmbH: *Brennstoffanalyse Müllereinachprodukte (MNP)*, Prüfbericht im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, 16.1.12
- [52] Reisinger, K.; Haslinger, C.; Herger, M.; Hofbauer, H.: BIOBIB – A Database For Biofuels, *THERMIE Conference: Renewable Energy Databases*, Harwell (UK) 1996
<http://cdmaster2.vt.tuwien.ac.at/biobib/all.html> (16.03.2015)
- [53] Culcuoglu, E.; Ünay, E.; Karaosmanoglu, F.: Rapeseed Cake as a Biomass Source, *Energy Sources* 24, 2002, 329-336
- [54] Steenari, B.; Lundberg, A.; Pettersson, H.; Wilewska-Bien, M.; Andersson, D.: Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives, *Energy Fuels* 23, 2009, 5655-5662
- [55] Suarez, J. A.; Beaton, P. A.; Luengo, C. A.; Felfli, F. F.: Coffee Husk Briquettes: A New Renewable Energy Source, *Energy Sources* 25, 2003, 961-967
- [56] Domínguez, A.; Menéndez, J. A.; Fernández, Y.; Pis, J. J.; Valente Nabais, J. M.; Carrott, P. J. M.; Ribeiro Carrott, M. M. L.: Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 79, 2007, 128-135
- [57] Vassilev, S.; Baxter, D.; Andersen, L.; Vassileva, C.: An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel* 89, 2010, 913-933
- [58] Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E.; Ogada, T.; Siagi, Z.: Combustion of agricultural residues, *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 2000, 1-27
- [59] Titiloye, J.; Abu Bakar, M.; Odetoye, T.: Thermochemical characterisation of agricultural wastes from West Africa, *Industrial Crops and Products* 47, 2013, 199-203
- [60] Annamalai, K.; Sweeten, J. M.; Ramalingam, S. C.: Estimation of Gross Heating Values of Biomass Fuels, *TRANSACTIONS of the ASAE* 30, 1987, 1205-1208
- [61] van der Drift, A.; van Doorn, J.; Vermeulen, J. W.: Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification, *Biomass and Bioenergy* 20, 2001, 45-56
- [62] Malatak, J.; Karansky, J.; Altman, V.; Jevic, P.; Galik, R.: Alternative Fuels - Agricultural Waste Materials Utilization, *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)* 53, 2007, 38-48
- [63] Fortes, C.; Carciofi, A.; Sakomura N.; Kawauchi, I.; Vasconcellos, R.: Digestibility and metabolizable energy of some carbohydrate sources for dogs, *Animal Feed Science and Technology* 156, 121-125, 2010
- [64] Luh, B. S.: Rice, Volume 2: Utilization, *Springer Science & Business Media*, February 1991
- [65] Orthofer, F.: Rice Bran Oil, *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* 2, 2005

7. Beilagenliste

Als Basis zur Beurteilung der Brennstoffeigenschaften dienen unter anderem nicht publizierte Prüfberichte zu Brennstoffanalysen von Müllereinebenenprodukten, die im Rahmen der Vorarbeiten zum vorliegenden Projekt durchgeführt wurden. Diese sind im Literaturverzeichnis zitiert und stehen als Beilagen 1 bis 3 zur Verfügung. Auf Basis der in den Beilagen dokumentierten Analysen und der aus der Literatur zitierten Daten wurde eine Excel-Datei verfasst, die als Grundlage für die im vorliegenden Bericht verwendeten Erwartungswerte dient. Die Excel-Datei ist als Beilage 4 verfügbar.

Beilage 1 [49]

OFI Technologie & Innovation GmbH Österreich: Bestimmung von Brennstoff-Parametern von Getreidepellets- und Ascheproben, *Prüfbericht Nr.: 406.997-12*, im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, 22. August 2012

Beilage 2 [50]

KCO Cogeneration und Bioenergie GmbH (ein Unternehmen der Kohlbach-Gruppe): *Verbrennungsversuch K8 1200 kW NWL – Müllereinebenenprodukte (MNP) in Mischung mit Hackgut G50, Phase 2*, im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, Wolfsberg Dezember 2012

Beilage 3 [51]

Eurofins Umwelt Ost GmbH: *Brennstoffanalyse Müllereinebenenprodukte (MNP)*, Prüfbericht im Auftrag Dr. Eicher + Pauli AG, 16.1.12

Beilage 4 Verenum 2015: Excel-Datei mit Zusammenfassung aller Analysedaten.